

**TARJETA DE CONTROL ANALOGO EQUIPADA CON PROBADOR DE
CONEXIONES PARA EL MANEJO DE LA UNIDAD MECÁNICA FEEDBACK
INSTRUMENTS DEL LABORATORIO DE CONTROL**

ALFONSO ROSO REYES

**UNIVERSIDAD PONTIFICIA BOLIVARIANA
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRÓNICA
BUCARAMANGA
28 DE AGOSTO DEL 2008**

Este proyecto lo dedico a toda mi familia
especialmente a mi madre Cecilia Reyes
de Roso quien depositó toda su
confianza y sus esperanzas en mí

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bucaramanga, Agosto 28 de 2008

CONTENIDO

	Pág.
1. TITULO DE LA INVESTIGACIÓN	6
2. DIRECTOR DEL PROYECTO	6
3. INTEGRANTE DEL PROYECTO	6
4. RESUMEN	6
5. INTRODUCCIÓN	7
6. MARCO TEÓRICO	8
6.1 Reseña histórica	8
6.2 Cibernética e instrumentación	10
6.3 Sistemas de control	11
6.3.1 Ejemplos de sistemas de control	12
6.4 Sistemas de control realimentado	12
6.4.1 Elementos básicos	13
6.4.1.1 Elemento de comparación	13
6.4.1.2 Elemento de control	13
6.4.1.3 Elemento de corrección	13
6.4.1.4 Elemento de proceso	13
6.4.1.5 Elemento de medición	13
6.5 Tipos de control	14
6.5.1 Control analógico y control digital	14
6.5.2 Sistemas de control reguladores y de seguimiento	15
6.5.2.1 Sistema de control de regulador	15
6.5.2.2 Sistema de control de seguimiento	16
6.5.3 Control de procesos	16
6.5.4 Servomecanismos o servosistemas	17
6.5.5 Sistemas de control de posición	18
6.5.5.1 Sistema de control de posición hidráulico	18
6.5.5.2 Sistema de control de posición utilizando un motor DC	19
6.5.6 Sistema de control de velocidad	19
6.5.7 Control secuencial	20
6.5.7.1 Guiado por sucesos	20
6.5.7.2 Guiado por tiempo	21
6.5.8 Control numérico	21
6.5.9 regulador ON-OFF	22
6.5.10 Autómatas programables	23
6.5.11 Regulador PID	24
6.5.12 Control Multivariable	25
6.5.13 Control difuso	26
6.5.14 Sistemas SCADA	26
6.5.15 Sistemas distribuidos de control (SDC)	27
6.6 Análisis de la respuesta transitoria	27
6.7 Reglas de sintonía de controladores PID	29
6.7.1 Control PID de plantas	29
6.7.2 Reglas de Ziegler-Nichols para sintonizar controladores PID	30
6.7.2.1 Primer método	30
6.7.2.2 Segundo método	33

6.7.2.3 Comentarios	34
6.8 El amplificador operacional	35
6.8.1 Principios básicos de los amplificadores operacionales	35
6.8.1.1 El amplificador operacional ideal	35
6.8.1.2 Configuraciones básicas del amplificador operacional	37
6.8.1.2.1 El amplificador inversor	37
6.8.1.2.2 El amplificador no inversor	39
6.8.1.3 Configuraciones basadas en los circuitos inversor y no inversor	40
6.8.1.3.1 El amplificador diferencial	40
6.8.1.3.2 El sumador inversor	43
6.8.1.3.3 El integrador	44
6.8.1.3.4 El diferenciador o derivador	45
6.8.1.3.5 El seguidor de tensión	47
6.8.1.4 Resumen de las configuraciones básicas del amplificador y sus características	47
6.8.2 Símbolo esquemático del amplificador operacional estándar y su uso	48
6.9 Multiplexores analógicos	49
6.9.1 Estructura y Utilización	49
6.9.2 Parámetros Característicos	53
6.9.3 Parámetros Estáticos	54
6.9.3.1 Resistencias de los interruptores	54
6.9.3.2 Intensidades parásitas	54
6.9.3.3 Diafonía	55
6.9.3.4 OFF de aislamiento	56
6.9.3.5 Parámetros dinámicos	57
6.9.3.6 Tiempo de transición	57
6.9.3.7 Tiempo de apertura	58
6.9.3.8 Tiempo en ON de habilitación	59
6.9.3.9 Tiempo en OFF de habilitación	60
6.10 Transistor	60
6.10.1 Reseña histórica del transistor	60
6.10.2 Tipos de transistores	62
6.10.2.1 Transistores de unión bipolar	62
6.10.2.2 Transistores de efecto de campo	63
6.10.2.3 Foto transistores	63
6.10.2.4 Transistor Darlington	63
6.10.2.5 Transistores de efecto de campo de metal oxido semiconductor	65
6.10.2.6 Transistor Uní unión	66
6.10.2.7 Transistor CMOS	66
6.11 Microcontroladores	67
6.11.1 Controlador y microcontrolador	67
6.11.2 Diferencia entre microprocesador y microcontrolador	68
6.11.3 Aplicaciones de los microcontroladores	69
6.11.4 El mercado de los microcontroladores	70
6.11.5 ¿Qué microcontrolador emplear?	71
6.11.6 Recursos comunes a todos los microcontroladores	73
6.11.6.1 Arquitectura básica	73
6.11.6.2 El procesador o UCP	73

6.11.6.3 Memoria	74
6.11.6.4 Puertas de Entrada y Salida	76
6.11.6.5 Reloj principal	76
6.11.7 Recursos especiales	77
6.11.7.1 Temporizadores o "Timers"	77
6.11.7.2 Perro guardián o "Watchdog"	77
6.11.7.3 Protección ante fallo de alimentación o "Brownout"	78
6.11.7.4 Estado de reposo ó de bajo consumo	78
6.11.7.5 Conversor A/D (CAD)	78
6.11.7.6 Conversor D/A (CDA)	78
6.11.7.7 Comparador analógico	78
6.11.7.8 Modulador de anchura de impulsos o PWM	78
6.11.7.9 Puertos de E/S digitales	79
6.11.7.10 Puertos de comunicación	79
6.11.8 Herramientas para el desarrollo de aplicaciones	79
7. METODOLOGÍA	80
8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	85
8.1 Entrenador de servo control analógico equipado con unidad probadora de conexiones.	85
8.2 Unidad analógica II	85
8.3 Unidad mecánica FEEDBACK INSTRUMENTS 33-100	89
8.4 Unidad probadora de conexiones	90
8.5 Fuente de energía FEEDBACK INSTRUMENTS	92
8.6 Conmutador de conexiones	92
8.7 Resultados y análisis de datos obtenidos en el laboratorio	93
9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	122
10. BIBLIOGRAFIA	122
Anexos	123
Anexos I	123

1. TITULO DE LA INVESTIGACIÓN

TARJETA DE CONTROL ANALOGO EQUIPADA CON PROBADOR DE CONEXIONES PARA EL MANEJO DE LA UNIDAD MECÁNICA FEEDBACK INSTRUMENTS DEL LABORATORIO DE CONTROL

2. DIRECTOR DEL PROYECTO

REYNALDO CLAROS LAMUS

3. INTEGRANTE DEL PROYECTO

ALFONSO ROSO REYES
Aspirante a Ingeniero Electrónico
UPB Bucaramanga

4. RESUMEN

Con este proyecto se buscó proteger la integridad del entrenador analógico FEEDBACK INSTRUMENTS utilizado en el laboratorio de control de procesos. Para este propósito fue necesario realizar un plano de la unidad analógica FEEDBACK INSTRUMENTS 33-110 pues en el almacén de la institución no se cuenta con ninguno de los originales, lo cual es muy relevante a la hora de rediseñar pues el nuevo modulo se basa en gran medida a su antecesor. Para desarrollar las mejoras y modificaciones del antiguo diseño se elaboró el nuevo plano utilizando el software ORCAD. La organización del trazado de cada camino fue redistribuida para dar cabida a la inclusión de dos nuevos puertos, los cuales transfieren por medio de una cinta RIBBON cada terminal de la nueva unidad analógica hasta el modulo de pruebas, el cual se encarga de supervisar y asegurar el correcto funcionamiento del entrenador. Por otro lado se diseñó desde cero la tarjeta probadora realizando pruebas en el protoboard y simulaciones en el PC. Dichas pruebas dieron como resultado la concepción de nuestro diseño el cual se monto en el software ORCAD para su respectiva organización y fabricación. Luego de terminado el impreso y su respectivo ensamblaje se prosiguió a programar el microcontrolador del modulo de pruebas; dicha programación fue basado en las guías del laboratorio. También se realizaron pruebas de funcionamiento a la nueva unidad analógica para descartar cualquier error de diseño y fabricación. Además se compararon todas las señales de la antigua unidad FEEDBACK INSTRUMENTS 33-110 con las señales entregadas por la nueva unidad analógica, comprobando que su similitud funcional es perfecta. Por ultimo se hizo una rutina de laboratorio siguiendo las guías de experiencias para verificar el correcto funcionamiento de la unidad probadora en conjunto con la unidad mecánica y la nueva unidad analógica.

ABSTRACT

With this project we sought to protect the integrity of the FEEDBACK INSTRUMENTS analog trainer which is used at the laboratory of processes control. For this was necessary to create a plan of FEED BACK INSTRUMENTS 33-10 analog unit due to there is none of the originals at the Institution store, what is not actually relevant at the time of redesigning because the new module it is wildly based on its predecessor. In order to improve the previous design we did the new plan using ORCAD software. The layout organization was redistributed to leave room for the inclusion of the new ports

wich transfer by mean of a RIBBON tape, each terminal of the new analog unit until getting the test module, which is in charge of supervising and making sure the proper operation of the trainer.

On the other hand, we designed the tester card starting from scratch, doing tests on the protoboard and simulations on the PC, these tests gave us as a result the conception of our design which was done on ORCAD software for its organization and fabrication.

After finishing the printed and assembly we continued on programming the Microcontroller for the module of tests: This programation was based on the laboratory guides. Working tests were done to the new analog unit as well in order to discard any design or fabrication mistake, in addition to this we compared both the previous signals given by the FEEDBACK 33-110 and the ones given by the new analog unit, proving the similar perfect operation, At the end we did a laboratory routine following the guide of experience to verify the proper operation of the unit test, the mechanical unit and the new analog unit.

5. INTRODUCCIÓN

Nuestro mundo se mueve cada día con una velocidad vertiginosa e imparable por satisfacer todas nuestras necesidades, la mayoría de lo que consumimos a pasado de ser simple materia prima para convertirse en un producto de consumo masivo mediante un proceso de control. El control automático desempeña un papel importante a nivel mundial en los procesos de manufactura, industriales, robóticos, navales, aeroespaciales, biológicos, económicos, etc. Como el control esta de la mano de prácticamente, todas las ingenierías (electrónica, eléctrica, mecánica, química, sistemas, industrial, etc.), es indispensable desarrollar excelentes clases de metodologías de aprendizaje acerca de los tipos de control que existen y sus aplicaciones en nuestro ámbito pedagógico y profesional para dar a luz de esta manera una educación de alta calidad que genere excelentes profesionales.

La mejor manera de alcanzar este objetivo es darle al laboratorio las herramientas didácticas adecuadas dotadas con lo mejor de los sistemas de control pero que a la vez se garantice una excelente seguridad en el manejo de los módulos didácticos sin que el alumno afecte su correcto funcionamiento.

En este proyecto nos basaremos en los estudios y desarrollos realizados anteriormente por FEEDBACK INSTRUMENTS específicamente en la tarjeta de control análogo FEEDBACK INSTRUMENTS 33-110 la cual es de diseño y fabricación exclusiva de dicha compañía de tecnología inglesa. Esta compañía se dedica casi que únicamente al desarrollo y fabricación de dispositivos de control didácticos para la utilización en la pedagogía de la educación superior. Dicha tarjeta opera manualmente ya que en la practica las conexiones se deben hacer por el usuario, no existe un circuito para probar la correcta organización en las conexiones y que este a su vez proteja la integridad de los componentes del modulo de control.

Debido a que el control juega un papel tan relevante en los procesos de los cuales dependemos todo el tiempo, es necesario mejorar la manera como se lleva acabo el desarrollo de cada práctica en el laboratorio, pues el seguimiento de una guía para realizar conexiones sin garantizar la correcta ubicación de cada puente resulta inapropiado para el optimo funcionamiento del modulo didáctico, ya que en muchos casos se han presentado daños a causa de malas conexiones físicas debido al error humano. Estas situaciones tenían como resultado la deshabilitación de la tarjeta de control retrasando así el desarrollo del programa del laboratorio hasta que se le diera

solución a dicha falla. En muchos casos este inconveniente se postergaba ya que algunos de los encapsulados son de escasa existencia.

Se equipó la nueva tarjeta de control análogo con un probador externo diseñado para funcionar estando la unidad análoga desenergizada y que esta a su vez funcione cuando el probador este apagado, en otras palabras la tarjeta de control análogo y su respectivo probador nunca están encendidos al mismo tiempo, esto se debe a que solamente se monitorea la continuidad de las conexiones realizadas manualmente mas no las señales que conduzcan los bornes o terminales del nuevo modulo didáctico en funcionamiento. Otra característica del diseño de la tarjeta probadora es seguir en orden cada guía que este dedicada al entrenador de control análogo, simplemente se muestra en un LCD el numero de la practica y su respectiva experiencia seguido del numero de conexiones que se deben realizar y si se conectaron correcta o incorrectamente. Si lo último ocurre el circuito probador inhabilitara la nueva tarjeta de control análogo hasta que se conecte adecuadamente según corresponda.

La nueva tarjeta de control análogo conserva de la unidad FEEDBACK 33-110 las posiciones de cada uno de los elementos que la componen y su respectivo esquema didáctico tal como se encuentra en las guías del laboratorio de control. Se rediseñó totalmente la organización de cada camino de la antigua unidad analógica debido a la inclusión de un par de puerto en la nueva tarjeta de control análogo para enlazarse por medio de una cinta plana a la tarjeta probadora.

6. MARCO TEÓRICO

6.1 Reseña Histórica

La aplicación del principio de realimentación tiene sus comienzos en máquinas e instrumentos muy sencillos, algunos de los cuales se remontan a 2000 años atrás.

El aparato mas primitivo que emplea el principio de control por realimentación fue desarrollado por un griego llamado Ktsibios aproximadamente 300 años A.C. Se trataba de un reloj de agua como el mostrado en la figura el cual medía el pasaje del tiempo por medio de un pequeño chorro de agua que fluía a velocidad constante dentro de un recipiente.

El mismo poseía un flotante que subía a medida que el tiempo transcurría. Ktsibios resolvió el problema del mantenimiento del caudal constante de agua inventando un aparato semejante al usado en los carburadores de los motores modernos. Entre el suministro de agua y el tanque colector había una regulación de caudal de agua por medio de una válvula flotante que mantenía el nivel constante. Si el nivel se elevaba (como resultado de un incremento en la presión de suministro por ejemplo), el flotante se elevaba restringiendo el caudal de agua en el recipiente regulador hasta que el flotante volvía al nivel específico.

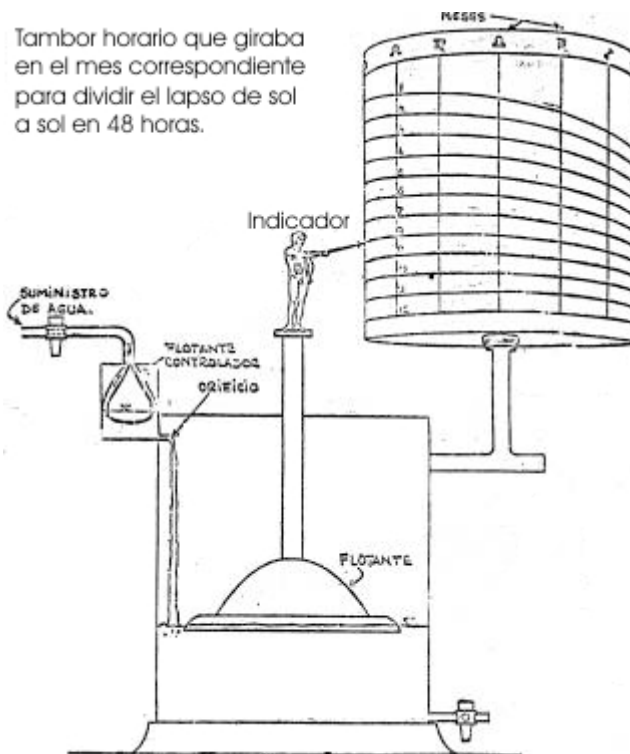


Figura 6.1

En el siglo IX el regulador de nivel a flotante es reinventado en Arabia. En este caso se usaba para mantener el nivel constante en los bebederos de agua. En el siglo XVI, en Inglaterra se usaba el principio de realimentación para mantener automáticamente las paletas de los molinos de viento en una posición normal a la dirección del viento. En el siglo XVII, en Inglaterra se inventaba el termostato que se aplicaba para mantener la temperatura constante de una incubadora.

En primer uso del control automático en la industria parece haber sido el regulador centrífugo de la máquina de vapor de Watt en el año 1775 aproximadamente. Este aparato fue utilizado para regular la velocidad de la máquina manipulando el caudal de vapor por medio de una válvula. Por lo tanto, están presentes todos los elementos de realimentación. Aún cuando el principio de control por realimentación desde muchos años en la antigüedad, su estudio teórico aparece muy tarde en el desarrollo de la tecnología y la ciencia.

El primer análisis de control automático es la explicación matemática del regulador centrífugo por James Clerk Maxwell en 1868.

Más tarde la técnica del regulador se adjudicó a otras máquinas y turbinas y a principio del siglo XX comenzó la aplicación de reguladores y servomecanismos en reguladores de energía térmica al gobierno de buques. La primera teoría general sobre control automático, pertenece a Nyquist en el famoso artículo "Teoría de la regeneración". Este estudio sentó las bases para la determinación de la estabilidad de sistemas sin necesidad de resolver totalmente las ecuaciones diferenciales. Otros desarrollos en servomecanismos y amplificadores eléctricos dieron origen a muchas técnicas de frecuencia y lugar geométrico que se usan hoy en día. Las aplicaciones generales al control de procesos no comenzaron hasta la década del '30. Las técnicas de control se

consagraron rápidamente, tal es así que ya en los años '40 funcionaban redes de control relativamente complejas.

En casi todas las fases de procesos industriales se utilizan aparatos de control automático. Se usan corrientemente en:

- Industrias de procesamiento como la del petróleo, química, acero, energía y alimentación para el control de la temperatura, presión, caudal y variables similares.
- Manufactura de artículos como repuestos o partes de automóviles, heladeras y radio, para el control del ensamble, producción, tratamiento térmico y operaciones similares.
- Sistemas de transporte, como ferrocarriles, aviones, proyectiles y buques.
- Máquinas herramientas, compresores y bombas, máquinas generadoras de energía eléctrica para el control de posición, velocidad y potencia.

Algunas de las muchas ventajas del control automático, ya muy difundido, son las siguientes:

- a) Aumentó en la cantidad o número de productos
- b) Mejora de la calidad de los productos
- c) Economía de materiales
- d) Economía de energía o potencia
- e) Economía de equipos industriales
- f) Reducción d inversión de mano de obra en tareas no especializadas.

Estos factores generalmente contribuyen a aumentar la productividad. La difusión de la aplicación del control automático en la industria ha creado la necesidad de elevar el nivel de la educación de un sector de obreros semiespecializados, capacitándolos para desempeñar tareas de mayor responsabilidad: el manejo y mantenimiento de equipos e instrumentos de control.[4]

6.2 Cibernética e instrumentación

La ciencia de la cibernética e instrumentación se ocupa de los fenómenos de comunicación y control en la naturaleza , las máquinas o el hombre. Hay dos sectores de trabajo en el campo de la instrumentación e información

- a) Estudio de la teoría de comunicación e información.
- b) Estudio de la teoría de control y realimentación.

Las leyes importantes de comunicación y control tratan de la información concerniente al estado y comportamiento de los sistemas y no se ocupan de la energía o de la transferencia de energía dentro del sistema. El uso de la energía es del orden secundario para el propósito principal de control o comunicación.

La teoría de la comunicación e información se basa en el concepto de que todas las ideas pueden expresarse en mensajes traducibles al lenguaje común. La cantidad de información puede ser definida y por lo tanto se puede medir, y en consecuencia, se puede enunciar que gobierna la transmisión de la información. La tecnología de la

medición, telemetría, televisión, estructura del lenguaje, sistemas numéricos y computación automática, emplean las ideas básicas de información y manejo y procesamiento de datos.

El campo del control automático desde el punto de vista práctico se puede dividir en tres secciones:

- a) Control de procesos que involucren cambios químicos y de estado.
- b) Control de manufactura que involucra cambio de forma.
- c) Control de posición fundamentalmente, con niveles de potencia por encima de unos pocos Watt. [4]

6.3 Sistemas de control

Definición de sistema:

- a) Un “sistema” es un ordenamiento, conjunto o colección de cosas conectadas o relacionadas de manera que constituyan un todo.
- b) Un “sistema” es un ordenamiento de componentes físicos conectados o relacionados de manera que formen una unidad completa que puedan actuar como tal.

La palabra “control” generalmente se usa para designar “regulación”, dirección o “comando”. Al combinar las definiciones anteriores se tiene:

Un sistema de control es un ordenamiento de componentes físicos conectados de tal manera que el mismo pueda comandar, dirigir o regularse a sí mismo o a otro sistema. En el sentido más abstracto es posible considerar cada objeto físico como un sistema de control. Cada cosa altera su medio ambiente de alguna manera, activa o positivamente.

El caso de un espejo que dirige un haz de luz que incide sobre él, puede considerarse como un sistema elemental de control, que controla el haz de luz de acuerdo con la relación “el ángulo de reflexión es igual al ángulo de incidencia”. En la ingeniería y en la ciencia se restringe el significado de sistemas de control al aplicarlo a los sistemas cuya función principal es comandar, dirigir, regular dinámica o activamente.

El sistema ilustrado en la figura 6.2, que consiste en un espejo pivoteado en uno de sus extremos y que se puede mover hacia arriba o hacia abajo por medio de un tornillo en el otro extremo, se denomina propiamente un sistema de control. En ángulo de la luz reflejada se regula por medio del tornillo. [4]

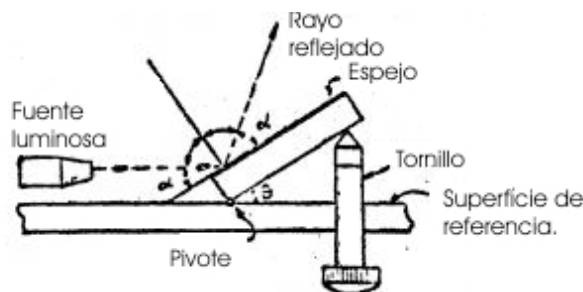


Figura 6.2 Sistema elemental de control.

6.3.1 Ejemplos de sistemas de control

Los sistemas de control abundan en el medio ambiente del hombre. Antes de mostrar esto, se definirán los términos entrada y salida que ayudarán a identificar o definir al sistema de control.

La entrada es el estímulo o la excitación que se aplica a un sistema de control desde una fuente de energía externa, generalmente con el fin de producir de parte del sistema de control, una respuesta especificada.

La salida es la respuesta obtenida del sistema de control. Puede no ser igual a la respuesta especificada que la entrada implica. El objetivo del sistema de control generalmente identifica a define la entrada y la salida. Dadas éstas es posible determinar o definir la naturaleza de los componentes del sistema.

Los sistemas de control pueden tener más de una entrada o salida. Existen tres tipos básicos de sistemas de control:

1. Sistemas de control hechos por el hombre.
2. Sistemas de control naturales, incluyendo sistemas biológicos.
3. Sistemas de control cuyos componentes están unos hechos por el hombre y los otros son naturales.

Ejemplo 1.

Un conmutador eléctrico es un sistema de control (uno de los mas rudimentarios) hecho por el hombre, que controla al flujo de electricidad. Por definición, el aparato o la persona que actúa sobre el conmutador no forma parte de este sistema de control. La entrada la constituye la conmutación del dispositivo tanto hacia el estado de conducción como hacia el de corte. La salida la constituye la presencia o ausencia del flujo (dos estados) de electricidad.

Ejemplo 2.

Un calentador o calefactor controlado por medio de un termostato que regula automáticamente la temperatura de un recinto. La entrada de este sistema es una temperatura de referencia, (generalmente se especifica graduando el termostato convenientemente). La salida es la temperatura del recinto. Cuando el termostato detecta que la salida es menor que la entrada, el calefactor produce calor hasta que la temperatura del recinto sea igual a la entrada de referencia. Entonces, el calefactor se desconecta automáticamente.

Ejemplo 3.

La indicación de un objeto con un dedo requiere de un sistema de control biológico constituido principalmente por los ojos, el brazo, la mano, el dedo y el cerebro de un hombre. La entrada es la dirección precisa del objeto (en movimiento o no) con respecto a una referencia, y la salida es la dirección que se indica con respecto a la misma referencia. [4]

6.4 Sistemas de control realimentado

Los sistemas de control realimentados se denominan también sistemas de control de lazo cerrado. En la práctica, los términos control realimentado y control en lazo cerrado se usan indistintamente.

En un sistema de control en lazo cerrado, se alimenta al controlador la señal de error de actuación, que es la diferencia entre la señal de entrada y la salida de realimentación (que puede ser la señal de salida misma o una función de la señal de salida y sus derivadas o/y integrales) a fin de reducir el error y llevar la salida del sistema a un valor conveniente. El término control en lazo cerrado siempre implica el uso de una acción de control realimentando para reducir el error del sistema.

6.4.1 Elementos Básicos

6.4.1.1 Elemento de comparación

Este elemento compara el valor requerido o de referencia de la variable por controlar con el valor medido de lo que se obtiene a la salida, y produce una señal de error la cual indica la diferencia del valor obtenido a la salida y el valor requerido.

6.4.1.2 Elemento de control

Este elemento decide que acción tomar cuando se recibe una señal de error.

6.4.1.3 Elemento de corrección

Este elemento se utiliza para producir un cambio en el proceso al eliminar el error.

6.4.1.4 Elemento de proceso

El proceso o planta, es el sistema dónde se va a controlar la variable.

6.4.1.5 Elemento de medición

Este elemento produce una señal relacionada con la condición de la variable controlada, y proporciona la señal de realimentación al elemento de comparación para determinar si hay o no error. [5]

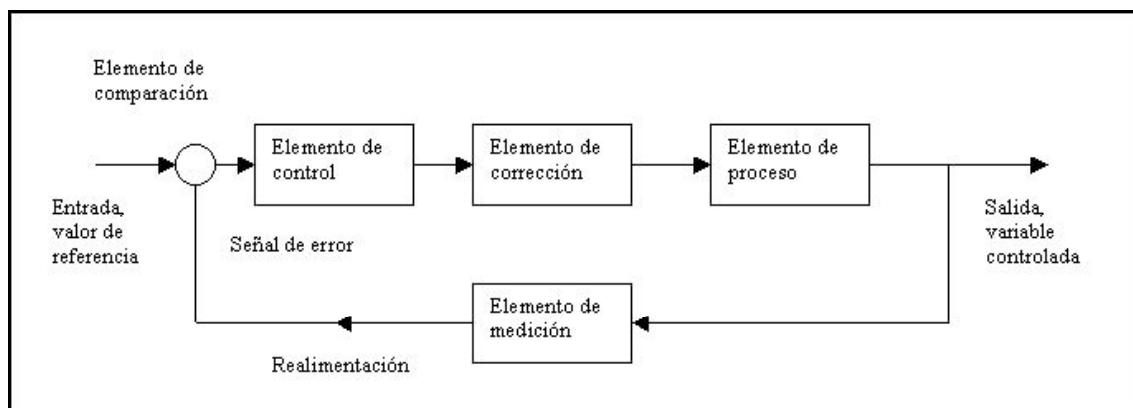


Figura 6.3 Sistema de control realimentado

6.5 Tipos de control

Los sistemas de control pueden clasificarse de formas diversas: se clasifican como sistemas de lazo abierto o lazo cerrado dependiendo de si existe o no realimentación; como analógicos o digitales según el tipo de señales que manejan; reguladores o de seguimiento, dependiendo de si la entrada de referencia es constante o varía con el tiempo. También se agrupan en sistemas de control de procesos o sistemas de control de máquinas dependiendo de la industria en la que se utilizan. [6]

6.5.1 Control analógico y control digital

En un sistema de control las señales se dividen en dos categorías: analógicas y digitales. Una señal analógica cambia de forma continua y puede tomar cualquier valor dentro de sus límites. Una señal digital cambia de manera discreta y solamente puede tomar ciertos valores dentro de sus límites.

Como ejemplo veamos la representación de las señales utilizadas por un sistema de control analógico y sistema de control digital:

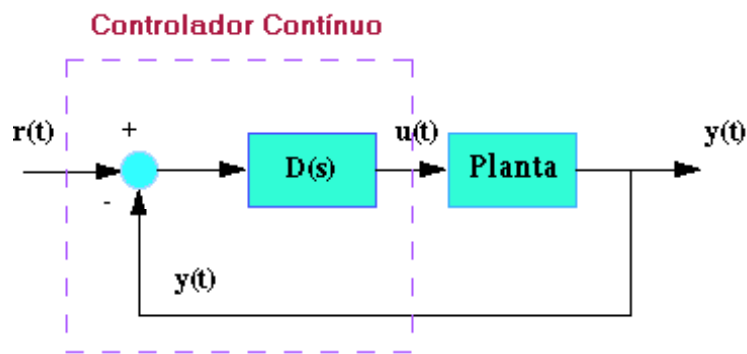


Figura 6.4 Control analógico

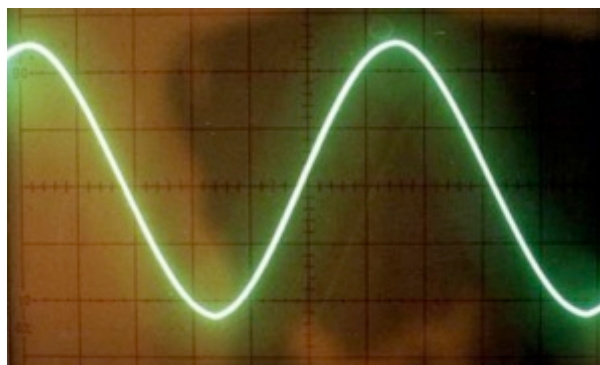


Figura 6.5 Señal analógica (osciloscopio)

El control analógico se refiere a sistemas de control que trabajan con señales analógicas.

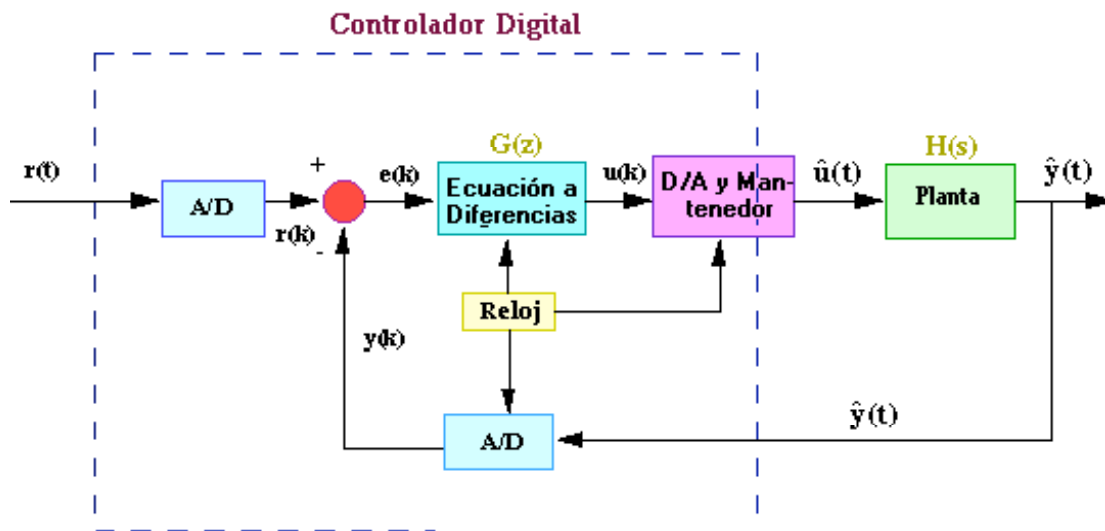


Figura 6.6 Control digital

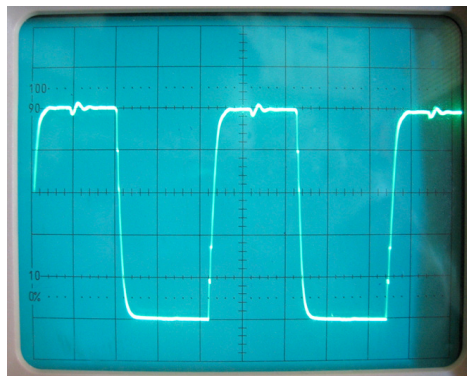


Figura 6.7 Señal digital (osciloscopio)

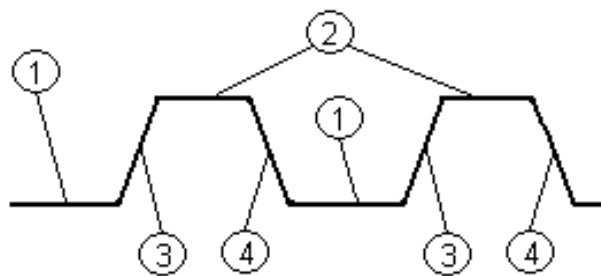


Figura 6.8 Señal digital: 1) Nivel bajo, 2) Nivel alto, 3) Flanco de subida y 4) Flanco de bajada.

El control digital se refiere a sistemas de control que trabajan con señales digitales o discretas. [6]

6.5.2 Sistemas de control reguladores y de seguimiento

6.5.2.1 Sistema de control regulador

Un sistema regulador es un sistema de control realimentado en el que la señal de referencia no cambia o cambia muy poco. Su función principal consiste en mantener constante la variable controlada a pesar de las perturbaciones que puedan afectar al sistema.

Ejemplos: sistemas de calefacción, sistemas reguladores de presión o de voltaje. Muchos sistemas de control de procesos se utilizan para mantener constantes las condiciones del proceso, por lo que son también sistemas reguladores.

Un sistema de control regulador mantiene la variable controlada en un valor constante. [6]

6.5.2.2 Sistema de control de seguimiento

Un sistema de seguimiento es un sistema de control realimentado en el que la señal de referencia cambia continuamente. Su función es mantener la variable controlada lo más cercana posible al valor de referencia a medida que éste cambia.

Ejemplos: sistemas de radiocontrol, sistemas de control de posición de la antena en los radares, servosistemas utilizados para mantener una posición que siga los cambios de la referencia.

Un sistema de control de seguimiento mantiene la variable acorde con un valor de referencia que cambia. [6]

6.5.3 Control de procesos

El control de procesos engloba la regulación de las variables de un proceso.

Proceso: cualquier combinación de materiales y equipos que producen el resultado deseado por medios de cambios en la energía o en las propiedades físicas o químicas.

Las variables controladas más frecuentemente en un proceso son la temperatura, la presión, el caudal y el nivel. En ocasiones se controlan la densidad, la viscosidad, la composición, el color, la conductividad, el pH o la dureza.

La mayoría de los sistemas de control de procesos mantienen constantes las condiciones de procesado, por lo que son sistemas reguladores. [6]

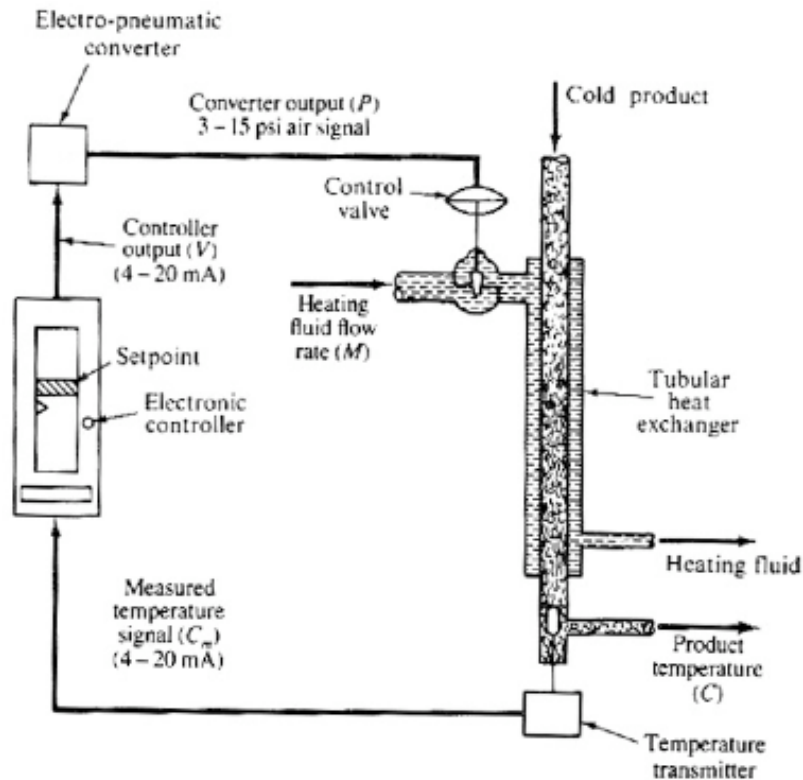


Figura 6.9 Sistema de control de la temperatura de un líquido.

6.5.4 Servomecanismos o servosistemas

Son sistemas de control realimentado en los que la salida es algún elemento mecánico, sea posición, velocidad o aceleración. Los servomecanismos controlan la posición o el movimiento de alguna parte de un sistema de control.

Muchos servosistemas pueden considerarse sistemas de seguimiento.

Normalmente los servomecanismos forman parte de otro sistema de control. Matemáticamente, no existen diferencias entre un servomecanismo y un sistema de control de procesos en lazo cerrado. Sin embargo, como los dos tipos de sistemas de control han evolucionado de manera independiente, utilizan métodos de diseño y terminología diferente.

Los servomecanismos están incluidos en procesos más rápidos, con constantes de tiempo menores a 1 segundo, mientras que los sistemas de control de procesos implican procesos mucho más lentos, de forma que las constantes de tiempo se pueden medir en segundos, minutos e incluso horas.

Los componentes de un servosistema suelen estar bien definidos matemáticamente, por lo que es fácil diseñarle un controlador de forma bastante precisa, de manera que en la práctica el sistema cumple las especificaciones sin necesidad de ajustes. Los procesos son mucho más difíciles de definir matemáticamente, por eso los sistemas de control de proceso normalmente necesitan ajustes en la planta para conseguir

respuestas óptimas. [6]

6.5.5 Sistemas de control de posición

Un control de posición analógico realimentado es un sistema que al aplicar como entrada un desplazamiento angular (θ_i) ó longitudinal (SET POINT) sobre un transductor (potenciómetro) produce una señal eléctrica equivalente denominada, como voltaje de referencia, que se compara con otra señal (voltaje de realimentación) proveniente de la salida del sistema y originada por el posicionamiento angular (θ_o) de otro transductor ó potenciómetro. El resultado de la comparación de estas dos señales obtenidas desde un amplificador operacional es denominado como “señal de error” la cual es amplificada y mejorada en corriente para alimentar el actuador (motor) para que a través de su eje acoplado al del transductor de salida (otro potenciómetro) produzca un desplazamiento igual y exacto al aplicado en la entrada. Finalmente, dicho desplazamiento (θ_o) es una señal eléctrica que se lleva a comparar con la entrada, cerrando así el ciclo de control y conformando el denominado lazo de realimentación.

Un sistema de control de posición debe asegurar su exactitud en el seguimiento de la posición, su repetibilidad y su capacidad para autocorregirse. [3]

6.5.5.1 Sistema de control de posición hidráulico

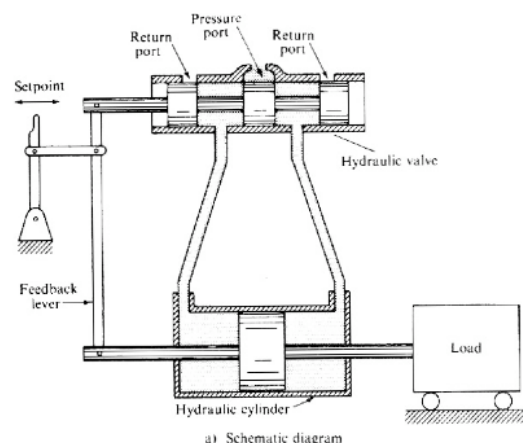


Figura 6.10 Sistema de control de posición hidráulico

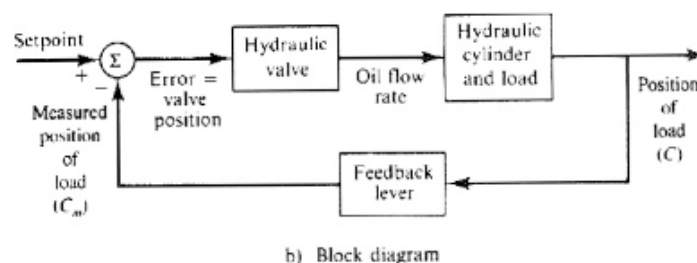


Figura 6.11

6.5.5.2 Sistema de control de posición utilizando un motor DC

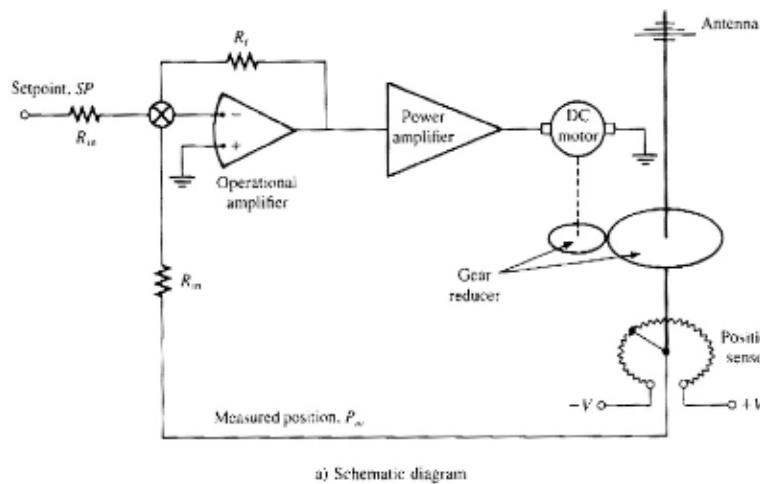


Figura 6.12 Control de posición

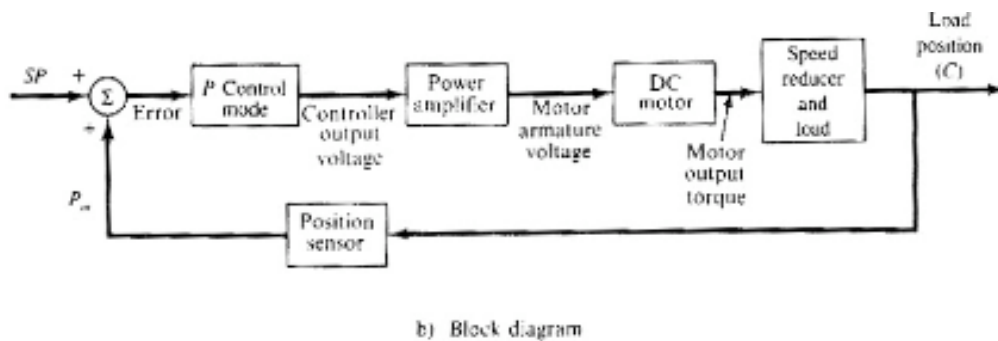


Figura 6.13

6.5.6 Sistema de control de velocidad

El principio del control realimentado de velocidad es similar al del control de posición, con la diferencia de que la salida es un valor de velocidad no un desplazamiento, y el elemento transductor de la realimentación un tacogenerador cuya salida es un voltaje proporcional V_s el cual se compara con el de referencia V_r y produce el voltaje de error V_e , relacionadas por la ecuación:

$$V_e = V_r - V_s$$

En operación la referencia es ajustada a un valor deseado de velocidad que en términos de voltaje es comparada con la salida, generando la señal de error, el cual gradualmente se reduce hasta que el sistema alcance la velocidad de régimen permanente fijada a la entrada.

Si el motor es cargado, la velocidad se cae, esto tiende a incrementar el error, incrementando a su vez la acción sobre el motor y así reducir la caída de velocidad. Esto implica realimentación negativa en el sistema.

Esencialmente el control realimentado de velocidad debe facilitar el ajuste inmediato y exacto de velocidad así mismo el de recuperar y corregir automáticamente el valor de referencia a posibles perturbaciones externas. [3]

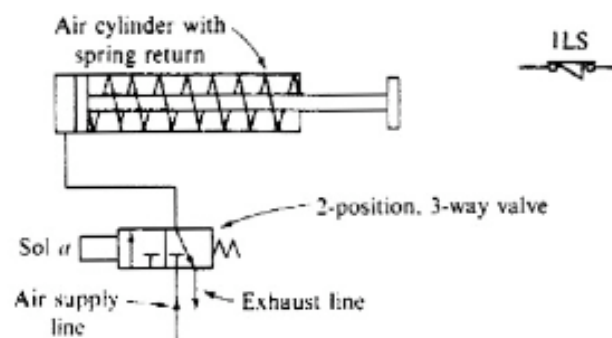
6.5.7 Control secuencial

Un sistema de control secuencial es aquel que realiza un conjunto de operaciones de una manera preestablecida. Ejemplos: lavadora automática o máquinas de lavado de coches.

Las operaciones en un sistema de control secuencial se pueden caracterizar de acuerdo al modo en que empiezan y terminan: [6]

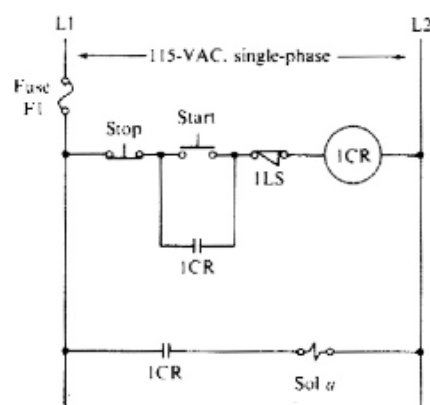
6.5.7.1 Guiado por sucesos (event driven): las operaciones se inician y terminan cuando sucede algo. [6]

Sistema de control para un cilindro neumático:



a) Schematic diagram

Figura 6.14



b) Electrical circuit diagram

Figura 6.15

6.5.7.2 Guiado por tiempo (time driven): las operaciones comienzan y terminan en un instante determinado de tiempo o cuando ha transcurrido cierto intervalo de tiempo. [6]

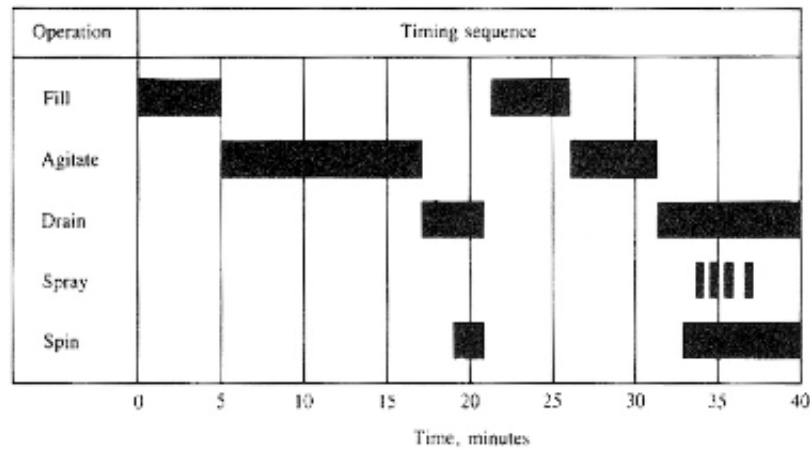


Figura 6.16 Diagrama de tiempos de una lavadora automática

6.5.8 Control numérico

Un sistema de control numérico es un sistema que utiliza unas instrucciones predeterminadas para controlar una secuencia de operaciones. Estas instrucciones son valores numéricos codificados que se almacenan en algún dispositivo de entrada: tarjetas perforadas, cintas magnéticas, o cualquier tipo de memorias utilizado para el almacenamiento de programas.

El control numérico es un tipo de automatización flexible debido a la relativa facilidad con la que se puede cambiar la programación. La misma máquina puede utilizarse para diferentes cosas sin más que cambiar el programa, por lo que los procesos de control numérico están más justificados cuando se quieren producir cosas distintas con una misma máquina.

El control numérico computarizado (CNC) fue desarrollado para aprovechar las capacidades de almacenamiento y procesamiento de los ordenadores.

Máquina de control numérico que utiliza un sistema de control en lazo cerrado para controlar las posiciones x, y, z: [6]

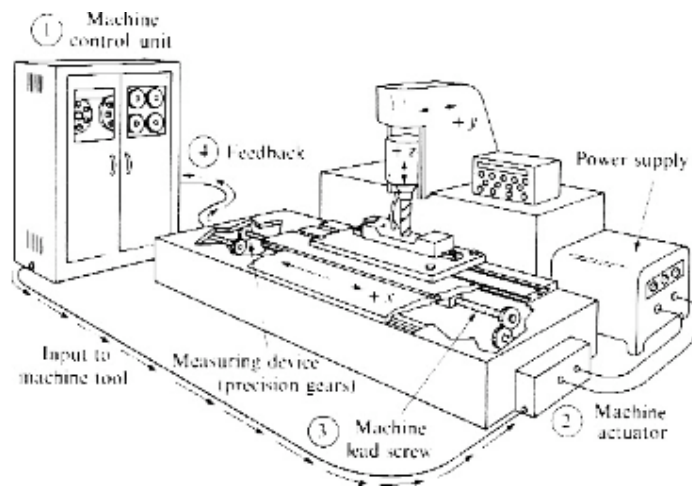


Figura 6.17

6.5.9 Regulador ON - OFF

Es la regulación más simple y económica, interesante en numerosas aplicaciones en las que puede admitirse una oscilación continua entre dos límites, siempre y cuando se trate de procesos de evolución lenta. Como ejemplos podemos citar la regulación de nivel, de presión o de temperatura, todos ellos problemas relativamente sencillos de lógica digital que no tratamos en este tema. Numerosos reguladores incorporan esta función básica, que además ofrece la máxima rapidez de respuesta y en ocasiones se recurre a este tipo de control cuando el error es grande, y se pasa de forma automática a otro tipo de regulación cuando el error se aproxima a cero.

En la siguiente figura se puede ver un diagrama de bloques y una representación de su funcionamiento: Gracias a la existencia de una histéresis (h), el número de conmutaciones se reduce notablemente. Sin histéresis, el accionador se activaría y desactivaría con demasiada frecuencia (gráfica con línea fina). La histéresis es como una oposición a experimentar cualquier cambio y generalmente será un efecto perjudicial, por ejemplo, al descender una temperatura después de haber alcanzado un máximo, el sensor pudiera mantener el mismo nivel de señal hasta que la temperatura real descienda más de 8 grados, por ejemplo. Sin embargo, este efecto no es perjudicial en el tipo de regulador que tratamos: Su respuesta es de tipo todo-nada, de forma que se conecta cuando la variable regulada ha descendido hasta un valor ($-U$) por debajo del punto de consigna " c " y solo se desconecta cuando llega a otro valor ($+U$) por encima del punto de consigna. Así se establece un margen de variación en el que mantiene su estado el actuador. [10]

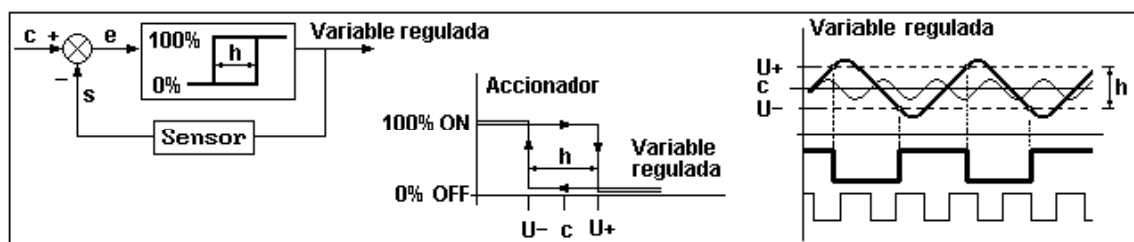


Figura 6.18

A continuación se muestra un ejemplo de controlador con histéresis que permite regular la temperatura de un horno entre dos valores: A la señal de consigna (5V) se le resta la tensión que existe entre los extremos de la resistencia variable con la temperatura NTC, dando una señal de error V_e . El controlador es simplemente el integrado 7414, que aplica la histéresis buscada. El 7407 es un buffer con salida en colector abierto que se encarga de controlar la corriente necesaria para alimentar el relé (puede sustituirse por un transistor como también vemos en la figura). El problema del 7414 es que la histéresis es fija, de modo que no permite ajustar el margen de temperaturas. Una solución a este problema consiste en hacer un montaje con operacional de forma que si modificamos el valor de las resistencias R_1 y/o R_2 se modifica el valor de la histéresis según las fórmulas indicadas.[10]

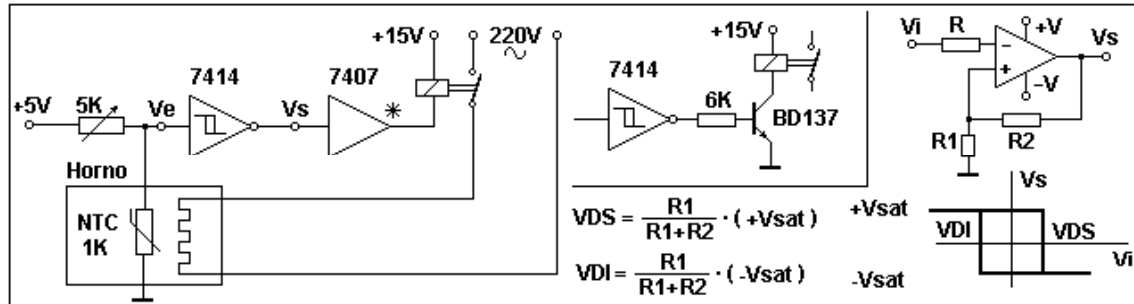


Figura 6.19

6.5.10 Autómatas programables

Empezaron a introducirse a mediados de los años 60 como aparatos de control estrictamente discreto (todo o nada). Cuando pudieron ser programados mediante el lenguaje de contactos ya existente en la lógica cableada, pronto dominaron el mercado. Sin embargo, los problemas más elaborados y los que requerían la manipulación de magnitudes analógicas, se dejaron para los tradicionales sistemas de control distribuido.

El siguiente paso fue configurar los autómatas para gestionar y tratar datos numéricos. Se añadieron entradas y salidas analógicas para poder leer información de sensores y transmitir órdenes a los actuadores. Fué relativamente sencillo incorporar como estándar el algoritmo de control PID a los autómatas mediante un módulo adicional, bien de tipo analógico, o bien digital con un procesador propio puesto que en ese momento un solo procesador no tenía suficiente velocidad de cálculo para realizar todas las funciones.

A finales de los años ochenta, algunos autómatas dejaron de utilizar un módulo adicional para funciones de regulación e incorporaron el PID como un mero algoritmo de cálculo existente únicamente en la memoria del aparato. Cuando se consiguieron tiempos de ejecución por debajo del milisegundo, los usuarios empezaron a concebir que un tiempo así de pequeño era despreciable comparado con la velocidad de la mayoría de los procesos.

Los autómatas se han implantado más en las industrias manufactureras, donde el control discreto es más abundante, pero no se excluye usar reguladores. En las industrias de procesos continuos priman los sistemas de control distribuido, con los reguladores al frente, pero tampoco se excluyen autómatas. En lo que se refiere a los

algoritmos de control, los autómatas disponen de lazos PID individuales: Quizás es en los algoritmos de control avanzados tales como lógica difusa, redes neuronales, avance/retroceso, ganancia adaptativa o compensación del tiempo muerto donde los reguladores industriales tienen más margen de maniobra y pueden adaptarse a cada situación en particular.[10]

6.5.11 Regulador PID.

El algoritmo de control más ampliamente extendido es el PID, pero existen muchos otros métodos que pueden dar un control de mayor calidad en ciertas situaciones donde el PID no responde a la perfección. El PID da buenos resultados en la inmensa mayoría de casos y tal vez es por esta razón que goza de tanta popularidad frente a otros reguladores teóricamente mejores. Los diseñadores de software de regulación pretenden que programar los nuevos sistemas de control sea tan fácil y familiar como el PID, lo que posibilitaría una transición sin dificultades.

Sea cual sea la tecnología de control, el error de regulación es la base a partir de la cual actúa el PID y se intuye que cuanto más precisa sea la medida, mejor se podrá controlar la variable en cuestión. Esta es la razón por la que el sensor es el elemento crítico del sistema. También se debe pensar en la instalación, especialmente en la forma en que se transmiten los datos del sensor hacia el regulador y posibles fuentes de interferencias.

Un regulador proporcional-integral-derivativo o PID tiene en cuenta el error, la integral del error y la derivada del error. La acción de control se calcula multiplicando los tres valores por una constante y sumando los resultados. Los valores de las constantes, que reciben el nombre de constante proporcional, integral y derivativa, definen el comportamiento del regulador.

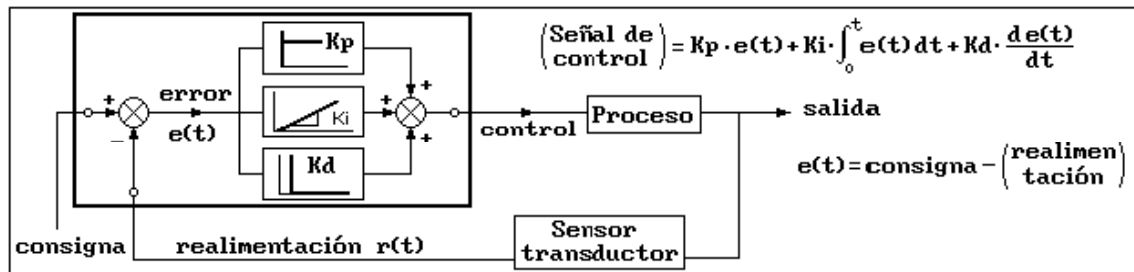


Figura 6.20

La acción proporcional hace que el PID responda enérgicamente cuando el error es grande, condición que aparentemente es necesaria y suficiente, pero no es así en la mayoría de los casos por dos razones fundamentales:

1.- Muchas veces la variable regulada aumenta o disminuye si no existe una acción que la mantenga invariable, por ejemplo un cuerpo desciende por gravedad, un fluido disminuye su nivel o presión si existe una vía de salida, un resorte tiende a adoptar la posición de mínima energía, etc. Cuando la variable se acerca al punto de consigna la acción proporcional se debilita y no vence la tendencia de la variable, alcanzando un reposo antes de lo previsto y por lo tanto manteniendo un error permanente.

2.- Aunque el error disminuye al aumentar la constante proporcional, no es correcto aumentar dicha acción todo lo necesario para conseguir un error muy pequeño, porque toda magnitud tiene cierta inercia a permanecer en su estado de reposo o de variación constante, responde desde el primer momento a la acción de control pero con cierto retraso o pereza, por ejemplo no podemos detener un móvil de forma instantánea, un motor no alcanza inmediatamente su velocidad nominal, etc. Si la acción proporcional es grande, la variable regulada se acercará al punto de consigna demasiado deprisa y será inevitable un sobrepasamiento.

Por la primera razón expuesta se deduce la conveniencia de añadir otra acción que responda si el error se mantiene a lo largo del tiempo, algo parecido a una memoria histórica que tenga en cuenta la evolución del error. Así actúa la acción integral, que se encarga de mantener una respuesta cuando el error se anula, gracias al error que existió en el tiempo ya pasado. Esta respuesta mantenida contrarresta la tendencia natural de la variable.

Por la segunda razón expuesta, se comprende la necesidad de añadir otra acción que contrarreste la inercia del proceso, frenándolo cuando evoluciona demasiado rápido y acelerándolo en caso contrario, algo parecido a una visión de futuro que se anticipa a lo que previsiblemente ocurrirá. Así actúa la acción derivativa, conocida también como anticipativa por ese motivo.

La parte problemática es la sintonización, es decir, dar valores a las constantes que representan las intensidades con las que actúan las tres acciones. La solución a este problema no es trivial puesto que depende de cómo responde el proceso a los esfuerzos que realiza el regulador para corregir el error.

Si se considera un proceso con un retraso considerable y el error varía rápidamente por un cambio en consigna o en carga (perturbaciones), el regulador reaccionará de inmediato, pero como el sistema responde lentamente, la acción integral empezará a tomar mucha importancia y cuando llegue al punto de consigna mantendrá una acción muy intensa basada en el error existente durante el tiempo de retraso y produciendo un rebasamiento. En los procesos con mucho retraso, la acción integral debe ser pequeña según esta consideración.

Si el proceso presenta poco retraso, el término integral tendrá poco peso respecto a las otras dos acciones porque los errores existen poco tiempo. En cambio, el término derivativo será de importancia porque el error varía con rapidez, debiendo utilizar una constante derivativa pequeña para evitar reacciones exageradas. [10]

6.5.12 Control multivariable

Se aplica cuando existen dos o más variables que están acopladas, o lo que es lo mismo, cuando la variación de una ejerce una variación en otra. Como ejemplo se puede citar la climatización de una sala en la cual es preciso controlar la temperatura y la humedad relativa del aire. Si la temperatura de la sala desciende, la humedad relativa sube, puesto que el aire está más frío. Por otra parte, si se introdujera vapor a la sala, no solo aumentaría la humedad, sino que también lo haría la temperatura.

El regulador que controla la inyección de vapor y el que controla la temperatura (por enfriamiento) debería integrarse para conseguir un objetivo común más que intentar controlar sus respectivas variables por separado. Con el algoritmo adecuado puede

lograrse no solo que los dos reguladores operen sin contradicciones, sino también minimizar el consumo energético o en general optimizar cualquier otra variable de que se disponga. Los controladores multivariable son más comunes en las industrias aeronáutica, energética y petroquímica. [10]

6.5.13 Control difuso

Otro tipo de control que está ganando adeptos es el control por lógica difusa (fuzzy control). Se trata de un control que se basa en la experiencia adquirida y actuar como lo haría una persona, es decir, con reglas empíricas. Este tipo de control no lineal está dando muy buenos resultados en procesos no lineales y de difícil modelización.

Si el problema de control es la falta de experiencia debido a que el proceso no se conoce a la perfección o la evolución de la variable a regular es complicada, se puede programar un control con lógica difusa con la ayuda de una red neuronal, que es el nombre que recibe un sistema un tanto complejo de aprendizaje, es decir, la red neuronal aprendería del sistema lo suficiente para informar al control con lógica difusa de cuáles son las reglas a usar en cada momento para obtener un buen control.[10]

6.5.14 Sistemas SCADA

Los paquetes SCADA son la solución más extendida para resolver el problema de la supervisión de una planta, incluyendo las intervenciones necesarias en caso de incidencias, por lo tanto, no se trata de un sistema de regulación propiamente dicho.

Supervisar lo que ocurre en una planta es una necesidad que ha venido resolviéndose mediante paneles estáticos con dibujos que representaban los objetos de la planta, añadiendo lámparas e indicadores que daban la sensación de dinamismo. Construir este tipo de paneles es muy costoso y los cambios en la planta suponen la mayoría de las veces tener que realizar otro panel nuevo y tirar el anterior.

Los programas de Supervisión, Control y Adquisición de Datos (SCADA) han venido a sustituir estos paneles por imágenes en la pantalla de un ordenador que puede diseñar el propio usuario para el proceso concreto y relacionar los objetos de las pantallas con los que realmente existen en la planta. Además de la supervisión de la planta, estos programas suelen tener otras muchas funciones:

- Gestión de señales de alarma y ejecución de acciones consecuentes, que pueden ir desde un simple aviso hasta la modificación del proceso o su parada automática.
- Control de la planta por la manipulación de los parámetros que utilizan los controladores digitales subordinados y que normalmente son autómatas programables conectados en red con el ordenador en el que corre el paquete SCADA. El éxito del control requiere un mapeo de señales adecuado, que consiste en vincular las variables de los controladores con las del programa SCADA.
- Recopilar información histórica del proceso, que resulta de gran utilidad para optimizarlo, predecir la aparición de alarmas, etc. Se utilizan para ello técnicas estadísticas.
- Presentar ayuda en pantalla sobre el proceso para los usuarios.

- Funciones de seguridad, como limitar el acceso a determinadas funciones para los usuarios no autorizados. [10]

6.5.15 Sistemas Distribuidos de Control (SDC)

Bajo esta denominación englobamos aquellos sistemas destinados al control de grandes o pequeñas plantas de procesos, fundamentalmente de tipo continuo (papeleras, cementeras, petroquímicas, energía, siderurgia...), con capacidad de llevar a cabo el control integral de la planta. Se caracterizan por un fuerte componente informático y una estructura jerarquizada.

A grandes rasgos, se constituyen por un conjunto de controladores y un computador central enlazados por un canal de comunicación muy rápido. Con esta descentralización del mando se repite lo que ocurrió hace muchos años en los talleres con la fuerza, cuando un motor muy grande transmitía el movimiento a todas las máquinas, consumiendo gran parte de potencia en las transmisiones y parando toda la producción cuando el motor tenía un fallo. La solución consistió en emplear un motor para cada máquina y aún para cada eje de la máquina. Igualmente los sistemas distribuidos de control han pasado a utilizar un controlador para uno o unos pocos lazos de regulación y han sustituido un basto sistema de comunicaciones por un único canal muy rápido.

Las ventajas que caracterizan a un SDC respecto a los sistemas anteriores son:

- Desarrollo de sistemas a base de módulos (en hardware y en software) que facilitan los cambios, el aislamiento y localización de averías, etc.
- Amplio abanico de algoritmos de regulación, seleccionables por menús.
- Redundancia en los equipos y en las comunicaciones. En las grandes instalaciones el coste del sistema de control no llega al 5% del de la instalación. Para evitar paradas que pueden suponer cuantiosas pérdidas se recurre a la duplicación de los sistemas de control y sistemas antifallo para que sea detectada rápidamente la procedencia de los fallos e informados los usuarios de las correcciones que deberán realizarse.
- Gran capacidad en comunicaciones, gracias a la constante superación en la velocidad de transmisión de datos.
- Fácil mantenimiento sustituyendo tarjetas y compatibilidad de nuevos equipos con los anteriores. [10]

6.6 Análisis de la respuesta transitoria

La respuesta transitoria constituye el hecho de que los sistemas que pueden almacenar energía no responden instantáneamente, y presentan estados transitorios cada vez que están sujetos a entradas o perturbaciones, hasta que alcanzan una situación estacionaria.

Un sistema de control se especifica en términos de dicha respuesta transitoria para una entrada escalón unitario, puesto que es fácil de generar, y si se conoce la respuesta al escalón, es matemáticamente posible calcular la respuesta para cualquier

entrada. La respuesta transitoria de un sistema para una entrada escalón unitario depende de las condiciones iniciales, usando en muchas ocasiones la condición inicial nula, para lo cual la salida y todas las derivadas con respecto al tiempo son cero, y el sistema se analiza con mayor facilidad, aunque es importante conocer el efecto de las condiciones iniciales sobre la respuesta del sistema.

Esta respuesta de un sistema de control práctico muestra con frecuencia oscilaciones amortiguadas antes de alcanzar el estado estacionario.

Para ello, presentamos a continuación los tipos de respuesta que puede presentar un sistema de segundo orden en lazo cerrado, a través del estudio de su función de transferencia, y de sus parámetros característicos como son la frecuencia natural no amortiguada (ω_n) y el coeficiente de amortiguamiento (ξ).

$$\frac{C}{R} = \frac{\omega_n^2}{s^2 - 2\zeta \cdot \omega_n \cdot s + \omega_n^2}$$

Siendo:

ω_n = frecuencia natural no amortiguada

ζ = relación de amortiguamiento (efectivo/crítico)

si: $0 < \zeta < 1 \Rightarrow$ sistema subamortiguado

$\zeta = 1 \Rightarrow$ sistema críticamente amortiguado

$\zeta > 1 \Rightarrow$ sistema sobreamortiguado

La función F tiene como parámetro ζ , variando entre 0.1 y 0.9.
La función G es válida cuando $\zeta = 0$.
La función H es válida cuando $\zeta = 1$.
La función I es válida cuando $\zeta = 2$.

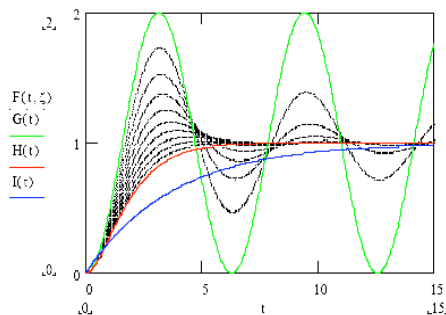


Figura 6.21 Respuesta transitoria.

A partir del estudio de dicha respuesta, según los gráficos obtenidos a partir de la variación del valor de ξ , podemos encontrar muchos parámetros a analizar, importantes de tener en cuenta en todo diseño de control, pues serán los que tendremos que tratar de corregir en función de nuestros objetivos. Esto lo realizaremos analizando en primer lugar si nuestro sistema es controlable (aunque como veremos más adelante casi todo el sistema son sensibles a ser controlables) y luego con el proceso de regulación con la asignación de ceros y polos, todo ello en el espacio de estado, en el cual estará centrado nuestro trabajo.

Excepto para ciertas aplicaciones en las que no se pueden tolerar oscilaciones, es conveniente que la respuesta transitoria sea suficientemente rápida y amortiguada. Por tanto, para una respuesta transitoria conveniente de un sistema de segundo orden, el factor de amortiguamiento relativo ξ debe estar entre 0.4 y 0.8; valores pequeños con una $\xi < 0.4$ producen un valor de sobreelongación excesivo de la respuesta transitoria, y un sistema con un valor de $\xi > 0.8$ nos responderá con lentitud. [2]

Dichos parámetros los podemos ver representados en la siguiente gráfica:

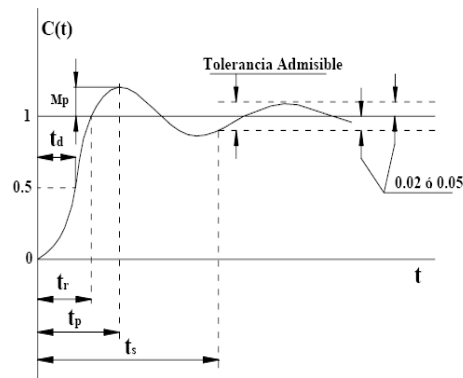


Figura 6.22 Respuesta transitoria conveniente.

Una explicación del significado de estos es:

NOMBRE	ABREVIATURA	SIGNIFICADO
Tiempo de retardo	t_d	Tiempo requerido para que la respuesta alcance la primera vez la mitad del valor final
Tiempo de subida de plantas	t_r	Tiempo necesario para que la respuesta pase del 10 al 90% de su valor final en sistemas sobreamortiguados, del 0 a 100% en sistemas subamortiguados de segundo orden
Tiempo de pico	t_p	Tiempo hasta que la respuesta alcanza el primer pico de sobreelongación
SobreeLONGACIÓN máxima	M_p	Máximo valor de pico de la curva de respuesta, medido a partir de la unidad
Tiempo de asentimiento	t_s	Tiempo que se requiere para que la curva de respuesta alcance un rango alrededor del valor final del tamaño especificado por el porcentaje de la tolerancia admisible

Tabla 6.1 Descripción de parámetros de la respuesta transitoria.

6.7 Reglas de sintonía de controladores PID

6.7.1 Control PID de plantas

La figura 6.23 muestra un control PID de una planta. Si se puede obtener un modelo matemático de la planta, es posible aplicar diversas técnicas de diseño con el fin de determinar los parámetros del controlador que cumpla las especificaciones del transitorio y del estacionario del sistema en lazo cerrado. Sin embargo, si la planta es tan complicada que no es fácil obtener su modelo matemático, tampoco es posible un método analítico para el diseño de un controlador PID. En este caso, se debe recurrir a procedimientos experimentales para la sintonía de los controladores PID.

El proceso de seleccionar los parámetros del controlador que cumplan con las especificaciones de comportamiento dadas se conoce como sintonía del controlador. Ziegler y Nichols surgieron reglas para sintonizar los controladores PID (esto significa dar valores a K_p , T_i y T_d) basándose en las respuestas escalón experimentales o en el valor de K_p que produce estabilidad marginal cuando solo se usa la acción de control proporcional. Las reglas de Ziegler – Nichols, que se presentan a continuación, son muy convenientes cuando no se conocen los modelos matemáticos de las plantas. (Por supuesto, estas reglas se pueden aplicar al diseño de sistemas con modelos matemáticos conocidos). Tales reglas sugieren un conjunto de valores K_p , T_i y T_d que dará una oración estable del sistema. No obstante, el sistema resultante puede presentar una gran sobreelongación en su respuesta escalón en forma que resulte no aceptable. En tales casos se necesitará una serie de ajustes finos hasta que se obtenga el resultado deseado.

De hecho, las reglas de sintonía de Ziegler – Nichols dan una estimación razonable de los parámetros del controlador y proporcionan un punto de partida para la sintonía fina, en lugar de dar los parámetros K_p , T_i y T_d en un único intento.[1]

6.7.2 Reglas de Ziegler-Nichols para sintonizar controladores PID

Ziegler y Nichols pusieron reglas para determinar los valores de la ganancia proporcional K_p , del tiempo integral T_i y del tiempo derivativo T_d , basándose en las características de respuesta transitoria de una planta dada. Tal determinación de los parámetros de los controladores PID o sintonía de controladores PID la pueden realizar los ingenieros mediante experimentos sobre la planta. (Después de la propuesta inicial de Ziegler-Nichols han aparecido numerosas reglas de sintonía de controladores PID. Estas reglas están disponibles tanto en publicaciones técnicas como de los fabricantes de estos controladores).

Hay dos métodos denominados reglas de sintonía de Ziegler-Nichols: el primero y el segundo método. A continuación se hace una breve presentación de estos dos métodos. [1]

6.7.2.1 Primer método

En el primer método, la respuesta de la planta en una entrada escalón unitario se obtiene de manera experimental, tal como se muestra en la figura 6.26. Si la planta no contiene integradores ni polos dominantes complejos conjugados, la curva de respuesta escalón unitario puede tener forma de S, como se observa en la figura 6.25.

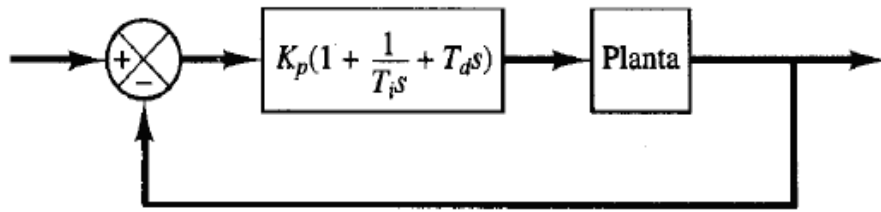


Figura 6.23 Control PID de una planta.

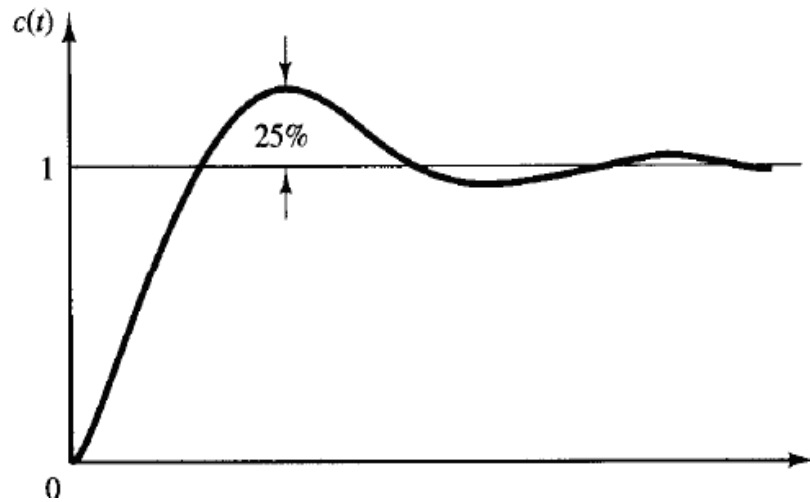


Figura 6.24 Curva de respuesta escalón unitario que muestra un sobrepaso máximo de 25%.

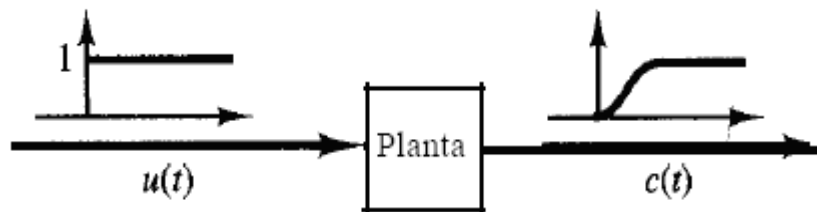


Figura 6.25 Respuesta escalón unitario de una planta.

Este método se puede aplicar si la respuesta muestra una curva en forma de s. Tales curvas de respuesta escalón se pueden generar experimentalmente o a partir de una simulación dinámica de la planta.

La curva con forma de s se caracteriza por dos parámetros: el tiempo de retardo L y la constante de tiempo T . El tiempo de retardo y la constante de tiempo se determinan dibujando una recta tangente en el punto de inflexión de la curva con forma de S y determinado las intersecciones de esta tangente con el eje del tiempo y con la línea $c(t) = K$, tal como se muestra en la figura 6.26.

En este caso, la función de transferencia $C(s) / U(s)$ se aproxima mediante un sistema de primer orden con retardo del modo siguiente:

$$\frac{C(s)}{U(s)} = \frac{Ke^{-Ls}}{Ts + 1}$$

Ziegler y Nichols sugirieron establecer los valores de K_p , T_i y T_d de acuerdo con la formula que se muestra en la Tabla 6.2.

Obsérvese que el controlador PID sintonizado mediante el primer método de las reglas de Ziegler-Nichols produce: [1]

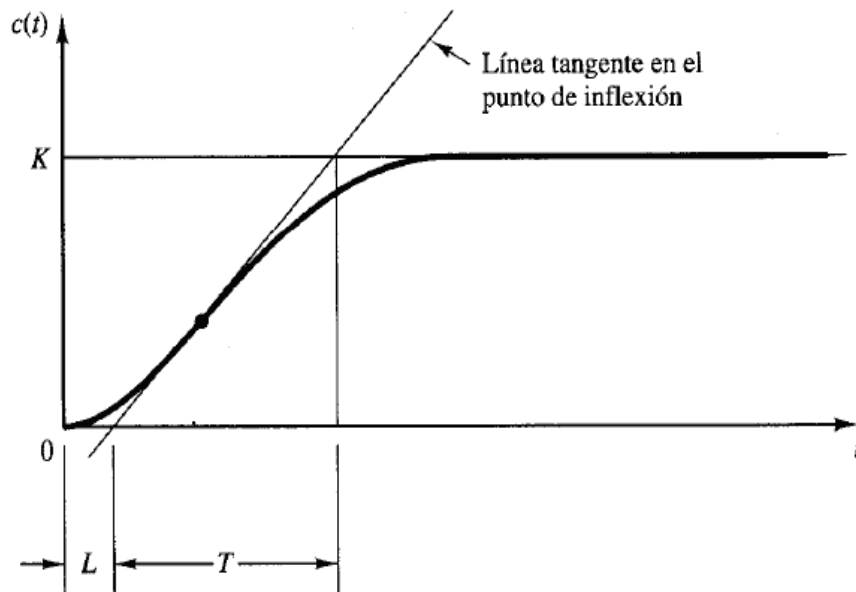


Figura 6.26 Curva de respuesta con forma de S.

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$\frac{T}{L}$	∞	0
PI	$0.9 \frac{T}{L}$	$\frac{L}{0.3}$	0
PID	$1.2 \frac{T}{L}$	$2L$	$0.5L$

Tabla 6.2 Regla de sintonización de Ziegler-Nichols basada en la respuesta escalón de la planta (primer método).

$$\begin{aligned}
 G_c(s) &= K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \\
 &= 1.2 \frac{T}{L} \left(1 + \frac{1}{2Ls} + 0.5Ls \right) \\
 &= 0.6T \frac{\left(s + \frac{1}{L} \right)^2}{s}
 \end{aligned}$$

Por tanto en controlador PID tiene un polo en el origen y un cero doble en $s = -1/L$.

6.7.2.2 Segundo método

En el segundo método, primero se fija $T_i = \infty$ y $T_d = 0$. Usando solo la acción de control proporcional (véase la figura 6.27), se incrementa K_p desde 0 hasta un valor crítico en K_{cr} en donde la salida presente oscilaciones sostenidas. (Si la salida no presenta oscilaciones para cualquier valor que pueda tomar K_p , entonces este método no se puede aplicar). Así, la ganancia crítica K_{cr} y el periodo P_{cr} correspondiente se determinan experimentalmente (véase la figura 6.28). Ziegler-Nichols sugirieron que se establecieran los valores de los parámetros K_p , T_i y T_d de acuerdo con la fórmula que se muestra en la Tabla 6.3.

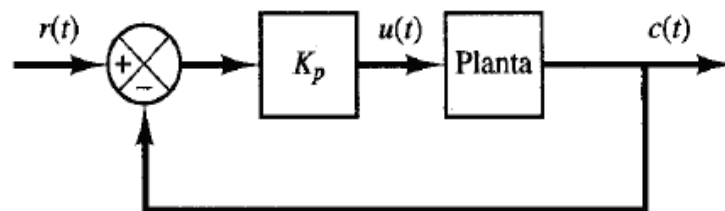


Figura 6.27 Sistema en lazo cerrado con controlador proporcional.

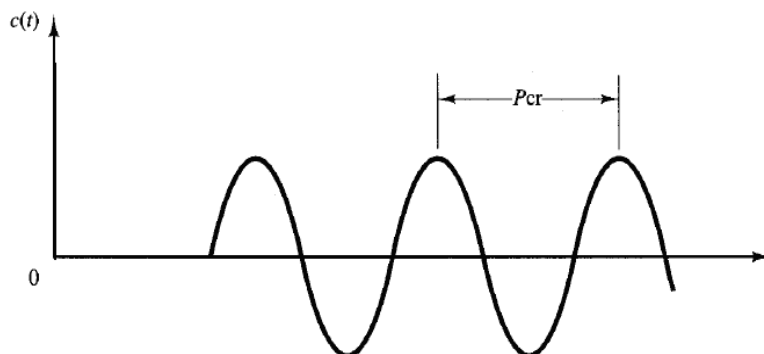


Figura 6.28 Oscilación sostenida con un periodo P_{cr} .

Tipo de controlador	K_p	T_i	T_d
P	$0.5K_{cr}$	∞	0
PI	$0.45K_{cr}$	$\frac{1}{1.2}P_{cr}$	0
PID	$0.6K_{cr}$	$0.5P_{cr}$	$0.125P_{cr}$

Tabla 6.3 Regla de sintonización de Ziegler-Nichols basada en la ganancia crítica R_{cr} y en el periodo crítico P_{cr} (segundo método).

Obsérvese que el controlador PID sintonizado mediante el segundo método de las reglas de Ziegler-Nichols produce:

$$\begin{aligned}
 G_I(s) &= K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \\
 &= 0.6K_{cr} \left(1 + \frac{1}{0.5P_{cr}s} + 0.125P_{cr}s \right) \\
 &= 0.075K_{cr}P_{cr} \frac{\left(s + \frac{4}{P_{cr}} \right)^2}{s}
 \end{aligned}$$

Por tanto, un controlador PID tiene un polo en el origen y un cero doble en $s = -4/P_{cr}$.

conviene darse cuenta de que, si el sistema tiene un modelo matemático conocido (como la función de transferencia), entonces se puede emplear el método del lugar de las raíces para encontrar la ganancia crítica K_{cr} y la frecuencia de las oscilaciones sostenidas ω_{cr} donde $2\pi / \omega_{cr} = P_{cr}$. Estos valores se pueden determinar a partir de los puntos de cruce de las ramas del lugar de las raíces con el eje $j\omega$. (Obviamente, si las ramas del lugar de las raíces no cortan al eje $j\omega$ este método no puede aplicarse). [1]

6.7.2.3 Comentarios

Las reglas de sintonía de Ziegler-Nichols (y otras reglas de sintonía que se presentan en la literatura) se han usado ampliamente para sintonizar controladores PID en sistemas de control de procesos en los que no se conoce con precisión la dinámica de la planta. Durante muchos años tales reglas de sintonía han demostrado ser muy útiles. Por supuesto, las reglas de sintonía de Ziegler-Nichols se pueden aplicar a

plantas cuya dinámica se conoce. (En estos casos, hay disponibles muchos métodos analíticos y gráficos para el diseño de controladores PID, además de las reglas de sintonía de Ziegler-Nichols). [1]

6.8 El amplificador operacional

El concepto original del AO (amplificador operacional) procede del campo de los computadores analógicos, en los que comenzaron a usarse técnicas operacionales en una época tan temprana como en los años 40. El nombre de amplificador operacional deriva del concepto de un amplificador DC (amplificador acoplado en continua) con una entrada diferencial y ganancia extremadamente alta, cuyas características de operación estaban determinadas por los elementos de realimentación utilizados. Cambiando los tipos y disposición de los elementos de realimentación, podían implementarse diferentes operaciones analógicas; en gran medida, las características globales del circuito estaban determinadas sólo por estos elementos de realimentación. De esta forma, el mismo amplificador era capaz de realizar diversas operaciones, y el desarrollo gradual de los amplificadores operacionales dio lugar al nacimiento de una nueva era en los conceptos de diseño de circuitos.

Los primeros amplificadores operacionales usaban el componente básico de su tiempo: la válvula de vacío. El uso generalizado de los AOs no comenzó realmente hasta los años 60, cuando empezaron a aplicarse las técnicas de estado sólido al diseño de circuitos amplificadores operacionales, fabricándose módulos que realizaban la circuitería interna del amplificador operacional mediante diseño discreto de estado sólido. Entonces, a mediados de los 60, se introdujeron los primeros amplificadores operacionales de circuito integrado. En unos pocos años los amplificadores operacionales integrados se convirtieron en una herramienta estándar de diseño, abarcando aplicaciones mucho más allá del ámbito original de los computadores analógicos.

Con la posibilidad de producción en masa que las técnicas de fabricación de circuitos integrados proporcionan, los amplificadores operacionales integrados estuvieron disponibles en grandes cantidades, lo que, a su vez contribuyó a rebajar su coste. Hoy en día el precio de un amplificador operacional integrado de propósito general, con una ganancia de 100 dB, una tensión offset de entrada de 1 mV, una corriente de entrada de 100 nA. Y un ancho de banda de 1 MHz. es inferior a 1 euro. El amplificador, que era un sistema formado antiguamente por muchos componentes discretos, ha evolucionado para convertirse en un componente discreto él mismo, una realidad que ha cambiado por completo el panorama del diseño de circuitos lineales.

6.8.1 Principios básicos de los amplificadores operacionales

6.8.1.1 El amplificador operacional ideal

Los fundamentos básicos del amplificador operacional ideal son relativamente fáciles. Quizás, lo mejor para entender el amplificador operacional ideal es olvidar todos los pensamientos convencionales sobre los componentes de los amplificadores, transistores, tubos u otros cualesquiera. En lugar de pensar en ellos, piensa en términos generales y considere el amplificador como una caja con sus terminales de entrada y salida. Trataremos, entonces, el amplificador en ese sentido ideal, e ignoraremos qué hay dentro de la caja.

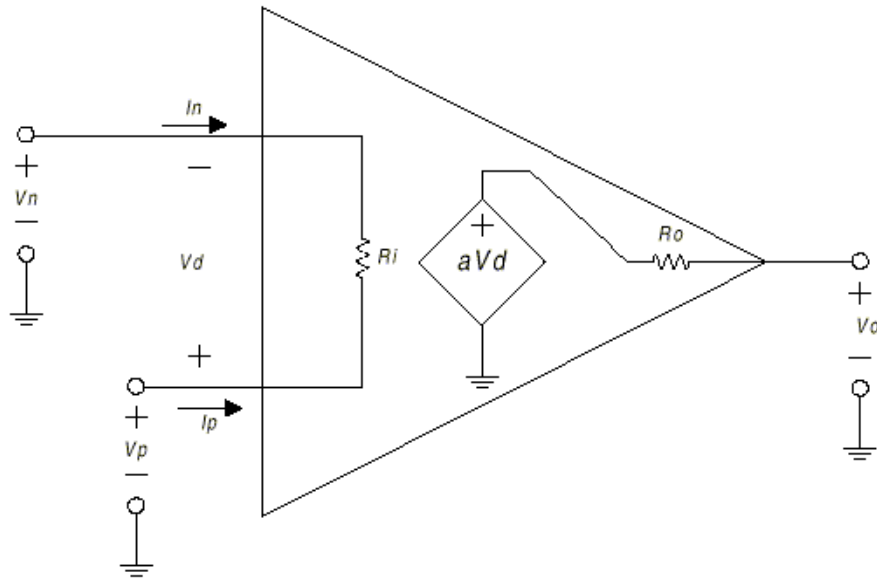


Figura 6.29 Amplificador ideal.

$$V_0 = a V_d$$

$$a = \text{infinito}$$

$$R_i = \text{infinito}$$

$$R_o = 0$$

$$\text{BW (ancho de banda)} = \text{infinito}$$

$$V_0 = 0 \text{ si } V_d = 0$$

En la figura 6.29 se muestra un amplificador idealizado. Es un dispositivo de acoplo directo con entrada diferencial, y un único terminal de salida. El amplificador sólo responde a la diferencia de tensión entre los dos terminales de entrada, no a su potencial común. Una señal positiva en la entrada inversora (-), produce una señal negativa a la salida, mientras que la misma señal en la entrada no inversora (+) produce una señal positiva en la salida. Con una tensión de entrada diferencial, V_d , la tensión de salida, V_o , será $a V_d$, donde a es la ganancia del amplificador. Ambos terminales de entrada del amplificador se utilizarán siempre independientemente de la aplicación. La señal de salida es de un sólo terminal y está referida a masa, por consiguiente, se utilizan tensiones de alimentación bipolares ($\pm$)

Teniendo en mente estas funciones de la entrada y salida, podemos definir ahora las propiedades del amplificador ideal. Son las siguientes:

1. La ganancia de tensión es infinita: $a = \infty$
2. La resistencia de entrada es infinita: $R_i = \infty$
3. La resistencia de salida es cero: $R_o = 0$
4. El ancho de banda es infinito: $\text{BW} = \infty$
5. La tensión offset de entrada es cero: $V_0 = 0 \text{ si } V_d = 0$

A partir de estas características del AO, podemos deducir otras dos importantes propiedades adicionales. Puesto que, la ganancia en tensión es infinita, cualquier señal de salida que se desarrolle será el resultado de una señal de entrada infinitesimalmente pequeña.

A partir de estas características del AO, podemos deducir otras dos importantes propiedades adicionales. Puesto que, la ganancia en tensión es infinita, cualquier señal de salida que se desarrolle será el resultado de una señal de entrada infinitesimalmente pequeña. Luego, en resumen:

- La tensión de entrada diferencial es nula.
- También, si la resistencia de entrada es infinita. No existe flujo de corriente en ninguno de los terminales de entrada

Estas dos propiedades pueden considerarse como axiomas, y se emplearán repetidamente en el análisis y diseño del circuito del AO. Una vez entendidas estas propiedades, se puede, lógicamente, deducir el funcionamiento de casi todos los circuitos amplificadores operacionales.

6.8.1.2 Configuraciones básicas del amplificador operacional

Los amplificadores operacionales se pueden conectar según dos circuitos amplificadores básicos: las configuraciones (1) inversora y (2) no inversora. Casi todos los demás circuitos con amplificadores operacionales están basados, de alguna forma, en estas dos configuraciones básicas. Además, existen variaciones estrechamente relacionadas de estos dos circuitos, más otro circuito básico que es una combinación de los dos primeros: el amplificador diferencial.

6.8.1.2.1 El amplificador inversor

La figura 6.30 ilustra la primera configuración básica del AO. El amplificador inversor. En este circuito, la entrada (+) está a masa, y la señal se aplica a la entrada (-) a través de R_1 , con realimentación desde la salida a través de R_2 .

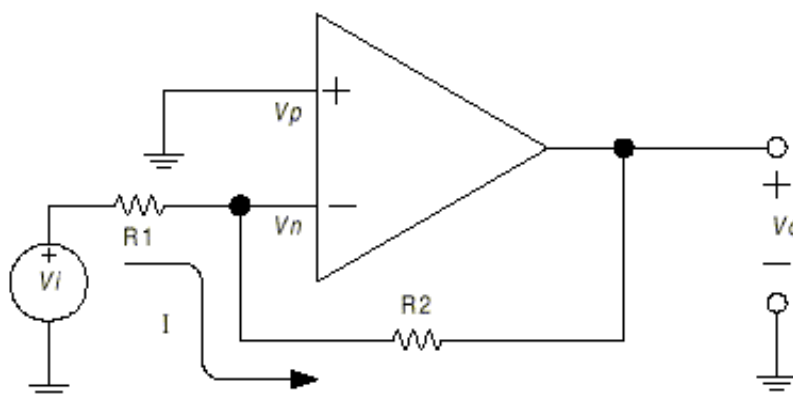


Figura 6.30 Configuración básica de un AO.

Aplicando las propiedades anteriormente establecidas del AO ideal, las características distintivas de este circuito se pueden analizar como sigue.

Puesto que el amplificador tiene ganancia infinita, desarrollará su tensión de salida, V_0 , con tensión de entrada nula. Ya que, la entrada diferencial de A es:

$$V_d = V_p - V_n, \Rightarrow V_d = 0. \text{ Y si } V_d = 0,$$

Entonces toda la tensión de entrada V_i , deberá aparecer en R_1 , obteniendo una corriente en R_1

$$I = \frac{V_i}{R_1}$$

V_n está a un potencial cero, es un punto de tierra virtual

Toda la corriente I que circula por R_1 pasará por R_2 , puesto que no se derivará ninguna corriente hacia la entrada del operacional (Impedancia infinita), así pues el producto de I por R_2 será igual a $-V_0$

$$I = -\frac{V_0}{R_2}$$

$$\frac{V_i}{R_1} = -\frac{V_0}{R_2}$$

Por lo que:

$$V_0 = -\frac{R_2}{R_1} \cdot V_i$$

Luego la ganancia del amplificador inversor:

$$\frac{V_0}{V_i} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Deben observarse otras propiedades adicionales del amplificador inversor ideal. La ganancia se puede variar ajustando bien R_1 , o bien R_2 . Si R_2 varía desde cero hasta infinito, la ganancia variará también desde cero hasta infinito, puesto que es directamente proporcional a R_2 . La impedancia de entrada es igual a R_1 , y V_i y R_1 únicamente determinan la corriente I , por lo que la corriente que circula por R_2 es siempre I , para cualquier valor de dicha R_2 .

La entrada del amplificador, o el punto de conexión de la entrada y las señales de realimentación, es un nudo de tensión nula, independientemente de la corriente I . Luego, esta conexión es un punto de tierra virtual, un punto en el que siempre habrá el

mismo potencial que en la entrada (+). Por tanto, este punto en el que se suman las señales de salida y entrada, se conoce también como nudo suma. Esta última característica conduce al tercer axioma básico de los amplificadores operacionales, el cual se aplica a la operación en bucle cerrado:

En bucle cerrado, la entrada (-) será regulada al potencial de entrada (+) o de referencia.

Esta propiedad puede aún ser o no ser obvia, a partir de la teoría de tensión de entrada de diferencial nula. Es, sin embargo, muy útil para entender el circuito del AO, ver la entrada (+) como un terminal de referencia, el cual controlará el nivel que ambas entradas asumen. Luego esta tensión puede ser masa (como en la figura 2), o cualquier potencial que se desee.

6.8.1.2.2 El amplificador no inversor

La segunda configuración básica del AO ideal es el amplificador no inversor, mostrado en la figura 6.31 Este circuito ilustra claramente la validez del axioma 3.

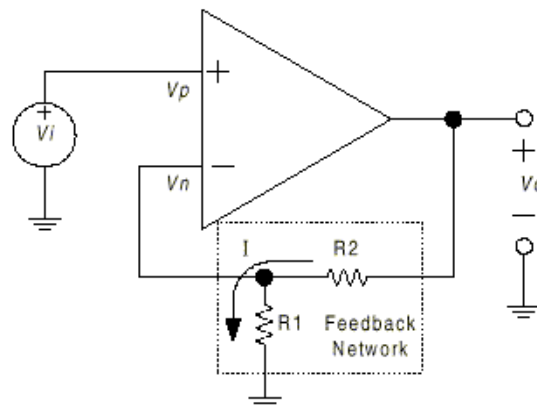


Figura 6.31 Amplificador no inversor.

En este circuito, la tensión V_i se aplica a la entrada (+), y una fracción de la señal de salida, V_o , se aplica a la entrada (-) a través del divisor de tensión $R_1 - R_2$. Puesto que, no fluye corriente de entrada en ningún terminal de entrada, y ya que $V_d = 0$, la tensión en R_1 será igual a V_i .

Así pues

$$V_i = I \cdot R_1$$

Y como

$$V_o = I \cdot (R_1 + R_2)$$

Tendremos pues que:

$$V_0 = \frac{V_i}{R_1} \cdot (R_1 + R_2)$$

Que si lo expresamos en términos de ganancia:

$$\frac{V_0}{V_i} = \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

Que es la ecuación característica de ganancia para el amplificador no inversor ideal.

También se pueden deducir propiedades adicionales para esta configuración. El límite inferior de ganancia se produce cuando $R_2 = 0$, lo que da lugar a una ganancia unidad.

En el amplificador inversor, la corriente a través de R_1 siempre determina la corriente a través de R_2 , independientemente del valor de R_2 , esto también es cierto en el amplificador no inversor. Luego R_2 puede utilizarse como un control de ganancia lineal, capaz de incrementar la ganancia desde el mínimo unidad hasta un máximo de infinito. La impedancia de entrada es infinita, puesto que se trata de un amplificador ideal.

6.8.1.3 Configuraciones basadas en los circuitos inversor y no inversor

6.8.1.3.1 El amplificador diferencial

Una tercera configuración del AO conocida como el amplificador diferencial, es una combinación de las dos configuraciones anteriores. Aunque está basado en los otros dos circuitos, el amplificador diferencial tiene características únicas. Este circuito, mostrado en la figura 6.32, tiene aplicadas señales en ambos terminales de entrada, y utiliza la amplificación diferencial natural del amplificador operacional.

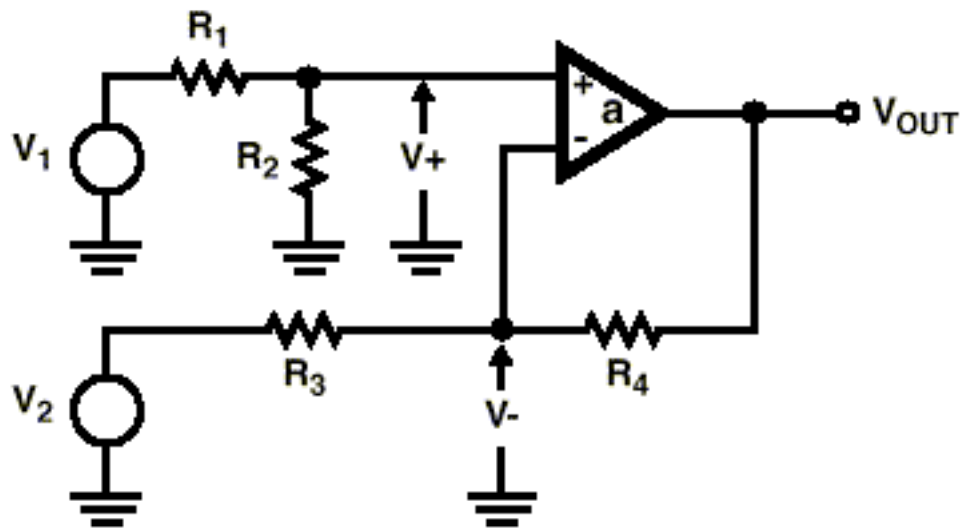


Figura 6.32 Amplificador diferencial.

Para comprender el circuito, primero se estudiarán las dos señales de entrada por separado, y después combinadas. Como siempre $V_d = 0$ y la corriente de entrada en los terminales es cero.

Recordar que $V_d = V(+)-V(-) \implies V(-) = V(+)$

La tensión a la salida debida a V_1 la llamaremos V_{01}

$$V(+)=\frac{V_1}{R_1+R_2}\cdot R_2$$

Y como $V(-)=V(+)$

$$V_{01}=\frac{V_1\cdot R_2}{R_1+R_2}\cdot\frac{R_3+R_4}{R_3}$$

La tensión de salida debida a V_1 (suponiendo $V_2 = 0$) valdrá:

$$V_{02}=-V_2\frac{R_4}{R_3}$$

Y la salida debida a V_2 (suponiendo $V_1 = 0$) será, usando la ecuación de la ganancia para el circuito inversor, V_{02}

Y dado que, aplicando el teorema de la superposición la tensión de salida $V_0 = V_{01} + V_{02}$ y haciendo que R_3 sea igual a R_1 y R_4 igual a R_2 tendremos que:

$$V_{01} = \frac{V_1 \cdot R_2}{R_1}$$

$$V_{02} = -V_2 \frac{R_2}{R_1}$$

Por lo que concluiremos

$$V_0 = (V_1 - V_2) \cdot \frac{R_2}{R_1}$$

Que expresando en términos de ganancia:

$$\frac{V_0}{V_1 - V_2} = \frac{R_2}{R_1}$$

Que es la ganancia de la etapa para señales en modo diferencial

Esta configuración es única porque puede rechazar una señal común a ambas entradas. Esto se debe a la propiedad de tensión de entrada diferencial nula, que se explica a continuación.

En el caso de que las señales V_1 y V_2 sean idénticas, el análisis es sencillo. V_1 se dividirá entre R_1 y R_2 , apareciendo una menor tensión $V(+)$ en R_2 . Debido a la ganancia infinita del amplificador, y a la tensión de entrada diferencial cero, una tensión igual $V(-)$ debe aparecer en el nudo suma (-). Puesto que la red de resistencias R_3 y R_4 es igual a la red R_1 y R_2 , y se aplica la misma tensión a ambos terminales de entrada, se concluye que V_0 debe estar a potencial nulo para que $V(-)$ se mantenga igual a $V(+)$; V_0 estará al mismo potencial que R_2 , el cual, de hecho está a masa. Esta muy útil propiedad del amplificador diferencial, puede utilizarse para discriminar componentes de ruido en modo común no deseables, mientras que se amplifican las señales que aparecen de forma diferencial. Si se cumple la relación

$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}$$

La ganancia para señales en modo común es cero, puesto que, por definición, el amplificador no tiene ganancia cuando se aplican señales iguales a ambas entradas.

Las dos impedancias de entrada de la etapa son distintas. Para la entrada (+), la impedancia de entrada es $R_1 + R_2$. La impedancia para la entrada (-) es R_3 . La impedancia de entrada diferencial (para una fuente flotante) es la impedancia entre las entradas, es decir, $R_1 + R_3$.

6.8.1.3.2 El sumador inversor

Utilizando la característica de tierra virtual en el nudo suma (-) del amplificador inversor, se obtiene una útil modificación, el sumador inversor, figura 6.33.

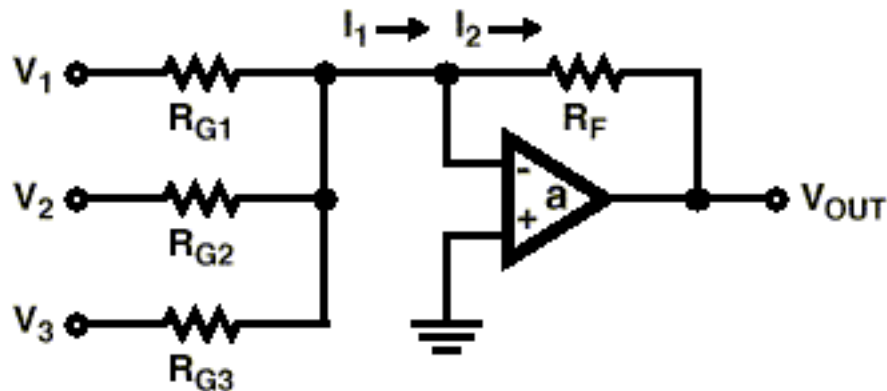


Figura 6.33 Amplificador sumador inversor.

En este circuito, como en el amplificador inversor, la tensión $V(+)$ está conectada a masa, por lo que la tensión $V(-)$ estará a una masa virtual, y como la impedancia de entrada es infinita toda la corriente I_1 circulará a través de R_F y la llamaremos I_2 . Lo que ocurre en este caso es que la corriente I_1 es la suma algebraica de las corrientes proporcionadas por V_1 , V_2 y V_3 , es decir:

$$I_1 = \frac{V_1}{R_{G1}} + \frac{V_2}{R_{G2}} + \frac{V_3}{R_{G3}}$$

Y también

$$I_2 = - \frac{V_{OUT}}{R_F}$$

Como $I_1 = I_2$ concluiremos que:

$$I_2 = - \frac{V_{OUT}}{R_F}$$

Que establece que la tensión de salida es la suma algebraica invertida de las tensiones de entrada multiplicadas por un factor corrector, que el alumno puede observar que en el caso en que $R_F = R_{G1} = R_{G2} = R_{G3} \Rightarrow V_{OUT} = -(V_1 + V_2 + V_3)$

La ganancia global del circuito la establece R_F , la cual, en este sentido, se comporta como en el amplificador inversor básico. A las ganancias de los canales individuales se les aplica independientemente los factores de escala R_{G1} , R_{G2} , R_{G3} ,... étc. Del mismo modo, R_{G1} , R_{G2} y R_{G3} son las impedancias de entrada de los respectivos canales.

Otra característica interesante de esta configuración es el hecho de que la mezcla de señales lineales, en el nodo suma, no produce interacción entre las entradas, puesto que todas las fuentes de señal alimentan el punto de tierra virtual. El circuito puede acomodar cualquier número de entradas añadiendo resistencias de entrada adicionales en el nodo suma.

Aunque los circuitos precedentes se han descrito en términos de entrada y de resistencias de realimentación, las resistencias se pueden reemplazar por elementos complejos, y los axiomas de los amplificadores operacionales se mantendrán como verdaderos. Dos circuitos que demuestran esto, son dos nuevas modificaciones del amplificador inversor.

6.8.1.3.3 El integrador

Se ha visto que ambas configuraciones básicas del AO actúan para mantener constantemente la corriente de realimentación, I_F igual a I_{IN} .

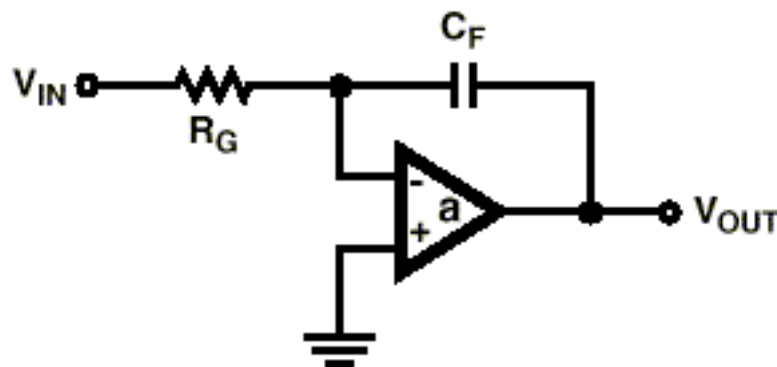


Figura 6.34 Amplificador integrador.

Una modificación del amplificador inversor, el integrador, mostrado en la figura 6.34, se aprovecha de esta característica. Se aplica una tensión de entrada V_{IN} , a R_G , lo que da lugar a una corriente I_{IN} .

Como ocurría en el amplificador inversor, $V(-) = 0$, puesto que $V(+) = 0$, y por tener impedancia infinita toda la corriente de entrada I_{IN} pasa hacia el condensador C_F , llamaremos a esta corriente I_F .

El elemento realimentador en el integrador es el condensador C_F . Por consiguiente, la corriente constante I_F , en C_F da lugar a una rampa lineal de tensión. La tensión de salida es, por tanto, la integral de la corriente de entrada, que es forzada a cargar C_F por el lazo de realimentación.

La variación de tensión en C_F es

$$-\Delta V_{OUT} = \frac{I_{IN} \cdot \Delta t}{C_F}$$

Lo que hace que la salida varíe por unidad de tiempo según:

$$\frac{\Delta V_{OUT}}{\Delta t} = \frac{-V_{IN}}{R_G \cdot C_F}$$

Como en otras configuraciones del amplificador inversor, la impedancia de entrada es simplemente R_G

Obsérvese el siguiente diagrama de señales para este circuito

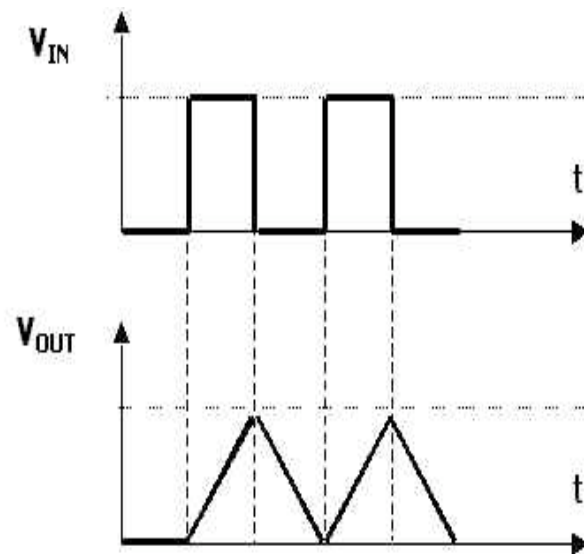


Figura 6.35 Señal triangular resultante.

Por supuesto la rampa dependerá de los valores de la señal de entrada, de la resistencia y del condensador.

6.8.1.3.4 El diferenciador o derivador

Una segunda modificación del amplificador inversor, que también aprovecha la corriente en un condensador es el diferenciador mostrado en la figura 6.36.

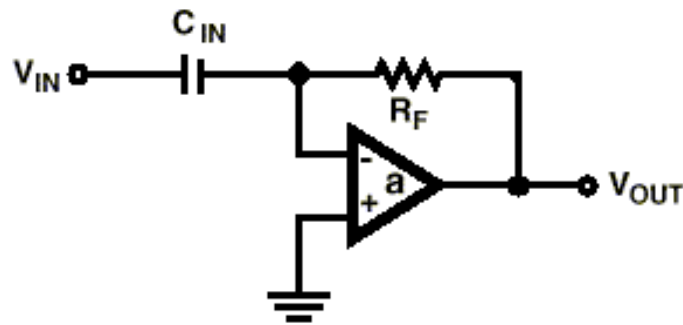


Figura 6.36 Amplificador diferenciador.

En este circuito, la posición de R y C están al revés que en el integrador, estando el elemento capacitativo en la red de entrada. Luego la corriente de entrada obtenida es proporcional a la tasa de variación de la tensión de entrada:

$$\Delta I_{IN} = \frac{V_{IN} \cdot C_{IN}}{\Delta t}$$

De nuevo diremos que la corriente de entrada I_{IN} , circulará por R_F , por lo que $I_F = I_{IN}$

Y puesto que $V_{OUT} = - I_F R_F$ Sustituyendo obtenemos

$$V_{OUT} = \frac{- \Delta V_{IN} \cdot R_F \cdot C_{IN}}{\Delta t}$$

Obsérvese el siguiente diagrama de señales para este circuito

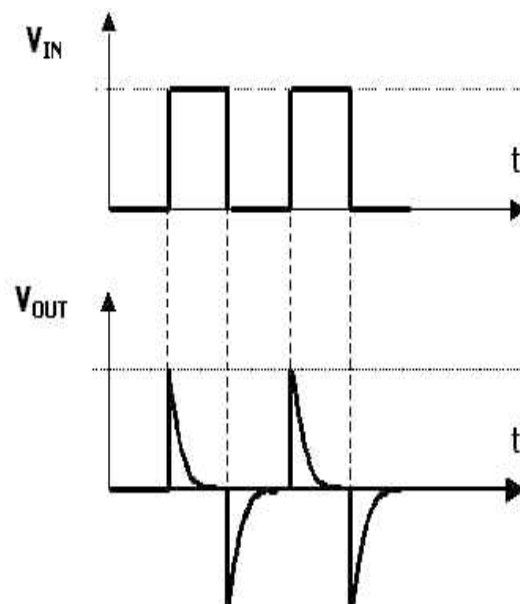


Figura 6.37 Señal a la salida de diferenciador.

6.8.1.3.5 El seguidor de tensión

Una modificación especial del amplificador no inversor es la etapa de ganancia unidad mostrada en la figura 6.38

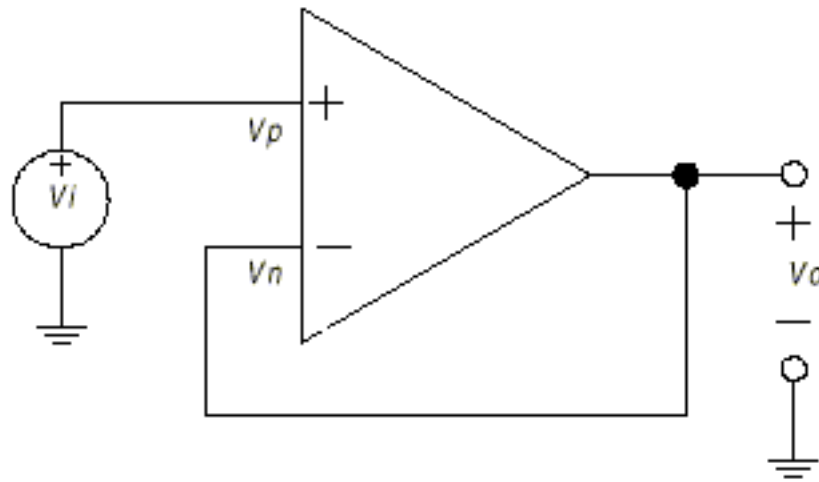


Figura 6.38 Seguidor de tensión.

En este circuito, la resistencia de entrada se ha incrementado hasta infinito, y R_F es cero, y la realimentación es del 100%. V_o es entonces exactamente igual a V_i , dado que $E_s = 0$. El circuito se conoce como "seguidor de emisor" puesto que la salida es una réplica en fase con ganancia unidad de la tensión de entrada. La impedancia de entrada de esta etapa es también infinita.

6.8.1.4 Resumen de las configuraciones básicas del amplificador y sus características

Todas las características de los circuitos que se han descrito son importantes, puesto que, son las bases para la completa fundamentación de la tecnología de los circuitos amplificadores operacionales. Los cinco criterios básicos que describen al amplificador ideal son fundamentales, y a partir de estos se desarrollan los tres principales axiomas de la teoría de los amplificadores operacionales, los cuales repetimos aquí:

- 1.- La tensión de entrada diferencial es nula
- 2.- No existe flujo de corriente en ninguno de los terminales de entrada
- 3.- En bucle cerrado, la entrada (-) será regulada al potencial de entrada (+) o de referencia.

Estos tres axiomas se han ilustrado en todos los circuitos básicos y sus variaciones. En la configuración inversora, los conceptos de corriente de entrada nula, y tensión de entrada diferencial cero, dan origen a los conceptos de nudo suma y tierra virtual, donde la entrada inversora se mantiene por realimentación al mismo potencial que la entrada no inversora a masa. Usando el concepto de la entrada no inversora como terminal de referencia, el amplificador no inversor y el seguidor de emisor ilustran

como una tensión de entrada es indirectamente multiplicada a través de una realimentación negativa en la entrada inversora, la cual es forzada a seguir con un potencial idéntico. La configuración diferencial combina estos conceptos, ilustrando el ideal de la simultaneidad de la amplificación diferencial y del rechazo de la señal en modo común. Las variaciones del inversor ponen de nuevo de manifiesto los principios básicos. En todos estos circuitos, hemos visto también cómo el funcionamiento está solamente determinado por los componentes conectados externamente al amplificador.

Hasta este momento, hemos definido el AO en sentido ideal y hemos examinado sus configuraciones básicas. Con una definición adicional, la simbología del dispositivo, llegaremos al mundo real de los dispositivos prácticos, examinaremos sus desviaciones respecto al ideal, y veremos cómo superarlas.

6.8.2 Símbolo esquemático del amplificador operacional estándar y su uso.

Una herramienta adicional básica del AO es su símbolo esquemático. Este es fundamental, dado que un esquema correctamente dibujado nos dice mucho sobre las funciones de un circuito. El símbolo más usado se muestra en la figura 9 con algunas aclaraciones anotadas.

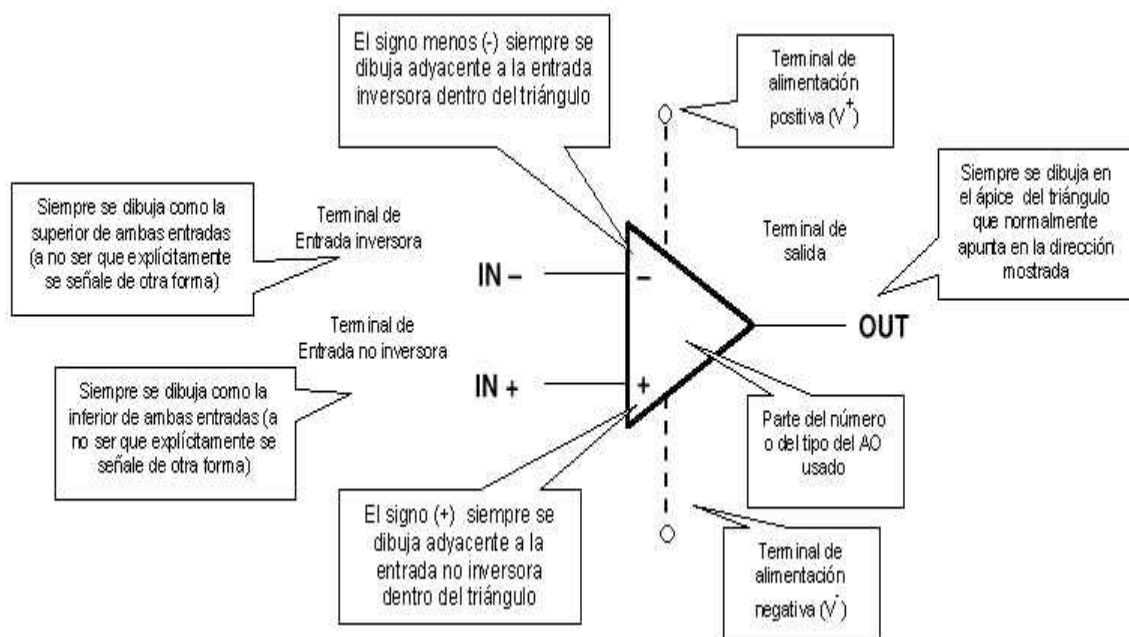


Figura 6.39 Símbolo esquemático del AO.

El símbolo básico es un triángulo, el cual generalmente presupone amplificación. Las entradas están en la base del triángulo, y la salida en el ápice. De acuerdo con el convenio normal del flujo de señal, el símbolo se dibuja con el ápice (salida) a la derecha, pero puede alterarse si es necesario para clarificar otros detalles del circuito.

Usualmente, las dos entradas se dibujan como se indica en la figura; la entrada no inversora (+) es la inferior de las dos. Excepciones a esta regla se producen en circunstancias especiales, en las que podría ser difícil mantener el convenio estándar. Además, las dos entradas están claramente identificadas por los símbolos (+) y (-), los

cuales se sitúan adyacentes a sus respectivos terminales dentro del cuerpo del triángulo.

Como se ve, los terminales de las tensiones de alimentación se dibujan, preferiblemente, por encima y debajo del triángulo. Estos pueden no ser mostrados en todos los casos (en favor de la simplicidad) pero siempre están implícitos. Generalmente, en croquis, basta con usar el símbolo de tres terminales para dar a entender el significado, sobreentendiendo las conexiones de alimentación.

Finalmente, el tipo o número del dispositivo utilizado se sitúa centrado en el interior del triángulo. Si el circuito es uno general, indicativo de un amplificador operacional cualquiera, se usa el símbolo A (o A1, A2, etc.).[9]

6.9 Multiplexores analógicos

6.9.1 Estructura y Utilización

El multiplexor analógico está constituido por una serie de entradas/salidas conectadas a una línea común de entrada/salida. Unas entradas de selección determinan cuál es la entrada que se conectará a la salida.

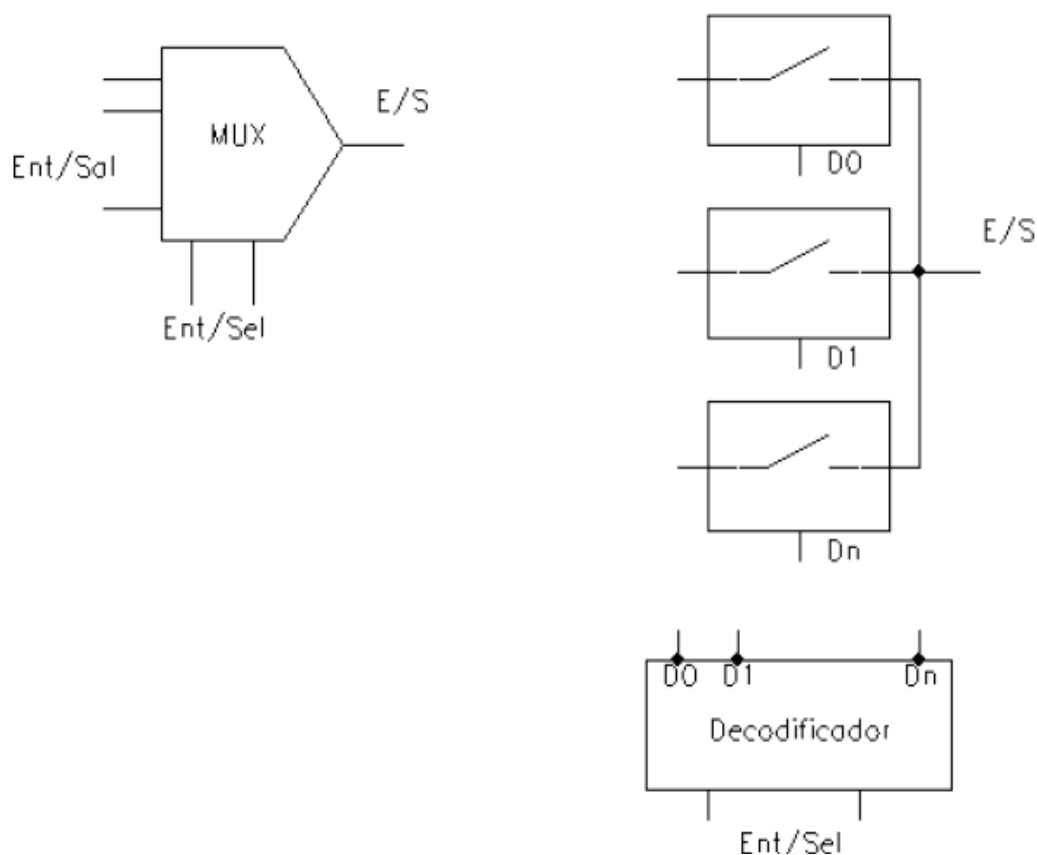


Figura 6.40 Diagrama básico de un multiplexor

Desde el punto de vista interno el multiplexor está formado por un conjunto de interruptores analógicos, de tal manera que en cada instante sólo uno de ellos puede estar cerrado.

Las entradas de selección actúan sobre un decodificador digital, cuyas salidas rigen los diferentes interruptores analógicos, de tal forma que en cada momento eligen el interruptor que debe ser cerrado. La principal ventaja que presentan los multiplexores analógicos, frente a los digitales, es su carácter bidireccional, lo que le permite que cada terminal del multiplexor sea posible usarlo como entrada o como salida y el manejo de señales analógicas en vez de digitales.

Estudiaremos el multiplexor desde dos puntos de vista: por un lado lo veremos como un elemento del circuito, es decir, como un dispositivo ideal, y por otro, como un elemento real caracterizado por una serie de parámetros.

Desde el punto de vista ideal, diremos que si el multiplexor dispone de n entradas de selección podrá disponer de hasta $2n$ canales de entrada. La mayoría de los multiplexores comerciales son de cuatro u ocho canales, es decir, de dos o tres entradas de selección.

El principal problema que se nos plantea al utilizar un multiplexor es el de determinar el número de entradas del mismo. En general, dispondremos de diferentes señales procedentes de distintos sensores que a través del multiplexor deben alcanzar el amplificador operacional correspondiente del sistema de adquisición de datos.

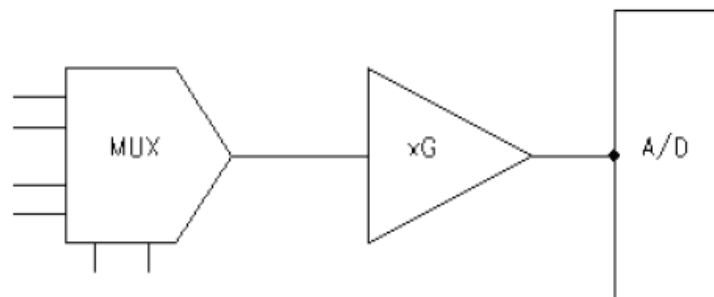


Figura 6.41 Sistema de adquisición de datos.

Lo que ocurre es que en estos tipos de sistemas se utilizan muchas señales diferenciales, que requieren dos hilos. Esto nos lleva a necesitar dos hilos de entrada, para cada señal de este tipo, y dos salidas en total, lo cual hace que utilizemos dos multiplexores en la forma.

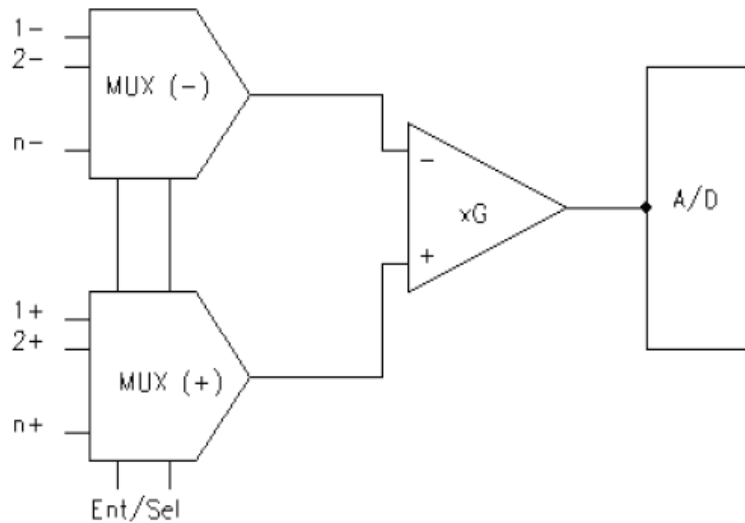


Figura 6.42

Al conjunto formado por los dos multiplexores se le da el nombre de multiplexor diferencial, como se observa en uno de ellos se colocan las entradas - de las señales, mientras que en el otro, y con el mismo orden, se colocan las entradas + de esas mismas señales. De esta forma, al tener comunes las entradas de selección, para una combinación dada de estas entradas, llegarán al amplificador operacional los dos hilos que contienen a la señal elegida. En la mayoría de los circuitos comerciales vienen integrados dos multiplexores, de manera que resulta fácil realizar este montaje, siempre y cuando el número de canales deseados no sea muy alto.

Si los sensores se encuentran alejados del multiplexor, es conveniente enviar la señal en intensidad. Para convertir ésta en tensión se suele colocar una resistencia entre los dos terminales de entrada con el fin de que produzca una diferencia de potencial entre los extremos de la resistencia.

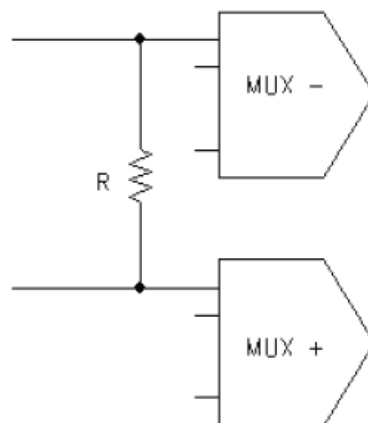


Figura 6.43

Si el número de entradas es elevado, se deberá hacer una estructura como esta, siempre en dos niveles.

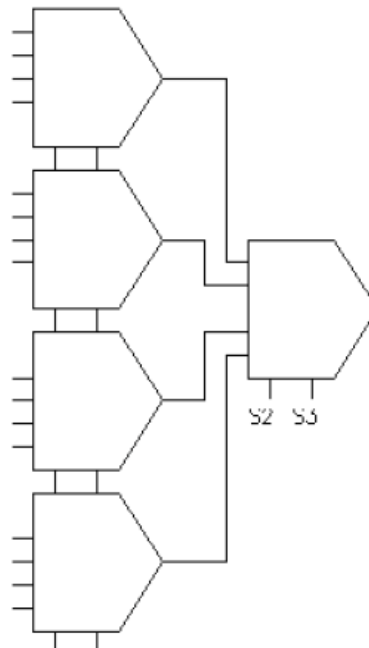


Figura 6.44

En este caso se ha obtenido un multiplexor de 16 canales a partir de multiplexores de cuatro canales. Las entradas de mayor peso se han colocado en el multiplexor del segundo nivel, las demás rigen el comportamiento de los multiplexores del primer nivel. En ese primer nivel se colocarán tantos multiplexores como hagan falta para tener tantas o más entradas como se desee. En nuestro caso fueron cuatro. Y en el segundo nivel se colocará siempre un único multiplexor con tantas entradas como multiplexores tengamos en el primer nivel. Si tuviéramos señales diferenciales tendríamos que duplicar nuestra estructura para poder atender los dos hilos de cada señal a tratar. Pero ¿qué ocurre si disponemos de señales simples y diferenciales? Supongamos un caso concreto, vamos a crear una estructura de multiplexores en la cual se permita la transmisión de cuatro señales diferenciales, o de ocho simples, o de cualquier otra combinación posible (dos diferenciales y cuatro simple, por ejemplo, etc.). Se hará un diseño en dos niveles, en el primero se colocarán los multiplexores que se necesiten como en el caso del multiplexor diferencial, los cuales se regirán por las entradas de selección de menor peso. El número total de entradas de selección debe ser el necesario para cubrir el caso de que todas las señales a manejar fueran simples. En nuestro caso al ser ocho posibles señales simples, necesitamos al menos tres entradas de selección. Por último, habrá que añadir una entrada de selección más para indicar si la elección hecha es de una señal simple o diferencial. Se suele usar la entrada D/S, tal que si es cero, es que la señal es diferencial y si vale 1, la señal es simple.

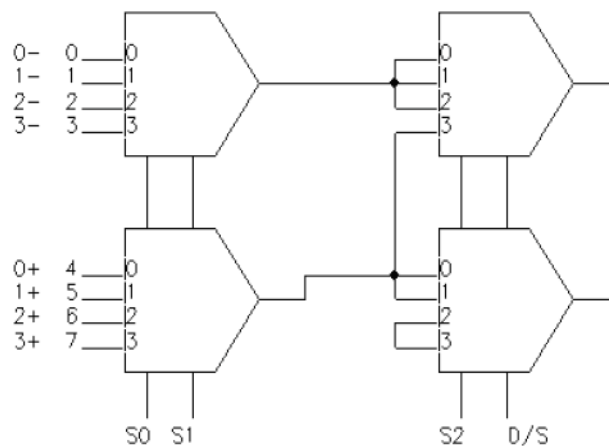


Figura 6.45

Además necesitamos un segundo nivel con dos multiplexores también para tener las salidas para el caso diferencial. Si las entradas son diferenciales una de las entradas de selección (S_2 en nuestro caso) no sirve para nada. Por tanto, en ese caso debemos conectar las entradas 0 y 1 de cada multiplexor (recordar que $D/S = 0$). Cuando $D/S=1$ tenemos entradas simples y por ello se conectan a las entradas 2,3 de uno de los multiplexores, en las del otro se conectan a tierra. Este tipo de estructura mixta puede no ser útil si disponemos del 90% de entradas diferenciales, ya que en ese caso se utilizaría un multiplexor diferencial, ya diseñado, de manera que el segundo hilo se conectaría a tierra. Un hecho importante a destacar es que los multiplexores a utilizar en el segundo nivel siempre serán de cuatro canales independientemente del número de canales totales del multiplexor completo.

6.9.2 Parámetros Característicos

Desde el punto de vista real vamos a ver una serie de parámetros característicos que nos facilitan los fabricantes y que nos dan una idea de cuánto se aleja nuestro multiplexor del modelo ideal. Para ello, nos basaremos en el multiplexor 08 de PMI o en el LF11508 de National, ambos son de ocho canales, tres entradas de selección y una entrada de habilitación EN.

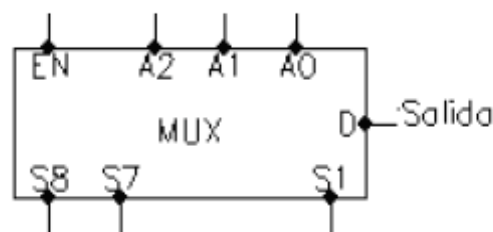


Figura 6.46 MUX LF11508

Su tabla de funcionamiento será:

A0	A1	A2	EN	D
X	X	X	L	-
L	L	L	H	S1
L	L	H	H	S2
.....				
H	H	H	H	S8

Tabla 6.4

6.9.3 Parámetros Estáticos

6.9.3.1 Resistencias de los interruptores

R_{ON} es la resistencia que ofrece el interruptor en régimen estacionario cuando se encuentra en conducción (interruptor cerrado). Análogamente se definiría R_{OFF} como la resistencia que presenta el interruptor en régimen estacionario cuando se encuentra en corte (interruptor abierto). R_{ON} puede valer 220Ω , una resistencia alta para un valor que debería ser nulo. (Ya se vio al estudiar los amplificadores de ganancia variable cómo solucionar este problema). Para R_{OFF} se obtienen valores muy altos aunque no infinito, que es lo que debería ser.

6.9.3.2 Intensidades parásitas

Al usar interruptores basados en transistores de efecto de campo JFET, o celdas CMOS, aparecen capacidades parásitas, lo cual se traduce en el paso de intensidad de un lado a otro del interruptor. Por tanto, I_{DOFF} y I_{SOFF} serán una medida de la imperfección del interruptor cuando éste se encuentra abierto. Estas intensidades se miden utilizando un circuito de prueba indicado por el propio fabricante.

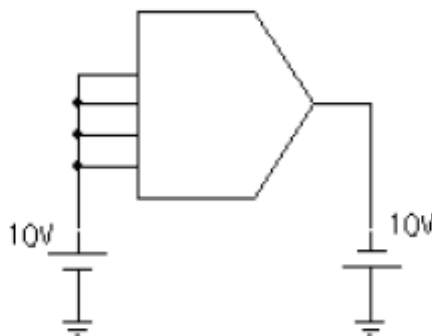


Figura 6.47 Circuito de prueba.

En esta figura hemos mostrado el circuito propuesto para los multiplexores en estudio. Como se observa se colocan tensiones fuertes de 20 V en los extremos del interruptor y se miden las intensidades. En general la I_{DOFF} no tiene por qué ser igual a la I_{SOFF} debido a las diferentes capacidades parásitas en S y en D. Algunos valores reales son: $I_{DOFF} = 1 \text{ nA}$ y $I_{SOFF} = 0,01 \text{ nA}$. Son valores muy pequeños, aunque habrá que tener cuidado sobre qué actúan. Así, sobre una resistencia de 1Ω no tendrá importancia,

pero si la resistencia es del orden de $1\text{ M}\Omega$ entonces la tensión generada puede alcanzar el valor de 1 mV .

6.9.3.3 Diafonía

Es el parámetro que da información de la parte de señal que llega a salida proveniente de una entrada no seleccionada. Supongamos un MUX en el que en un canal no seleccionado existe una tensión V y en el seleccionado la tensión es nula tal como se muestra en la figura.

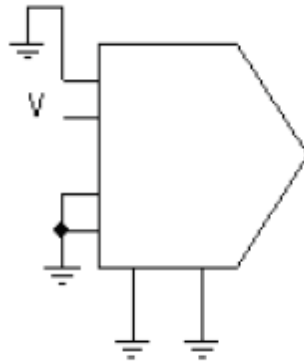


Figura 6.48 (a) Diagrama esquemático.

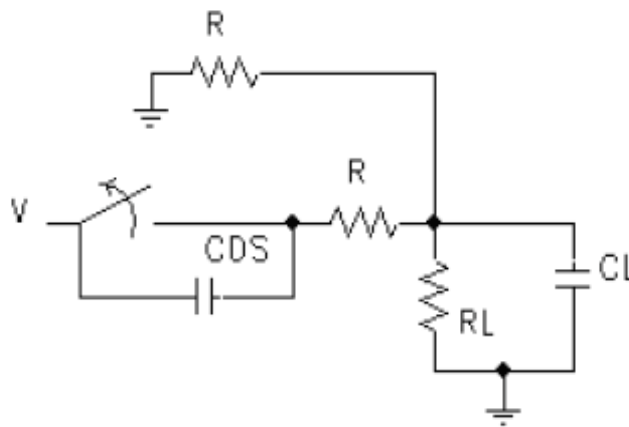


Figura 6.49 (b) Diagrama circuital.

Si funcionara de forma correcta, en esta situación se debería tener tensión cero en salida ya que la tensión V está aislada teóricamente. Sin embargo la existencia de la capacidad parásita CDS proporciona un camino entre el terminal aislado y la salida que hace que parte de dicha tensión V aparezca en salida. El circuito equivalente sería:

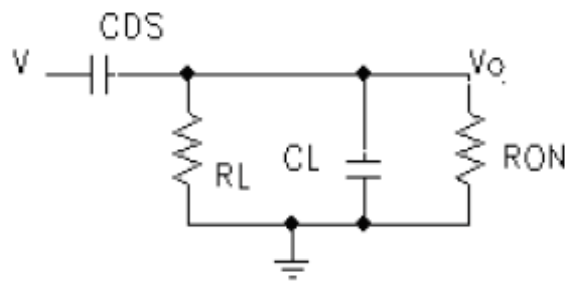


Figura 6.50 (a) Diagrama circuital.

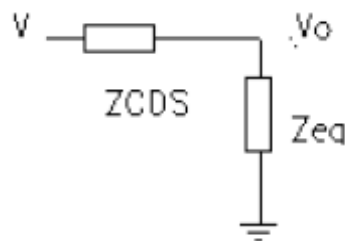


Figura 6.50 (b) Diagrama equivalente.

Que resulta ser un divisor de tensión que proporciona una tensión V_o en salida. En el multiplexor MUX 08 la diafonía es de 70 dB.

6.9.3.4 OFF de aislamiento

Es el parámetro que da información de la parte de señal que llega a salida cuando el MUX no está habilitado y por tanto independientemente de que esté una u otra entrada habilitada, están todos los interruptores abiertos. El circuito equivalente será entonces

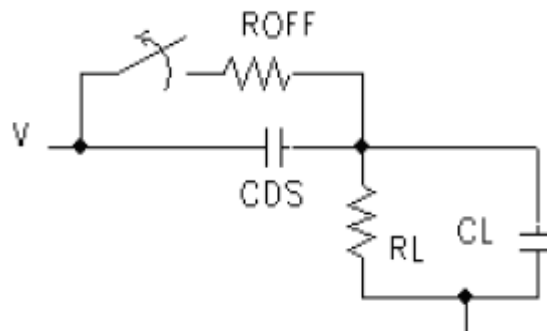


Figura 6.51 Diagrama circuital.

Para el MUX 08 este parámetro toma el valor de 60 dB.

6.9.3.5 Parámetros dinámicos

Dan idea de las velocidades de funcionamiento del MUX. Interesa saber el tiempo que transcurre en dos respuestas distintas.

1. Estando el MUX habilitado, se quiere saber el tiempo que transcurre desde que, estando una señal de entrada seleccionada, se selecciona otra distinta y se recibe la respuesta correcta en salida.
2. Cuando el MUX no está habilitado y se habilita, se quiere saber cuánto tiempo transcurre en dar la respuesta correcta en salida si el canal ya estaba prefijado.

Ambas medidas se realizan mediante 4 parámetros distintos: Tiempo de transición (t_{TRAN}), tiempo de apertura (t_{OPEN}), Tiempo en ON de habilitación $t_{\text{ON}} (EN)$ y tiempo en OFF de habilitación $t_{\text{OFF}} (EN)$. Estos parámetros dependen del cambio de tensión que deba realizarse en salida, por tanto para medirlos se somete al circuito a condiciones de prueba.

6.9.3.6 Tiempo de transición

Se define como el tiempo que transcurre entre el 50% del cambio en la entrada y el 90% del cambio en la salida. Para medirlo se realiza el circuito de prueba en el que se cambia mediante un pulso de la entrada 1 a la 8 y el cambio es entre -10 y +10 V. En la figura se muestra el circuito de prueba que se utiliza así como la forma de realizar la medida.

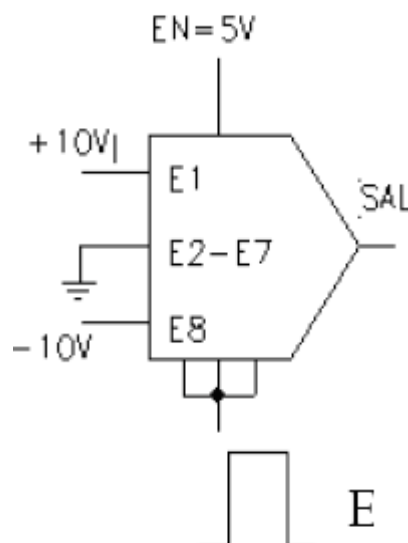


Figura 6.52 (a) Circuito de prueba.

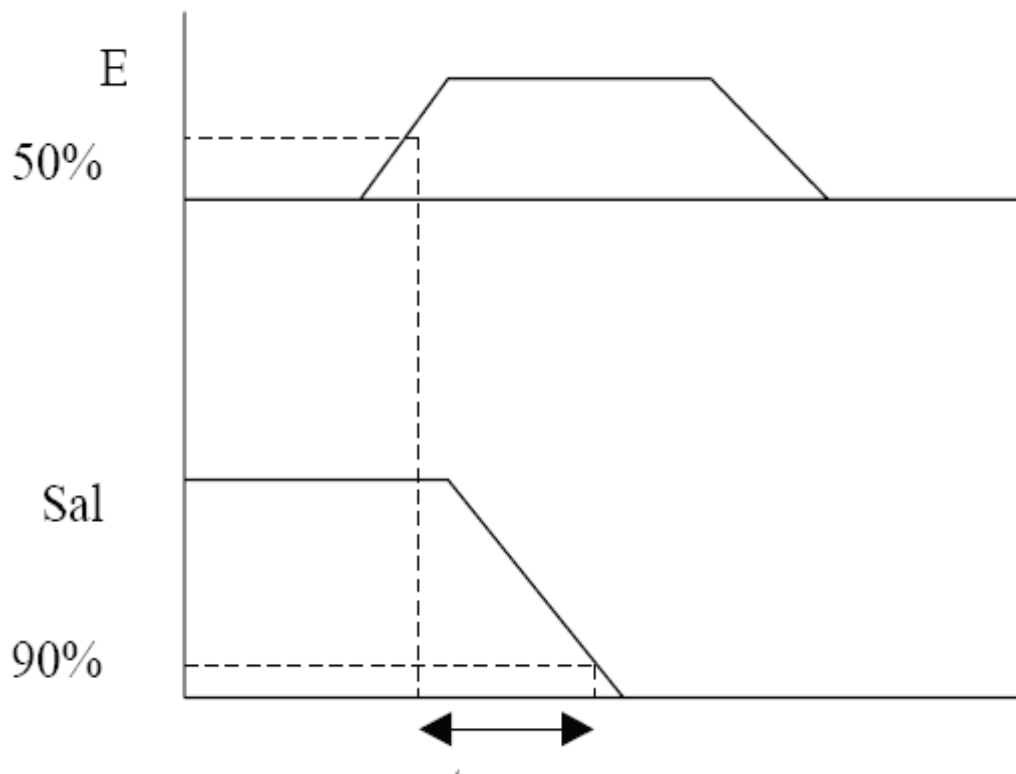


Figura 6.52 (b) Grafica del tiempo de transición.

Para el MUX- 08 este tiempo es de 1 μ s. Otros fabricantes dan la medida entre el 50% y el 95% o el 99% indicándolo así en sus catálogos.

6.9.3.7 Tiempo de apertura

Nos dice cuál es el tiempo debido al mecanismo de conmutación y no al cambio de magnitud en la señal. El circuito de prueba es similar al anterior pero ahora ambas señales E1 y E8 se ponen a la misma tensión con lo cual todo el retraso que se genere se deberá sólo a la conmutación entre entradas. La forma de salida es:

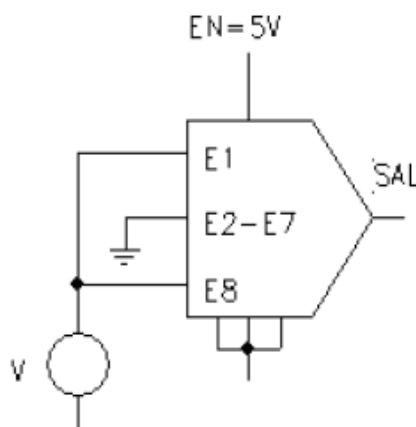


Figura 6.53 (a) Circuito de prueba.

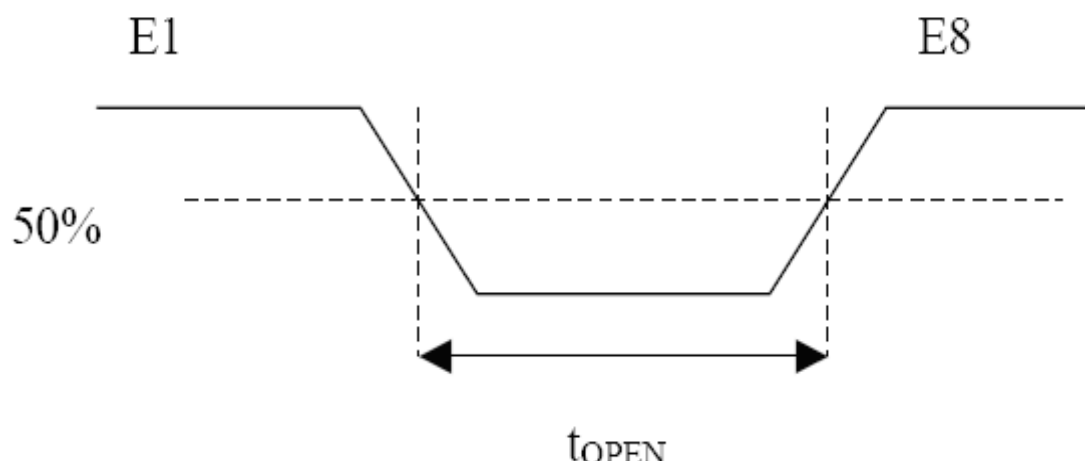


Figura 6.53 (b) Grafica del tiempo de apertura.

Desde el punto de vista dinámico sólo nos interesa el tiempo de transición. Sin embargo, la medida de t_{OPEN} ($0,8 \mu s$) nos da una idea de que la mayor parte de ese tiempo de transición se debe a la conmutación de los interruptores.

En el comportamiento general de los multiplexores, éstos se encuentran habilitados siempre, de manera que sólo se tiene que tener en cuenta, para un muestreo rápido, el tiempo de transición que antes se ha visto. Sin embargo, existen algunos montajes de multiplexores, en los cuales se requiere que en algunas ocasiones se habilite un multiplexor por lo que es interesante conocer el tiempo que emplea un multiplexor en estar habilitado y en dejar de estarlo, esto se mide con el tiempo en ON de habilitación y el tiempo en OFF de habilitación.

6.9.3.8 Tiempo en ON de habilitación

$t_{ON}(EN)$ será el tiempo que transcurre desde que el habilitador está a 1 hasta que la salida alcanza el 90% de su valor.

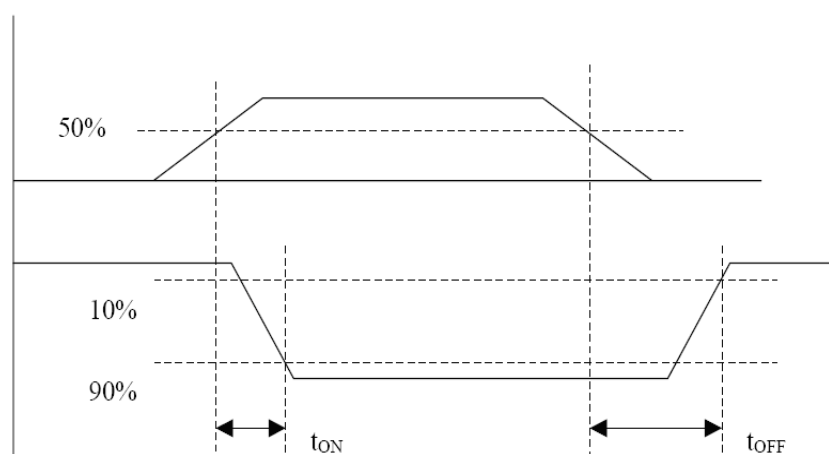


Figura 6.54

6.9.3.9 Tiempo en OFF de habilitación

$t_{OFF(EN)}$ será el tiempo que transcurre desde que el habilitador está a 0 hasta que la salida alcanza el 10% de su valor. [8]

6.10 Transistor

Un transistor es un dispositivo que controla el flujo de una señal por medio de una segunda señal de mucha menor intensidad. La señal de control puede ser una señal de corriente o voltaje. El Transistor es un dispositivo electrónico semiconductor que cumple funciones de amplificador, oscilador, conmutador o rectificador. El término "transistor" es la contracción en inglés de transfer resistor ("resistencia de transferencia"). Actualmente se los encuentra prácticamente en todos los enseres domésticos de uso diario: radios, televisores, grabadores, reproductores de audio y vídeo, hornos de microondas, lavadoras, automóviles, equipos de refrigeración, alarmas, relojes de cuarzo, computadoras, calculadoras, impresoras, lámparas fluorescentes, equipos de rayos X, tomógrafos, ecógrafos, reproductores mp3, celulares, etc.

6.10.1 Reseña histórica del transistor

El transistor fue desarrollado, mejor dicho, creado en las instalaciones de los laboratorios Bell. El transistor es la pieza fundamental de la que se componen los microprocesadores actuales, los que todos tenemos en el corazón de nuestra placa base. Pero recordemos que los microprocesadores no sólo son el núcleo de los Pcs, están presentes en prácticamente todos los aspectos de la vida humana: coches, hospitales, industria, etc. No van errados quienes se afirman en la importancia de este invento.

Originalmente, su primer uso fue amplificar señales de audio en aparatos de radio, de ahí el nombre que adquirieron esos dispositivos: "radiotransistores". Estos aparatos contenían cuatro transistores en total. De ahí se pasó después de décadas, a los 2.300 transistores del primer chip Intel, destinado al proceso en ordenadores y finalmente, estamos en la era de los 45 nanómetros de 2007, que albergan 820 millones de transistores. Resulta sorprendente saber que, en el tamaño de un glóbulo rojo humano pueden caber hasta 300 de estos últimos transistores).

El transistor fue como tal creado durante los últimos años de 1947, tan sólo dos años después de la Segunda Guerra Mundial. Aunque su primera tarea consistiera en la aplicación sobre señales de audio, su auténtica potencia radicó en su uso como pequeños conmutadores en circuitos integrados.



Figura 6.55 Uno de los primeros transistores patentado en 1928 por el físico Alemán Juluis Edgar Lilienfeld.

Sus creadores eran compañeros de trabajo en las oficinas e instalaciones de los laboratorios Bell: **John Bardeen, Walter Brattain y William Shockley**, premiados con el Nobel de Química en el año 1956. En cambio el nombre de "transistor" se debe a **John R. Pierce**.

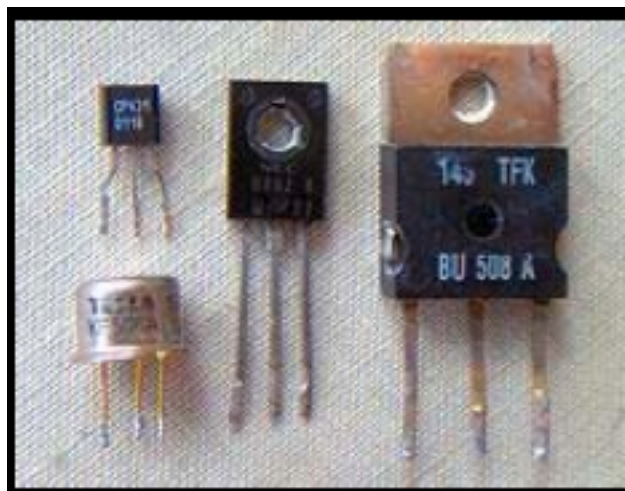


Figura 6.56 El transistor de estado sólido.

El transistor ejerce las funciones de interruptor, con dos posiciones, on y off (1 y 0). El primer transistor fue construido a base de germanio y la corriente se transmitía sobre la superficie del semiconductor. Como ya hemos dicho antes, su primera aplicación fue la amplificación de la señal eléctrica en sustitución de las enormes válvulas termoiónicas al vacío. El primer modelo de radio con transistor se lanzó al mercado americano en el 1954, aumentando la portabilidad de la información y el ocio favoreciendo enormemente la difusión de la música de los 50 por todas partes. La llamaron la generación del "Rock'n Roll".

A finales de los 50 los transistores eran utilizados en teléfonos, radios y ordenadores pero aún eran demasiado grandes para evolucionar a una generación mejorada de dispositivos. Dos hombres, Jack Kilby y Robert Noyce descubrieron por separado la forma de integrar transistores en circuitos integrados (se denominó a esto procesador). Gordon Moore, cofundador con Noyce de la empresa fabricante de procesadores Intel en 1965, declaró la "Ley de Moore". Esta ley, todavía vigente hoy en día, establece que la cantidad de transistores utilizados en un procesador se duplica cada dos años.

Para mantener el ritmo de crecimiento exponencial de la Ley de Moore, los ingenieros de Intel se han visto obligados a elaborar nuevas fórmulas mejoradas para reducir al máximo el espacio de los transistores. Esto, ha llevado a que la parte fundamental del transistor, una pieza de dióxido de silicio (SiO_2) que funciona como aislante entre la puerta y el canal por donde fluye la energía, ha llegado a un tamaño máximo, imposible de reducir, de 1,2 nanómetros (5 átomos). El problema fue que al reducirse el grosor de la capa aislante se producían fugas de energía, generando un aumento del consumo eléctrico y con ello un aumento del calor.

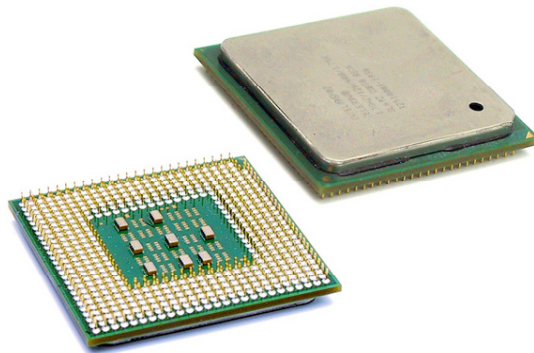


Figura 6.57 Procesador Intel.

Intel encontró la solución en aumentando el grosor de la capa aislante, pero a base de utilizar otro metal: el hafnio. Por primera vez en cuarenta años, Intel no utilizaba el dióxido de silicio para la capa aislante. Pero este material era incompatible con la puerta del transistor, y los nuevos procesadores tenían un rendimiento inferior a los de la generación anterior. Del mismo modo, Intel utilizó una nueva fórmula (que se guarda con el máximo celo) para crear la puerta. En 2007, Intel lanzó los nuevos procesadores con tecnología de 45 nanómetros y que utilizaban los nuevos materiales antes comentados. Esta nueva generación permite casi duplicar los transistores distribuidos sobre la misma superficie. Al ser más pequeños que los de la generación anterior, estos nuevos transistores utilizan un 30% menos de energía, reduciendo de esta forma el consumo. [10]

6.10.2 Tipos de transistores

6.10.2.1 Transistores de unión bipolar

Los mas comúnmente utilizados en la fabricación de aparatos estos están compuestos de tres capas de material (generalmente germanio o silicio) Estos solo funcionan cuando están en polarización directa (se dice que están en saturación) y en polarización inversa no funcionan (se dice que están en corte) A base de estos se construyen los circuitos integrados y otros tipos de transistores.

6.10.2.2 Transistores de efecto de campo

Son más modernos que los BJT, el conjunto de los FET comprende a los JFET y a los MOSFET. Para empezar hablaremos un poco acerca de los transistores JFET.

Características.	BJT.	JFET.
-Control:	Controlado por corriente.	Controlado por voltaje.
Ganancia de Voltaje:	Alta	Baja
Impedancia de entrada:	Normalmente baja.-	Normalmente infinita.

Tabla 6.5

Correspondencias de un BJT con respecto a un JFET:

BJT.	JFET
-E (emisor)	-S (fuente)
-B (base)	-G (puerta)
-C (colector)	-D (drenador)

Tabla 6.6

La diferencia de un BJT con un JFET es que en un transistor BJT siempre polarizamos el diodo base- emisor en directa, y en el JFET el diodo correspondiente es decir el diodo compuerta fuente se polariza en inversa. Como resultado solo una corriente inversa muy pequeña puede existir en la terminal de la puerta. $I_G = 0$

6.10.2.3 Foto transistores

Es mucho más sensible que el fotodiodo, tiene una pequeña ventana sobre la unión P-N. Cuando no hay luz incidiendo en la unión P-N actúa como un circuito abierto y cuando hay luz actúa como un circuito cerrado donde la corriente de colector-emisor se denomina circuito cerrado.

$$(I_{CEO}) I_R = I_{CEO}$$

Donde:

I_R : es la corriente de protadores minoritarios los cuales hacen que la corriente sea un poco mas intensa. El diodo de colector es sensible a la luz entonces la I_{CEO} aumenta de forma proporcional al aumento de I_R .

6.10.2.4 Transistor Darlington

Consiste en dos transistores en cascada. Sus ventajas son la alta impedancia de entrada que se percibe en la base del primer transistor, este dispositivo de tres terminales conocido como transistor Darlington actúa como un transistor de un factor

de amplificación muy alto y que ahora hay dos transistores o sea dos caídas de voltaje de unión base-colector.

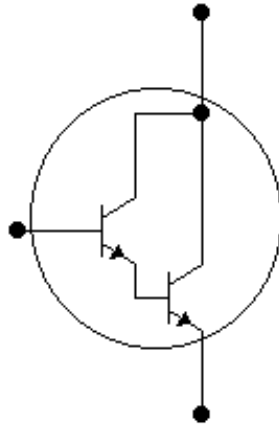


Figura 6.58 Par Darlington.

Donde $I_B = I_{C1} = I_{E1}$ Este dispositivo de 3 terminales conocido como transistor Darlington actúa como un solo transistor con una β (factor de amplificación muy alta)

Se puede utilizar el transistor Darlington en los amplificadores donde se necesite una ganancia de tensión muy alta tal como en los amplificadores de sonido por ejemplo. El análisis de un amplificador en el que se emplea un transistor Darlington (llamado amplificador Darlington) es similar a los que llevan un solo transistor, excepto que ahora hay dos transistores.

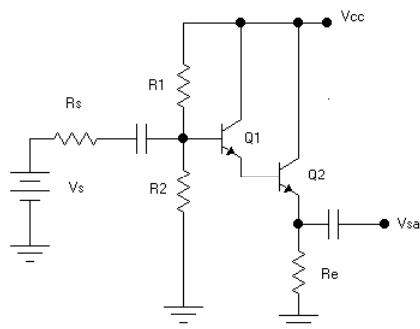


Figura 6.59 Amplificador Darlington.

Ventajas

Alta impedancia de entrada que se percibe hacia la base del primer transistor.

Impedancia: $Z = \beta * R_E$

La ganancia de corriente es mucho mas grande, esto debido a $b_T = b_1 * b_2$.

Funcionamiento en clase B

Con lleva a que la I_C circule solo 180° del ciclo de la señal; implica que el punto Q se aproxima al punto de corte de ambas rectas de carga (la continua y la de señal) Este desarrolla primero un semiciclo y después el otro semiciclo.

En este caso amplifica primero el semiciclo negativo (PNP) después el positivo (NPN) Como los transistores Darlington clase B generan grandes cantidades de calor el dispositivo debe tener un tamaño optimo para su función o estar acompañado de un cooler.

Ventajas: Menos consumo de corriente y mayor rendimiento.

6.10.2.5 Transistores de efecto de campo de metal oxido semiconductor (MOSFET)

Son transistores mas modernos que los JFET, existen dos tipos de MOSFET el de empobrecimiento y el de enriquecimiento.

El MOSFET de empobrecimiento se compone de un material N con un material P a la derecha y una puerta aislada a izquierda. Los electrones pueden circular desde la fuente hasta drenador a través del material N, el material P se denomina sustrato (o cuerpo).

¿Como funciona el MOSFET de empobrecimiento?

Como sucede con el JFET la tensión de la puerta controla el ancho del canal N el cual permite el paso de la corriente. Cuanto mas negativa sea menor será la corriente del drenador. En consecuencia el funcionamiento de un MOSFET es similar al de un JFET cuando V_{GS} (Voltaje de compuerta- fuente) es negativo.

El MOSFET de enriquecimiento (también llamado MOSFET de acumulación) tiene un sustrato que se extiende a lo ancho de hasta el dióxido de silicio, ya no existe un canal N entre la fuente y el drenador.

¿Como funciona el MOSFET de enriquecimiento?

Cuando la tensión de la puerta es nula, la alimentación V_{DD} trata de hacer circular a los electrones libres desde la fuente hacia el drenador, pero el sustrato **p** solo tiene unos cuantos electrones libres producidos térmicamente. La corriente desde la fuente al drenador es nula. Por esta razón el MOSFET enriquecedor por lo general siempre esta en corte.

Cuando la puerta es lo suficientemente negativa hay una pequeña corriente desde la fuente al drenador y se produce una pequeña sección de placa N.

La V_{GS} mínima que crea la capa de inversión se llama "tensión umbral" ($V_{GS(th)}$) por sus siglas en ingles "thresshold") cuando V_{GS} es menor que $V_{GS(th)}$ entonces la corriente

del drenador es nula. Cuando ocurre que $V_{GS(th)}$ es menor que V_{GS} la corriente del drenador es distinta de cero.

6.10.2.6 Transistor Uní unión

Son transistores los cuales solo tienen un tipo de unión, este posee dos emisores y una base, se polariza al igual que el BJT, con una fuente de tensión.

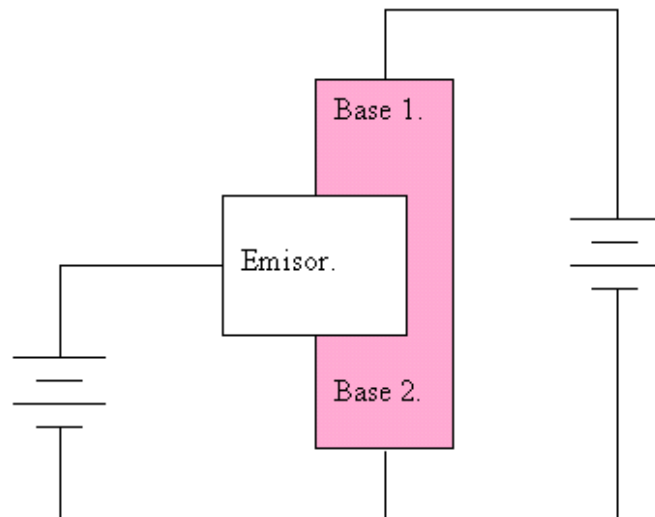


Diagrama del transistor Uní unión el cual se caracteriza por tener una sola unión entre base y emisor.

Figura 6.60

6.10.2.7 Transistor CMOS

Este transistor es similar al BJT pero solo posee una sola capa, puede ser una capa P (**P-MOS**) o una capa N (**C-MOS**).

El transistor P-MOS se pone en estado de corte cuando a la puerta **G** (Gate) se le aplica un voltaje positivo (0.7V p. ej.), y se pone en corte cuando se le aplica un voltaje aproximadamente igual a cero.



Figura 6.61

El transistor N-MOS funciona de manera inversa al aplicársele un voltaje aproximado a cero se pone en estado de saturación y al aplicársele un voltaje positivo se pone en estado de corte.



Figura 6.62

Los transistores como los BTJ, los FET, los FET, los C-MOS, y los MOS-FET son la base de las compuertas lógicas las cuales se utilizan mucho en la electrónica digital, a su vez el transistor BJT es uno de los principales componentes de los amplificadores operacionales (**Op-Amp's**) muy utilizados en el sistema digital. [10]

6.11 Microcontroladores

Los microcontroladores están conquistando el mundo. Están presentes en nuestro trabajo, en nuestra casa y en nuestra vida, en general. Se pueden encontrar controlando el funcionamiento de los ratones y teclados de los computadores, en los teléfonos, en los hornos microondas y los televisores de nuestro hogar. Pero la invasión acaba de comenzar y el nacimiento del siglo XXI será testigo de la conquista masiva de estos diminutos computadores, que gobernarán la mayor parte de los aparatos que fabricaremos y usamos los humanos.

6.11.1 Controlador y microcontrolador

Recibe el nombre de controlador el dispositivo que se emplea para el gobierno de uno o varios procesos. Por ejemplo, el controlador que regula el funcionamiento de un horno dispone de un sensor que mide constantemente su temperatura interna y, cuando traspasa los límites prefijados, genera las señales adecuadas que accionan los efectores que intentan llevar el valor de la temperatura dentro del rango estipulado.

Aunque el concepto de controlador ha permanecido invariable a través del tiempo, su implementación física ha variado frecuentemente. Hace tres décadas, los controladores se construían exclusivamente con componentes de lógica discreta, posteriormente se emplearon los microprocesadores, que se rodeaban con chips de memoria y E/S sobre una tarjeta de circuito impreso. En la actualidad, todos los elementos del controlador se han podido incluir en un chip, el cual recibe el nombre de microcontrolador. Realmente consiste en un sencillo pero completo computador contenido en el corazón (chip) de un circuito integrado.

Un microcontrolador es un circuito integrado de alta escala de integración que incorpora la mayor parte de los elementos que configuran un controlador.

Un microcontrolador dispone normalmente de los siguientes componentes:

Procesador o UCP (Unidad Central de Proceso).

Memoria RAM para Contener los datos.

Memoria para el programa tipo ROM/PROM/EPROM.

Líneas de E/S para comunicarse con el exterior.

Diversos módulos para el control de periféricos (temporizadores, Puertas Serie y Paralelo, CAD: Conversores Analógico/Digital, CDA: Conversores Digital/Analógico, etc.).

Generador de impulsos de reloj que sincronizan el funcionamiento de todo el sistema.

Los productos que para su regulación incorporan un microcontrolador disponen de las siguientes ventajas:

Aumento de prestaciones: un mayor control sobre un determinado elemento representa una mejora considerable en el mismo.

Aumento de la fiabilidad: al reemplazar el microcontrolador por un elevado número de elementos disminuye el riesgo de averías y se precisan menos ajustes.

Reducción del tamaño en el producto acabado: La integración del microcontrolador en un chip disminuye el volumen, la mano de obra y los stocks.

Mayor flexibilidad: las características de control están programadas por lo que su modificación sólo necesita cambios en el programa de instrucciones.

El microcontrolador es en definitiva un circuito integrado que incluye todos los componentes de un computador. Debido a su reducido tamaño es posible montar el controlador en el propio dispositivo al que gobierna. En este caso el controlador recibe el nombre de controlador empotrado (embedded controller).

6.11.2 Diferencia entre microprocesador y microcontrolador

El microprocesador es un circuito integrado que contiene la Unidad Central de Proceso (UCP), también llamada procesador, de un computador. La UCP está formada por la Unidad de Control, que interpreta las instrucciones, y el Camino de Datos, que las ejecuta.

Las patitas de un microprocesador sacan al exterior las líneas de sus buses de direcciones, datos y control, para permitir conectarle con la Memoria y los Módulos de E/S y configurar un computador implementado por varios circuitos integrados. Se dice que un microprocesador es un sistema abierto porque su configuración es variable de acuerdo con la aplicación a la que se destine. (Figura 6.63)

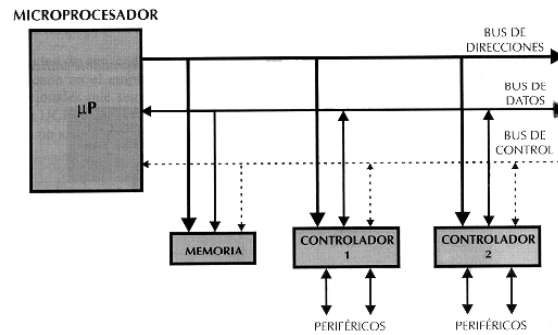


Figura 6.63 Estructura de un sistema abierto basado en un microprocesador. La disponibilidad de los buses en el exterior permite que se configure a la medida de la aplicación.

Si sólo se dispusiese de un modelo de microcontrolador, éste debería tener muy potenciados todos sus recursos para poderse adaptar a las exigencias de las diferentes aplicaciones. Esta potenciación supondría en muchos casos un despilfarro. En la práctica cada fabricante de microcontroladores oferta un elevado número de modelos diferentes, desde los más sencillos hasta los más poderosos. Es posible seleccionar la capacidad de las memorias, el número de líneas de E/S, la cantidad y potencia de los elementos auxiliares, la velocidad de funcionamiento, etc. Por todo ello, un aspecto muy destacado del diseño es la selección del microcontrolador a utilizar.

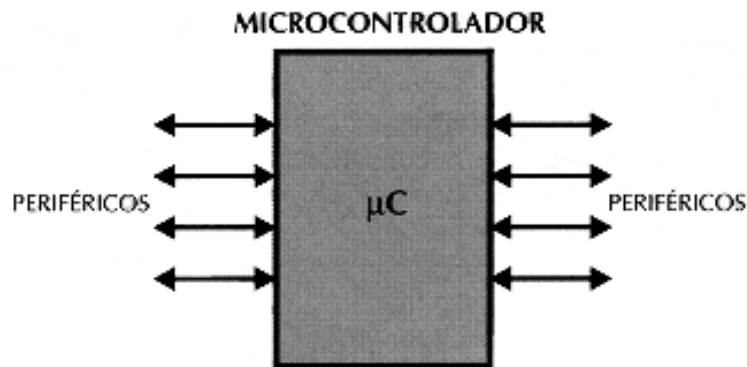


Figura 6.64 El microcontrolador es un sistema cerrado. Todas las partes del computador están contenidas en su interior y sólo salen al exterior las líneas que gobiernan los periféricos.

6.11.3 Aplicaciones de los microcontroladores

Cada vez existen más productos que incorporan un microcontrolador con el fin de aumentar sustancialmente sus prestaciones, reducir su tamaño y coste, mejorar su fiabilidad y disminuir el consumo.

Algunos fabricantes de microcontroladores superan el millón de unidades de un modelo determinado producidas en una semana. Este dato puede dar una idea de la masiva utilización de estos componentes.

Los microcontroladores están siendo empleados en multitud de sistemas presentes en nuestra vida diaria, como pueden ser juguetes, horno microondas, frigoríficos, televisores, computadoras, impresoras, módems, el sistema de arranque de nuestro coche, etc. Y otras aplicaciones con las que seguramente no estaremos tan familiarizados como instrumentación electrónica, control de sistemas en una nave espacial, etc. Una aplicación típica podría emplear varios microcontroladores para controlar pequeñas partes del sistema. Estos pequeños controladores podrían comunicarse entre ellos y con un procesador central, probablemente más potente, para compartir la información y coordinar sus acciones, como, de hecho, ocurre ya habitualmente en cualquier PC.

6.11.4 El mercado de los microcontroladores

Aunque en el mercado de la microinformática la mayor atención la acaparan los desarrollos de los microprocesadores, lo cierto es que se venden cientos de microcontroladores por cada uno de aquéllos.

Existe una gran diversidad de microcontroladores. Quizá la clasificación más importante sea entre microcontroladores de 4, 8, 16 ó 32 bits. Aunque las prestaciones de los microcontroladores de 16 y 32 bits son superiores a los de 4 y 8 bits, la realidad es que los microcontroladores de 8 bits dominan el mercado y los de 4 bits se resisten a desaparecer. La razón de esta tendencia es que los microcontroladores de 4 y 8 bits son apropiados para la gran mayoría de las aplicaciones, lo que hace absurdo emplear micros más potentes y consecuentemente más caros. Uno de los sectores que más tira del mercado del microcontrolador es el mercado automovilístico. De hecho, algunas de las familias de microcontroladores actuales se desarrollaron pensando en este sector, siendo modificadas posteriormente para adaptarse a sistemas más genéricos. El mercado del automóvil es además uno de los más exigentes: los componentes electrónicos deben operar bajo condiciones extremas de vibraciones, choques, ruido, etc. y seguir siendo fiables. El fallo de cualquier componente en un automóvil puede ser el origen de un accidente.

En cuanto a las técnicas de fabricación, cabe decir que prácticamente la totalidad de los microcontroladores actuales se fabrican con tecnología CMOS 4 (Complementary Metal Oxide Semiconductor). Esta tecnología supera a las técnicas anteriores por su bajo consumo y alta inmunidad al ruido.

La distribución de las ventas según su aplicación es la siguiente:

Una tercera parte se absorbe en las aplicaciones relacionadas con los computadores y sus periféricos.

La cuarta parte se utiliza en las aplicaciones de consumo (electrodomésticos, juegos, TV, vídeo, etc.)

El 16% de las ventas mundiales se destinó al área de las comunicaciones.

Otro 16% fue empleado en aplicaciones industriales.

El resto de los microcontroladores vendidos en el mundo, aproximadamente un 10% fueron adquiridos por las industrias de automoción.

También los modernos microcontroladores de 32 bits van afianzando sus posiciones en el mercado, siendo las áreas de más interés el procesamiento de imágenes, las comunicaciones, las aplicaciones militares, los procesos industriales y el control de los dispositivos de almacenamiento masivo de datos.

6.11.5 ¿Qué microcontrolador emplear?

A la hora de escoger el microcontrolador a emplear en un diseño concreto hay que tener en cuenta multitud de factores, como la documentación y herramientas de desarrollo disponibles y su precio, la cantidad de fabricantes que lo producen y por supuesto las características del microcontrolador (tipo de memoria de programa, número de temporizadores, interrupciones, etc.):

Costes. Como es lógico, los fabricantes de microcontroladores compiten duramente para vender sus productos. Y no les va demasiado mal ya que sin hacer demasiado ruido venden 10 veces más microcontroladores que microprocesadores.

Para que nos hagamos una idea, para el fabricante que usa el microcontrolador en su producto una diferencia de precio en el microcontrolador de algunas pesetas es importante (el consumidor deberá pagar además el coste del empaquetado, el de los otros componentes, el diseño del hardware y el desarrollo del software). Si el fabricante desea reducir costes debe tener en cuenta las herramientas de apoyo con que va a contar: emuladores, simuladores, ensambladores, compiladores, etc. Es habitual que muchos de ellos siempre se decanten por microcontroladores pertenecientes a una única familia.

Aplicación. Antes de seleccionar un microcontrolador es imprescindible analizar los requisitos de la aplicación:

- **Procesamiento de datos:** puede ser necesario que el microcontrolador realice cálculos críticos en un tiempo limitado. En ese caso debemos asegurarnos de seleccionar un dispositivo suficientemente rápido para ello. Por otro lado, habrá que tener en cuenta la precisión de los datos a manejar: si no es suficiente con un microcontrolador de 8 bits, puede ser necesario acudir a microcontroladores de 16 ó 32 bits, o incluso a hardware de coma flotante. Una alternativa más barata y quizá suficiente es usar librerías para manejar los datos de alta precisión. -
- **Entrada Salida:** para determinar las necesidades de Entrada/Salida del sistema es conveniente dibujar un diagrama de bloques del mismo, de tal forma que sea sencillo identificar la cantidad y tipo de señales a controlar. Una vez realizado este análisis puede ser necesario añadir periféricos hardware externos o cambiar a otro microcontrolador más adecuado a ese sistema.
- **Consumo:** algunos productos que incorporan microcontroladores están alimentados con baterías y su funcionamiento puede ser tan vital como activar una alarma antirrobo. Lo más conveniente en un caso como éste puede ser que el microcontrolador esté en estado de bajo consumo pero que despierte ante la activación de una señal (una interrupción) y ejecute el programa adecuado para procesarla.
- **Memoria:** para detectar las necesidades de memoria de nuestra aplicación debemos separarla en memoria volátil (RAM), memoria no volátil (ROM, EPROM, etc.) y memoria no volátil modificable (EEPROM). Este último tipo de memoria puede ser útil

para incluir información específica de la aplicación como un número de serie o parámetros de calibración.

El tipo de memoria a emplear vendrá determinado por el volumen de ventas previsto del producto: de menor a mayor volumen será conveniente emplear EPROM, OTP y ROM. En cuanto a la cantidad de memoria necesaria puede ser imprescindible realizar una versión preliminar, aunque sea en pseudo-código, de la aplicación y a partir de ella hacer una estimación de cuánta memoria volátil y no volátil es necesaria y si es conveniente disponer de memoria no volátil modificable.

- Ancho de palabra: el criterio de diseño debe ser seleccionar el microcontrolador de menor ancho de palabra que satisfaga los requerimientos de la aplicación. Usar un microcontrolador de 4 bits supondrá una reducción en los costes importante, mientras que uno de 8 bits puede ser el más adecuado si el ancho de los datos es de un byte. Los microcontroladores de 16 y 32 bits, debido a su elevado coste, deben reservarse para aplicaciones que requieran sus altas prestaciones (Entrada/Salida potente o espacio de direccionamiento muy elevado).
- Diseño de la placa: la selección de un microcontrolador concreto condicionará el diseño de la placa de circuitos. Debe tenerse en cuenta que quizá usar un microcontrolador barato encarezca el resto de componentes del diseño.

Los microcontroladores más populares se encuentran, sin duda, entre las mejores elecciones:

8048 (Intel). Es el padre de los microcontroladores actuales, el primero de todos. Su precio, disponibilidad y herramientas de desarrollo hacen que todavía sea muy popular.

8051 (Intel y otros). Es sin duda el microcontrolador más popular. Fácil de programar, pero potente. Está bien documentado y posee cientos de variantes e incontables herramientas de desarrollo.

80186, 80188 y 80386 EX (Intel). Versiones en microcontrolador de los populares microprocesadores 8086 y 8088. Su principal ventaja es que permiten aprovechar las herramientas de desarrollo para PC.

68HC11 (Motorola y Toshiba). Es un microcontrolador de 8 bits potente y popular con gran cantidad de variantes.

683xx (Motorola). Surgido a partir de la popular familia 68k, a la que se incorporan algunos periféricos. Son microcontroladores de altísimas prestaciones.

PIC (MicroChip). Familia de microcontroladores que gana popularidad día a día. Fueron los primeros microcontroladores RISC.

Es preciso resaltar en este punto que existen innumerables familias de microcontroladores, cada una de las cuales posee un gran número de variantes.

6.11.6 Recursos comunes a todos los microcontroladores

Al estar todos los microcontroladores integrados en un chip, su estructura fundamental y sus características básicas son muy parecidas. Todos deben disponer de los bloques esenciales Procesador, memoria de datos y de instrucciones, líneas de E/S, oscilador de reloj y módulos controladores de periféricos. Sin embargo, cada fabricante intenta enfatizar los recursos más idóneos para las aplicaciones a las que se destinan preferentemente.

En este apartado se hace un recorrido de todos los recursos que se hallan en todos los microcontroladores describiendo las diversas alternativas y opciones que pueden encontrarse según el modelo seleccionado.

6.11.6.1 Arquitectura básica

Aunque inicialmente todos los microcontroladores adoptaron la arquitectura clásica de von Neumann, en el momento presente se impone la arquitectura Harvard. La arquitectura de von Neumann se caracteriza por disponer de una sola memoria principal donde se almacenan datos e instrucciones de forma indistinta. A dicha memoria se accede a través de un sistema de buses único (direcciones, datos y control).

La arquitectura Harvard dispone de dos memorias independientes una, que contiene sólo instrucciones y otra, sólo datos. Ambas disponen de sus respectivos sistemas de buses de acceso y es posible realizar operaciones de acceso (lectura o escritura) simultáneamente en ambas memorias. Figura 6.65

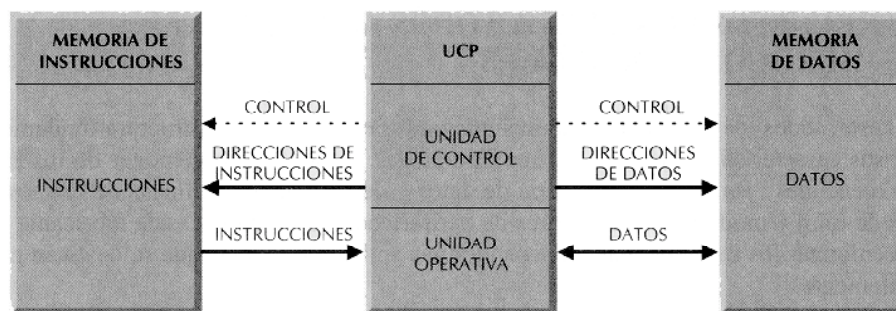


Figura 6.65 La arquitectura Harvard dispone de dos memorias independientes para datos y para instrucciones, permitiendo accesos simultáneos.

Los microcontroladores PIC responden a la arquitectura Harvard.

6.11.6.2 El procesador o UCP

Es el elemento más importante del microcontrolador y determina sus principales características, tanto a nivel hardware como software.

Se encarga de direccionar la memoria de instrucciones, recibir el código OP de la instrucción en curso, su decodificación y la ejecución de la operación que implica la

instrucción, así como la búsqueda de los operandos y el almacenamiento del resultado.

Existen tres orientaciones en cuanto a la arquitectura y funcionalidad de los procesadores actuales.

CISC: Un gran número de procesadores usados en los microcontroladores están basados en la filosofía CISC (Computadores de Juego de Instrucciones Complejo). Disponen de más de 80 instrucciones máquina en su repertorio, algunas de las cuales son muy sofisticadas y potentes, requiriendo muchos ciclos para su ejecución.

Una ventaja de los procesadores CISC es que ofrecen al programador instrucciones complejas que actúan como macros.

RISC: Tanto la industria de los computadores comerciales como la de los microcontroladores están decantándose hacia la filosofía RISC (Computadores de Juego de Instrucciones Reducido). En estos procesadores el repertorio de instrucciones máquina es muy reducido y las instrucciones son simples y, generalmente, se ejecutan en un ciclo.

La sencillez y rapidez de las instrucciones permiten optimizar el hardware y el software del procesador.

SISC: En los microcontroladores destinados a aplicaciones muy concretas, el juego de instrucciones, además de ser reducido, es "específico", o sea, las instrucciones se adaptan a las necesidades de la aplicación prevista. Esta filosofía se ha bautizado con el nombre de SISC (Computadores de Juego de Instrucciones Específico).

6.11.6.3 Memoria

En los microcontroladores la memoria de instrucciones y datos está integrada en el propio chip. Una parte debe ser no volátil, tipo ROM, y se destina a contener el programa de instrucciones que gobierna la aplicación. Otra parte de memoria será tipo RAM, volátil, y se destina a guardar las variables y los datos.

Hay dos peculiaridades que diferencian a los microcontroladores de los computadores personales:

No existen sistemas de almacenamiento masivo como disco duro o disquetes.

Como el microcontrolador sólo se destina a una tarea en la memoria ROM, sólo hay que almacenar un único programa de trabajo.

La RAM en estos dispositivos es de poca capacidad pues sólo debe contener las variables y los cambios de información que se produzcan en el transcurso del programa. Por otra parte, como sólo existe un programa activo, no se requiere guardar una copia del mismo en la RAM pues se ejecuta directamente desde la ROM.

Los usuarios de computadores personales están habituados a manejar Megabytes de memoria, pero, los diseñadores con microcontroladores trabajan con capacidades de ROM comprendidas entre 512 bytes y 8 k bytes y de RAM comprendidas entre 20 y 512 bytes.

Según el tipo de memoria ROM que dispongan los microcontroladores, la aplicación y utilización de los mismos es diferente. Se describen las cinco versiones de memoria no volátil que se pueden encontrar en los microcontroladores del mercado.

1º. ROM con máscara

Es una memoria no volátil de sólo lectura cuyo contenido se graba durante la fabricación del chip. El elevado coste del diseño de la máscara sólo hace aconsejable el empleo de los microcontroladores con este tipo de memoria cuando se precisan cantidades superiores a varios miles de unidades.

2ª. OTP

El microcontrolador contiene una memoria no volátil de sólo lectura "programable una sola vez" por el usuario. OTP (One Time Programmable). Es el usuario quien puede escribir el programa en el chip mediante un sencillo grabador controlado por un programa desde un PC.

La versión OTP es recomendable cuando es muy corto el ciclo de diseño del producto, o bien, en la construcción de prototipos y series muy pequeñas.

Tanto en este tipo de memoria como en la EPROM, se suele usar la encriptación mediante fusibles para proteger el código contenido.

3ª EPROM

Los microcontroladores que disponen de memoria EPROM (Erasable Programmable Read Only Memory) pueden borrarse y grabarse muchas veces. La grabación se realiza, como en el caso de los OTP, con un grabador gobernado desde un PC. Si, posteriormente, se desea borrar el contenido, disponen de una ventana de cristal en su superficie por la que se somete a la EPROM a rayos ultravioleta durante varios minutos. Las cápsulas son de material cerámico y son más caros que los microcontroladores con memoria OTP que están hechos con material plástico.

4ª EEPROM

Se trata de memorias de sólo lectura, programables y borrables eléctricamente EEPROM (Electrical Erasable Programmable Read Only Memory). Tanto la programación como el borrado, se realizan eléctricamente desde el propio grabador y bajo el control programado de un PC. Es muy cómoda y rápida la operación de grabado y la de borrado. No disponen de ventana de cristal en la superficie.

Los microcontroladores dotados de memoria EEPROM una vez instalados en el circuito, pueden grabarse y borrarse cuantas veces se quiera sin ser retirados de dicho circuito. Para ello se usan "grabadores en circuito" que confieren una gran flexibilidad y rapidez a la hora de realizar modificaciones en el programa de trabajo.

El número de veces que puede grabarse y borrarse una memoria EEPROM es finito, por lo que no es recomendable una programación continua. Son muy idóneos para la enseñanza y la Ingeniería de diseño.

Se va extendiendo en los fabricantes la tendencia de incluir una pequeña zona de memoria EEPROM en los circuitos programables para guardar y modificar

cómodamente una serie de parámetros que adecuan el dispositivo a las condiciones del entorno.

Este tipo de memoria es relativamente lenta.

5ª FLASH

Se trata de una memoria no volátil, de bajo consumo, que se puede escribir y borrar. Funciona como una ROM y una RAM pero consume menos y es más pequeña.

A diferencia de la ROM, la memoria FLASH es programable en el circuito. Es más rápida y de mayor densidad que la EEPROM.

La alternativa FLASH está recomendada frente a la EEPROM cuando se precisa gran cantidad de memoria de programa no volátil. Es más veloz y tolera más ciclos de escritura/borrado.

Las memorias EEPROM y FLASH son muy útiles al permitir que los microcontroladores que las incorporan puedan ser reprogramados "en circuito", es decir, sin tener que sacar el circuito integrado de la tarjeta. Así, un dispositivo con este tipo de memoria incorporado al control del motor de un automóvil permite que pueda modificarse el programa durante la rutina de mantenimiento periódico, compensando los desgastes y otros factores tales como la compresión, la instalación de nuevas piezas, etc. La reprogramación del microcontrolador puede convertirse en una labor rutinaria dentro de la puesta a punto.

6.11.6.4 Puertas de Entrada y Salida

La principal utilidad de las patitas que posee la cápsula que contiene un microcontrolador es soportar las líneas de E/S que comunican al computador interno con los periféricos exteriores.

Según los controladores de periféricos que posea cada modelo de microcontrolador, las líneas de E/S se destinan a proporcionar el soporte a las señales de entrada, salida y control.

6.11.6.5 Reloj principal

Todos los microcontroladores disponen de un circuito oscilador que genera una onda cuadrada de alta frecuencia, que configura los impulsos de reloj usados en la sincronización de todas las operaciones del sistema.

Generalmente, el circuito de reloj está incorporado en el microcontrolador y sólo se necesitan unos pocos componentes exteriores para seleccionar y estabilizar la frecuencia de trabajo. Dichos componentes suelen consistir en un cristal de cuarzo junto a elementos pasivos o bien un resonador cerámico o una red R-C.

Aumentar la frecuencia de reloj supone disminuir el tiempo en que se ejecutan las instrucciones pero lleva aparejado un incremento del consumo de energía.

6.11.7 Recursos especiales

Cada fabricante oferta numerosas versiones de una arquitectura básica de microcontrolador. En algunas amplía las capacidades de las memorias, en otras incorpora nuevos recursos, en otras reduce las prestaciones al mínimo para aplicaciones muy simples, etc. La labor del diseñador es encontrar el modelo mínimo que satisfaga todos los requerimientos de su aplicación. De esta forma, minimizará el coste, el hardware y el software.

Los principales recursos específicos que incorporan los microcontroladores son:

- Temporizadores o "Timers".
- Perro guardián o "Watchdog".
- Protección ante fallo de alimentación o "Brownout".
- Estado de reposo o de bajo consumo.
- Conversor A/D.
- Conversor D/A.
- Comparador analógico.
- Modulador de anchura de impulsos o PWM.
- Puertas de E/S digitales.
- Puertas de comunicación.

6.11.7.1 Temporizadores o "Timers"

Se emplean para controlar periodos de tiempo (temporizadores) y para llevar la cuenta de acontecimientos que suceden en el exterior (contadores).

Para la medida de tiempos se carga un registro con el valor adecuado y a continuación dicho valor se va incrementando o decrementando al ritmo de los impulsos de reloj o algún múltiplo hasta que se desborde y llegue a 0, momento en el que se produce un aviso.

Cuando se desean contar acontecimientos que se materializan por cambios de nivel o flancos en alguna de las patitas del microcontrolador, el mencionado registro se va incrementando o decrementando al ritmo de dichos impulsos.

6.11.7.2 Perro guardián o "Watchdog"

Cuando el computador personal se bloquea por un fallo del software u otra causa, se pulsa el botón del reset y se reinicializa el sistema. Pero un microcontrolador funciona sin el control de un supervisor y de forma continuada las 24 horas del día. El Perro guardián consiste en un temporizador que, cuando se desborda y pasa por 0, provoca un reset automáticamente en el sistema.

Se debe diseñar el programa de trabajo que controla la tarea de forma que refresque o inicialice al Perro guardián antes de que provoque el reset. Si falla el programa o se bloquea, no se refrescará al Perro guardián y, al completar su temporización, "ladrará y ladrará" hasta provocar el reset.

6.11.7.3 Protección ante fallo de alimentación o "Brownout"

Se trata de un circuito que resetea al microcontrolador cuando el voltaje de alimentación (VDD) es inferior a un voltaje mínimo ("brownout"). Mientras el voltaje de alimentación sea inferior al de brownout el dispositivo se mantiene reseteado, comenzando a funcionar normalmente cuando sobrepasa dicho valor.

6.11.7.4 Estado de reposo ó de bajo consumo

Son abundantes las situaciones reales de trabajo en que el microcontrolador debe esperar, sin hacer nada, a que se produzca algún acontecimiento externo que le ponga de nuevo en funcionamiento. Para ahorrar energía, (factor clave en los aparatos portátiles), los microcontroladores disponen de una instrucción especial (SLEEP en los PIC), que les pasa al estado de reposo o de bajo consumo, en el cual los requerimientos de potencia son mínimos. En dicho estado se detiene el reloj principal y se "congelan" sus circuitos asociados, quedando sumido en un profundo "sueño" el microcontrolador. Al activarse una interrupción ocasionada por el acontecimiento esperado, el microcontrolador se despierta y reanuda su trabajo.

6.11.7.5 Conversor A/D (CAD)

Los microcontroladores que incorporan un Conversor A/D (Analógico/Digital) pueden procesar señales analógicas, tan abundantes en las aplicaciones. Suelen disponer de un multiplexor que permite aplicar a la entrada del CAD diversas señales analógicas desde las patitas del circuito integrado.

6.11.7.6 Conversor D/A (CDA)

Transforma los datos digitales obtenidos del procesamiento del computador en su correspondiente señal analógica que saca al exterior por una de las patitas de la cápsula. Existen muchos efectores que trabajan con señales analógicas.

6.11.7.7 Comparador analógico

Algunos modelos de microcontroladores disponen internamente de un Amplificador Operacional que actúa como comparador entre una señal fija de referencia y otra variable que se aplica por una de las patitas de la cápsula. La salida del comparador proporciona un nivel lógico 1 ó 0 según una señal sea mayor o menor que la otra.

También hay modelos de microcontroladores con un módulo de tensión de referencia que proporciona diversas tensiones de referencia que se pueden aplicar en los comparadores.

6.11.7.8 Modulador de anchura de impulsos o PWM

Son circuitos que proporcionan en su salida impulsos de anchura variable, que se ofrecen al exterior a través de las patitas del encapsulado.

6.11.7.9 Puertos de E/S digitales

Todos los microcontroladores destinan algunas de sus patitas a soportar líneas de E/S digitales. Por lo general, estas líneas se agrupan de ocho en ocho formando Puertos.

Las líneas digitales de los Puertos pueden configurarse como Entrada o como Salida cargando un 1 ó un 0 en el bit correspondiente de un registro destinado a su configuración.

6.11.7.10 Puertos de comunicación

Con objeto de dotar al microcontrolador de la posibilidad de comunicarse con otros dispositivos externos, otros buses de microprocesadores, buses de sistemas, buses de redes y poder adaptarlos con otros elementos bajo otras normas y protocolos. Algunos modelos disponen de recursos que permiten directamente esta tarea, entre los que destacan:

UART, adaptador de comunicación serie asíncrona.

USART, adaptador de comunicación serie síncrona y asíncrona

Puerta paralela esclava para poder conectarse con los buses de otros microprocesadores.

USB (Universal Serial Bus), que es un moderno bus serie para los PC.

Bus I2C, que es un interfaz serie de dos hilos desarrollado por Philips.

CAN (Controller Area Network), para permitir la adaptación con redes de conexionado multiplexado desarrollado conjuntamente por Bosch e Intel para el cableado de dispositivos en automóviles. En EE.UU. se usa el J1850.

6.11.8 Herramientas para el desarrollo de aplicaciones

Uno de los factores que más importancia tiene a la hora de seleccionar un microcontrolador entre todos los demás es el soporte tanto software como hardware de que dispone. Un buen conjunto de herramientas de desarrollo puede ser decisivo en la elección, ya que pueden suponer una ayuda inestimable en el desarrollo del proyecto.

Las principales herramientas de ayuda al desarrollo de sistemas basados en microcontroladores son:

Desarrollo del software:

Ensamblador. La programación en lenguaje ensamblador puede resultar un tanto ardua para el principiante, pero permite desarrollar programas muy eficientes, ya que otorga al programador el dominio absoluto del sistema. Los fabricantes suelen proporcionar el programa ensamblador de forma gratuita y en cualquier caso siempre se puede encontrar una versión gratuita para los microcontroladores más populares.

Compilador. La programación en un lenguaje de alto nivel (como el C ó el Basic) permite disminuir el tiempo de desarrollo de un producto. No obstante, si no se

programa con cuidado, el código resultante puede ser mucho más ineficiente que el programado en ensamblador. Las versiones más potentes suelen ser muy caras, aunque para los microcontroladores más populares pueden encontrarse versiones demo limitadas e incluso compiladores gratuitos.

Depuración: debido a que los microcontroladores van a controlar dispositivos físicos, los desarrolladores necesitan herramientas que les permitan comprobar el buen funcionamiento del microcontrolador cuando es conectado al resto de circuitos.

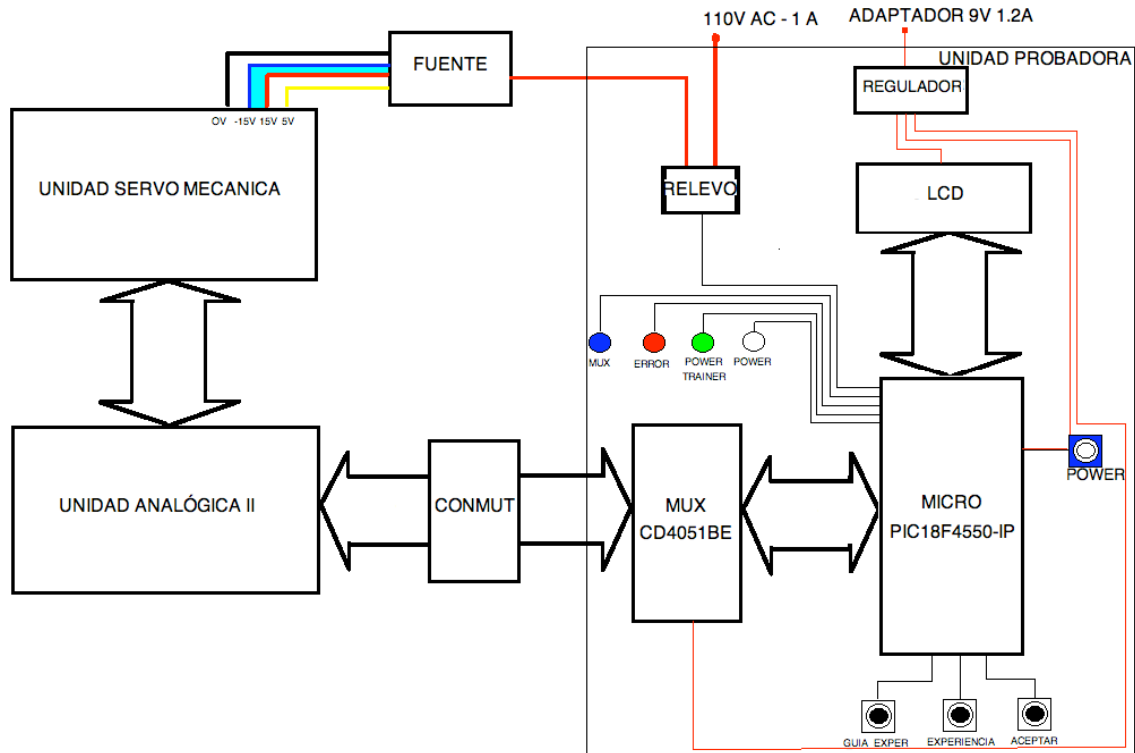
Simulador. Son capaces de ejecutar en un PC programas realizados para el microcontrolador. Los simuladores permiten tener un control absoluto sobre la ejecución de un programa, siendo ideales para la depuración de los mismos. Su gran inconveniente es que es difícil simular la entrada y salida de datos del microcontrolador. Tampoco cuentan con los posibles ruidos en las entradas, pero, al menos, permiten el paso físico de la implementación de un modo más seguro y menos costoso, puesto que ahorraremos en grabaciones de chips para la prueba in-situ.

Placas de evaluación. Se trata de pequeños sistemas con un microcontrolador ya montado y que suelen conectarse a un PC desde el que se cargan los programas que se ejecutan en el microcontrolador. Las placas suelen incluir visualizadores LCD, teclados, LEDs, fácil acceso a los pines de E/S, etc. El sistema operativo de la placa recibe el nombre de programa monitor. El programa monitor de algunas placas de evaluación, aparte de permitir cargar programas y datos en la memoria del microcontrolador, puede permitir en cualquier momento realizar ejecución paso a paso, monitorizar el estado del microcontrolador o modificar los valores almacenados los registros o en la memoria.

Emuladores en circuito. Se trata de un instrumento que se coloca entre el PC anfitrión y el zócalo de la tarjeta de circuito impreso donde se alojará el microcontrolador definitivo. El programa es ejecutado desde el PC, pero para la tarjeta de aplicación es como si lo hiciese el mismo microcontrolador que luego irá en el zócalo. Presenta en pantalla toda la información tal y como luego sucederá cuando se coloque la cápsula.
[7]

7. METODOLOGÍA

Con el siguiente esquema se muestra la manera como se pensó abordar la solución al problema.



Se utilizó un banco de multiplexores para realizar el barrido de cada montaje en cada experiencia. El enlace se hace mediante dos cintas ribbon las cuales van conectadas desde cada entrada del banco de multiplexores hasta un conmutador el cual aísla o conecta según si se está realizando una prueba o si se está ejecutando una práctica. Dicho conmutador también va conectado a la unidad analógica II mediante otras dos cintas ribbon. Las salidas del banco de multiplexores están conectadas al microcontrolador el cual procesa y almacena cada práctica de laboratorio y muestra en un LCD la guía de experiencia, la práctica, el número de conexiones y su respectivo estado. La selección se hace mediante tres pulsadores según sea la elección deseada. La alimentación de la unidad probadora se realiza utilizando un adaptador switching de 9V, este voltaje es regulado antes de energizar el banco de multiplexores, el microcontrolador y el LCD.

Al oprimir el botón de encendido prende un LED blanco el cual indica que se alimenta el LCD y el microcontrolador con 5V, este último prende el banco de multiplexores y un LED azul el cual indica que están energizados. Luego de realizar la selección se inicia el barrido de todo el montaje conectado, el microcontrolador está programado para revisar tres veces el montaje una conexión a la vez, si se encuentra un error se enciende un LED rojo. Hasta que el alumno corrija el inconveniente no seguirá revisando el montaje. Después de solucionar la situación y realizar la supervisión completa del montaje se desenergiza el banco de multiplexores y su respectivo LED indicador. Al mismo tiempo el PIC energiza la fuente del entrenador y un LED verde seguidamente se mueve el switch del conmutador por el operador a la posición de práctica para dar inicio a la ejecución de la experiencia.

Para el desarrollo de la metodología fueron necesarios los siguientes pasos los cuales se especifican a continuación:

1. Desarrollo del plano de la tarjeta de control análogo FEEDBACK INSTRUMENTS 33-110 ya que en el almacén de electrónica no se tiene existencia de alguno. En principio el desarrollo del plano se realizó manualmente observando la tarjeta, de esta manera fue práctico montarlo a un software de simulación.
2. Rediseño de la tarjeta de control análogo FEEDBACK INSTRUMENTS 33-110. No se afectó en ningún caso los circuitos de control, solo se realizó una extensión de cada punto o borne de conexión a un conector de salida el cual fue enlazado mediante una cinta plana al probador externo.
3. Diseño de la tarjeta probadora de conexiones. En este caso se utilizaron multiplexores análogos (CD4051BE) para censar cada conexión de la tarjeta de control, un microcontrolador (PIC18F4550-IP) para procesar, almacenar y comparar la información, también se utilizó un LCD para mostrar el seguimiento de cada práctica y su correcta conexión.
4. Simulación de los respectivos circuitos de la tarjeta probadora siguiendo las guías de laboratorio. Se realizaron simulaciones independientes según indicaba la guía de cada práctica.
5. Simplificación de circuitos. Se examinó si era posible realizar ajustes en el diseño para minimizar la cantidad de circuitos en la tarjeta probadora.
6. Diseño y Construcción de circuitos impresos (tarjeta de control análogo y tarjeta probadora) utilizando el software ORCAD. Se tuvo en cuenta el tamaño adecuado de ambas tarjetas para que se ajusten al uso didáctico.
7. Obtención y clasificación de las señales de la nueva tarjeta de control. Para esto se utilizó el plano desarrollado inicialmente. Dichas señales fueron monitoreadas en el laboratorio con el osciloscopio digital FLUKE.
8. Programación del microcontrolador (PIC18F4550-IP). Se realizó el código de programación en lenguaje C teniendo en cuenta el desarrollo de cada guía del laboratorio, los objetivos de este proyecto y el diseño electrónico de la unidad probadora.
9. Realización de pruebas de funcionamiento entre la nueva tarjeta de control análogo y la unidad mecánica FEEDBACK INSTRUMENTS. Además se utilizó el osciloscopio digital FLUKE y el multímetro para realizar las mediciones de los diferentes tipos de señales.
10. Comparación de señales de la antigua unidad analógica con las señales entregadas por la nueva unidad analógica. Se realizaron todas las prácticas de la guías del laboratorio con ambas unidades utilizando el osciloscopio digital FLUKE, el multímetro y un cronómetro para registrar los resultados.
11. Realización de pruebas de funcionamiento entre la nueva tarjeta de control análogo y su respectiva tarjeta probadora. Estas pruebas fueron hechas teniendo en cuenta el contenido de las guías del laboratorio y la respectiva programación del microcontrolador.

12. Diseño y construcción de caja acrílica para cada tarjeta basándose en el principio de funcionalidad y estética. Sus dimensiones fueron determinadas por el tamaño final de cada tarjeta.
13. Elaboración del manual de operación de la tarjeta probadora para el desarrollo de las prácticas en el laboratorio de control teniendo como base las guías estándares actuales. Dicho manual fue dedicado tanto para la pedagogía de pregrado como la de postgrado.
14. Elaboración de libro final del proyecto de grado. Se realizó teniendo en cuenta los alcances del proyecto de grado y su respectiva investigación para el desarrollo del mismo.

Tiempo Actividad	Mes 1	Mes 2	Mes 3	Mes 4	Mes 5	Mes 6	Mes 7
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							
8							
9							
10							
11							
12							
13							
14							

Tabla 7.1 Cronograma de actividades

A continuación se hará una descripción detallada de los componentes del proyecto.

Resistencias	
R 500K Ω $\pm$ 1%	X1
R 1M Ω $\pm$ 0.5%	X2
R 2M Ω $\pm$ 1%	X1
R 100K Ω $\pm$ 0.5%	X15
R 10K Ω $\pm$ 1%	X8
R 330K Ω $\pm$ 1%	X1
R 200K Ω $\pm$ 1%	X7
R 1K Ω $\pm$ 1%	X14

Tabla 7.2 Especificaciones de resistencias utilizadas en el proyecto.

Dispositivo	Cantidad
Microcontrolador PIC18F4550-I/P	X 1
Multiplexores análogos DC4051BE	X6
Transistores spst DG212DJ	X2
Potenciómetros lineales	X6
Amplificadores operacionales LM 348N	X2
Resistencias	X47
Conector DC	X1
Conector AC con polo a tierra	X1
Conector de 34 pines macho/hembra	X1
Conector de 40 pines macho/hembra	X2
Conector de 26 pines macho/hembra	X2
Ditswichs de 6 interruptores	X2
Tarjeta de control impresa de alta calidad	X1
Tarjeta probadora impresa de alta calidad	X1
Diodos zener IN4148	X2
Diodos conmutación rápida BZX55C	X2
Condensadores de tantalio 0.1uf	X19
Condensadores de poliéster 1uf	X8
Condensadores cerámicos 20pf	X2
Condensador cerámico 10uf	X1
Condensador cerámico 100uf	X1
Caja acrílica	X2
Cable Ribbon 40	X2
Cable Ribbon 34	X1
Cable Ribbon 26	X2
Bornes de conexiones 2mm	X58
Bornes de conexiones 4mm	X8
Perilla metálica para potenciómetros	X6
Display LCD cristal liquido 4 líneas X 20	X1
Tapones plásticos	X8
Regleta de conectores	X6
Tornillos aseguradores	X20
Cable 110v	X1
Relés	X2
LEDs	X4
Diodos	X3
Pulsadores	X6
Switch 5V	X1

Tabla 7.3 Componentes del proyecto

Nota: todas las especificaciones de los componentes se encontraran en los archivos adjuntos a este libro.

8. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

8.1 Entrenador de servo control analógico equipado con unidad probadora de conexiones.

Esta comprendido por la unidad mecánica FEEDBACK INSTRUMENTS, la nueva unidad analógica (Analogue Unit II), la unidad probadora de conexiones y fuente de energía FEEDBACK INSTRUMENTS.

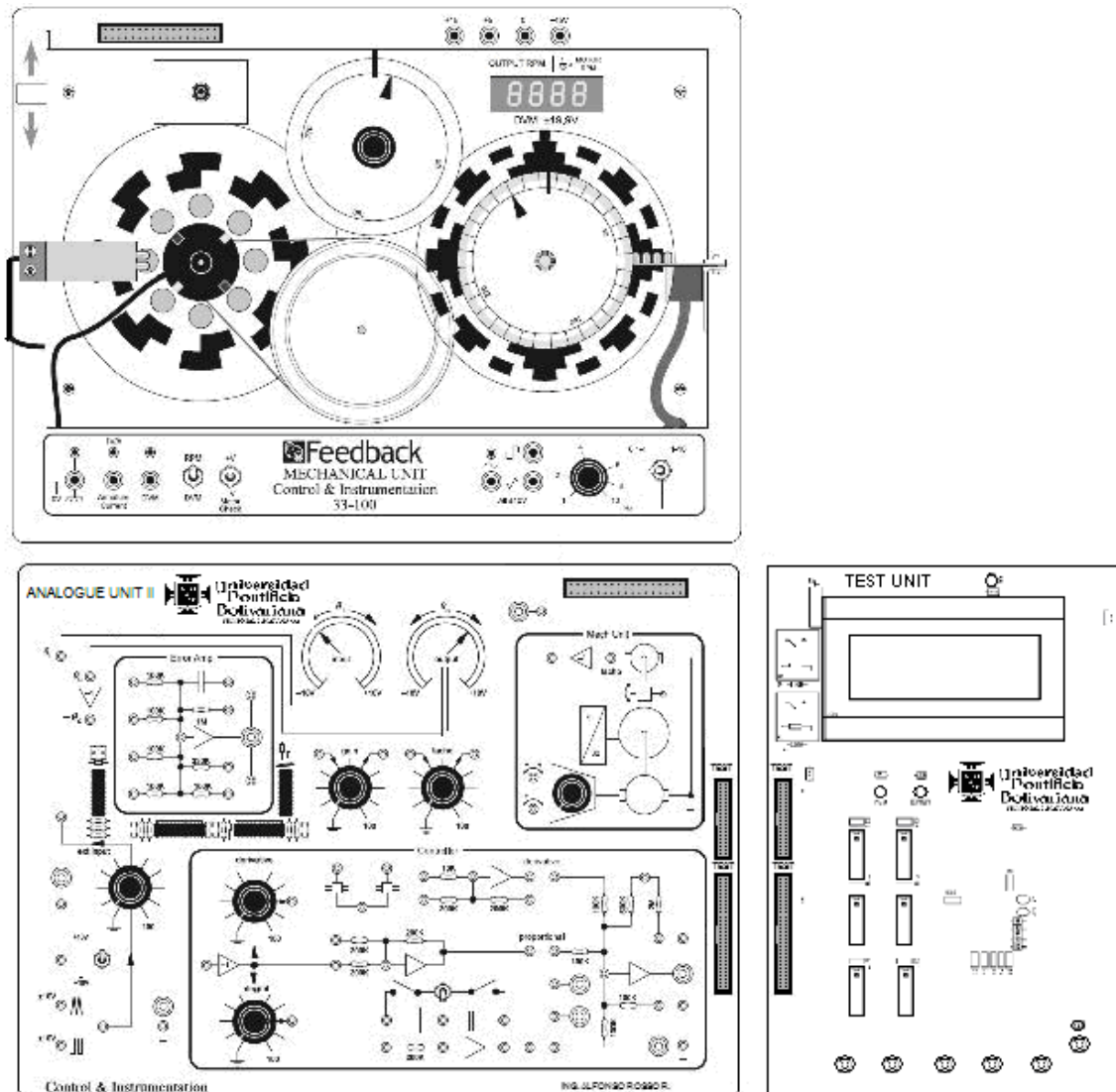


Figura 8.1 Entrenador analógico

8.2 Unidad analógica II

La unidad analógica II proporciona todos los circuitos electrónicos requeridos para la ejecución de una amplia gama de asignaciones analógicas del servocontrol, extendiéndose desde los conceptos básicos de los sistemas de control hasta la implementación del PID completo. Esta unidad es de construcción tipo (open-board) o

tarjeta abierta para uso didáctico, cuenta con un diagrama esquemático para permitir que el estudiante identifique y entienda los componentes de tales sistemas de control. La unidad mecánica esta conectada por medio de un cable de ribbon el cual también suministra la energía a la unidad analógica II. La unidad probadora esta conectada por dos cables de ribbon, esta dispone de dos puertos los cuales se utilizan para extender todos los puntos de conexión de la unidad analógica a la unidad probadora.

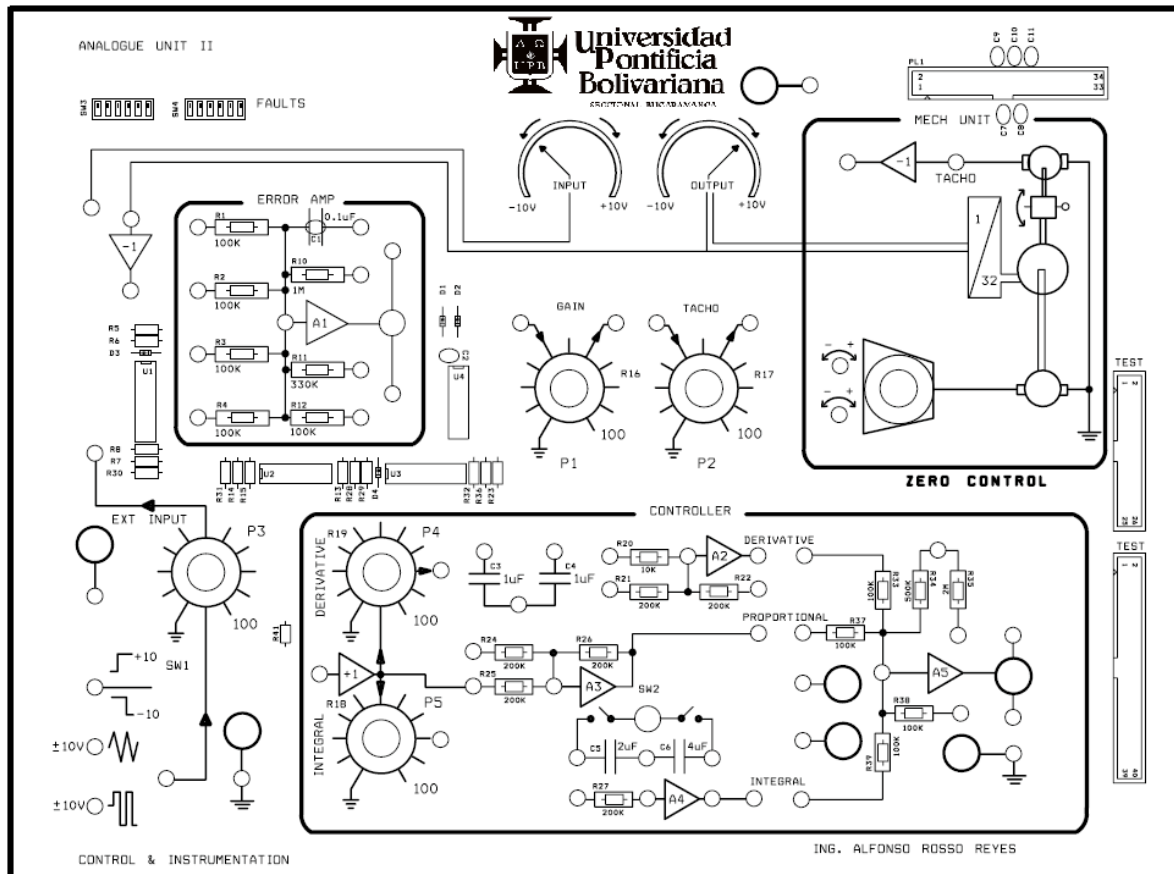


Figura 8.2 Unidad analógica II

La siguiente grafica muestra el principal cambio aparente que se efectuó al diseño de la antigua unidad analógica FEEDBACK INSTRUMENTS 33-110. Es la adición de un par de puertos de 26 y 40 pines respectivamente. Estos se utilizan para extender cada punto de conexión de la unidad analógica II con el exterior asía la unidad probadora. Estos puertos también están diseñados con el propósito de permitir extender la investigación de cualquier otro potencial proyecto. De esta manera el diseño queda abierto a la investigación y al mejoramiento de dicho modulo de entrenamiento control.

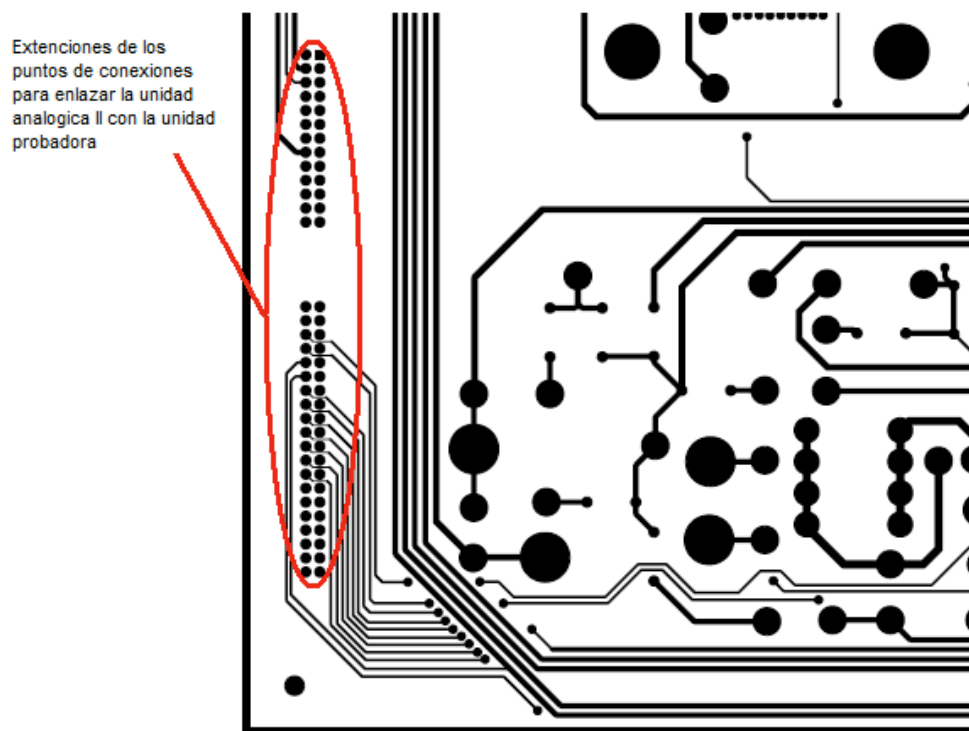


Figura 8.5 Diagrama circuitual inferior unidad analógica II (BOT).

Se realizaron cambios estructurales en el diseño de la tarjeta física recubriéndole con un blindaje (tipo maya) a prueba de ruidos externos, el cual resulta muy conveniente a la hora de evitar interferencias indeseables en el sistema.

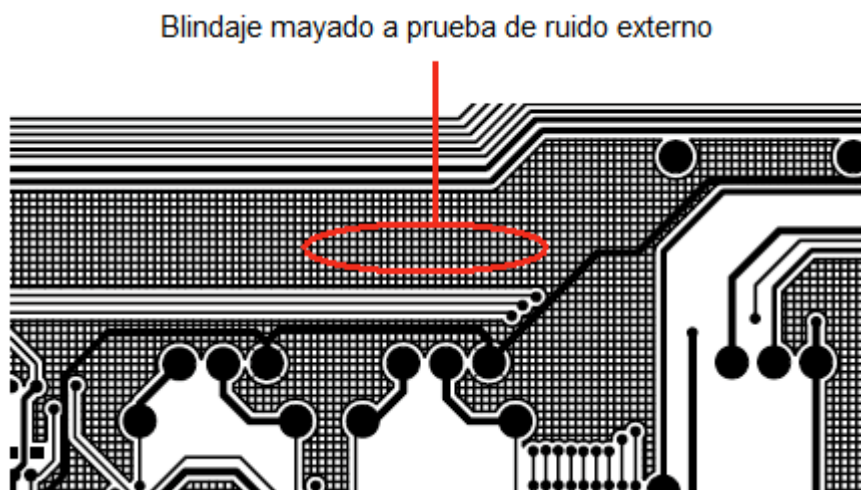


Figura 8.6 Blindaje de protección

8.3 Unidad mecánica FEEDBACK INSTRUMENTS 33-100

La unidad mecánica consiste de una tarjeta tipo (open-board) que muestra el ensamble de los mecanismos del sistema mas la parte electrónica que utiliza. Los componentes electromecánicos abarcan un motor DC, un tacogenerador analógico, una entrada analógica y unos potenciómetros de salida, un codificador digital absoluto e incremental y un freno magnético. La parte eléctrica abarca: un amplificador de potencia, un generador de formas de onda seno, cuadrada y triangular de baja frecuencia para propósitos de pruebas; circuito lector decodificador y un display LCD para monitorear velocidad y voltaje (DVM). La fuente de poder para todo el entrenador es conectada a esta unidad.

Esta unidad no fue alterada en su diseño estructural. Se hace referencia a ella ya que compone al sistema entrenador como tal y además es la fuente maestra de energía del sistema.

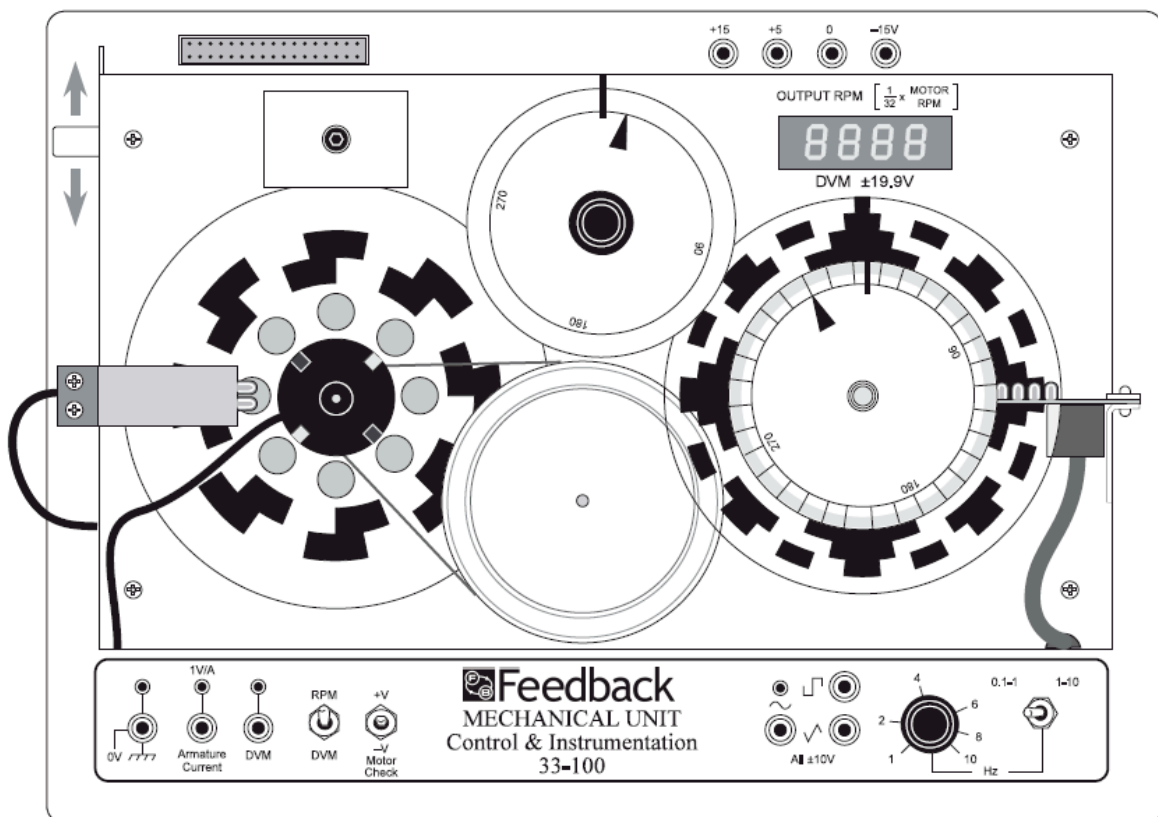


Figura 8.7 Unidad mecánica FEEDBACK INSTRUMENTS.

Puertos de conexión a la unidad mecánica, estos suministran la energía a la unidad analógica

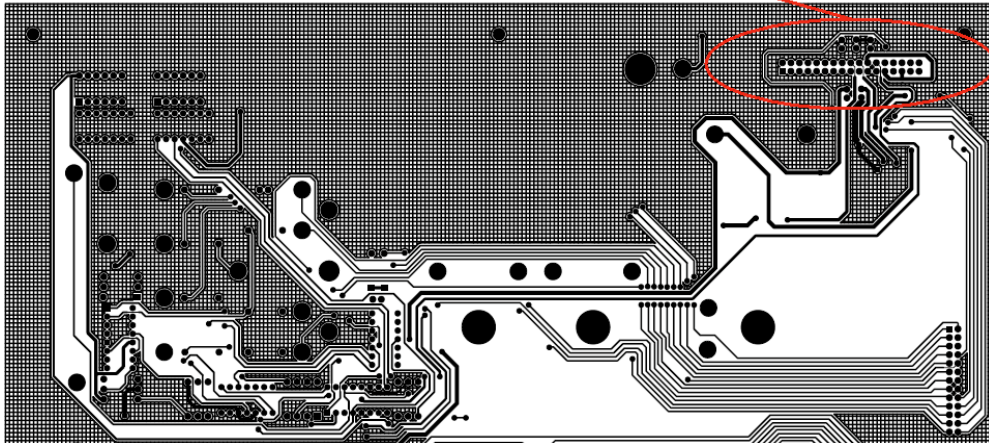


Figura 8.8 Puertos de conexión a la unidad mecánica

8.4 Unidad probadora de conexiones

Esta unidad esta conformada por un banco de multiplexores para la adquisición de datos un microcontrolador para el almacenamiento y procesamiento de información y un LCD de cristal liquido. Esta tarjeta es de construcción tipo (open-board) o tarjeta abierta para uso didáctico, cuenta con un diagrama esquemático para permitir que el estudiante identifique y entienda claramente el seguimiento de cada práctica. A este modulo es conectada la fuente de energía de todo el sistema, pues esta gestiona el voltaje para proteger la integridad del entrenador. La nueva unidad analógica esta conectada al modulo de pruebas por medio de una cinta RIBBON. Esta cinta transfiere cada punto o borne de conexión de la nueva unidad analógica al modulo de prueba de conexiones.

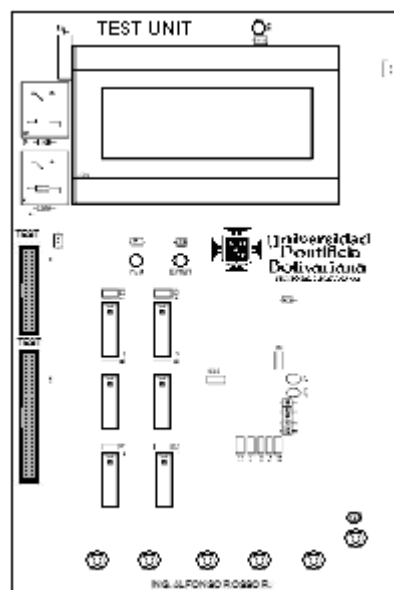


Figura 8.9 Unidad probadora de conexiones.

La ubicación de cada dispositivo en la unidad de pruebas tuvo un papel importante a la hora de ahorrar espacio y proteger la seguridad de los encapsulados especialmente del microcontrolador el cual se ubicó en la parte inferior.

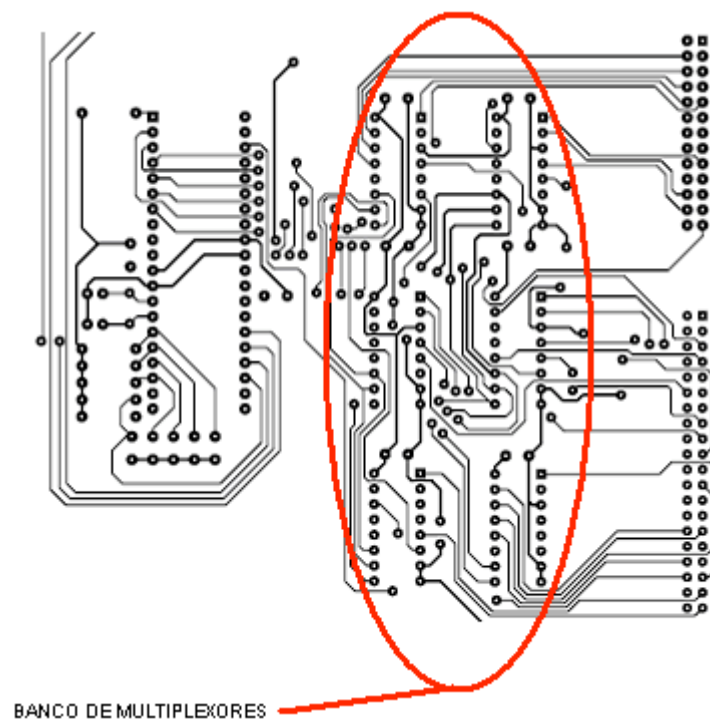


Figura 8.10 Ubicación del banco de multiplexores en la unidad de pruebas.

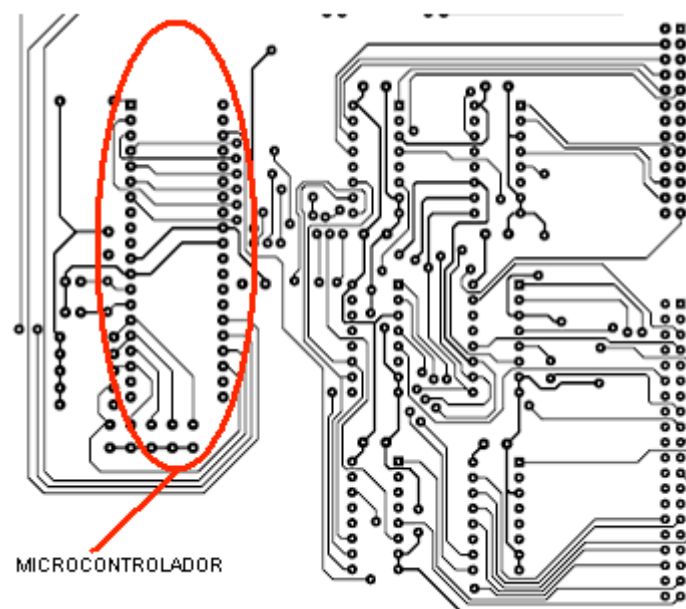


Figura 8.11 Ubicación del microcontrolador en la unidad de pruebas.

Los puertos de conexión de la nueva unidad analógica se ubicaron están paralelos a los puertos de la unidad probadora de conexiones.



Figura 8.12 Ubicación de los puertos de conexión de la unidad de pruebas

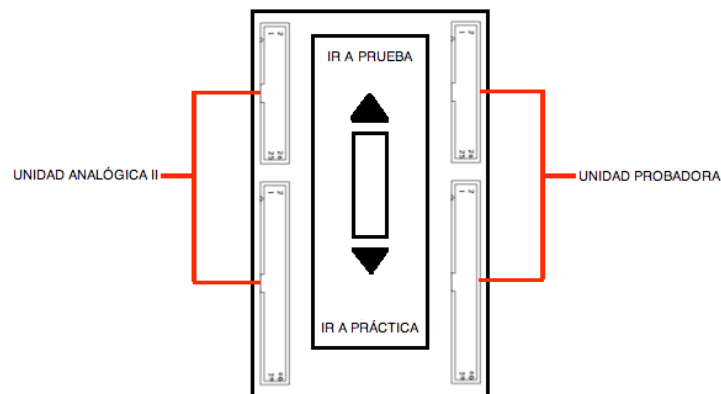
8.5 Fuente de energía FEEDBACK INSTRUMENTS

Esta fuente de energía se alimenta con 110 voltios AC tomados de la unidad probadora de conexiones y entrega 0 voltios, 5 voltios, 15 voltios y -15 voltios DC.



Figura 8.13 Fuente de energía FEEDBACK INSTRUMENTS

8.6 Conmutador de conexiones



Conmutador de conexiones de prueba

El conmutador se encarga de conectar o desconectar las conexiones de prueba con el fin de aislar las señales funcionales de la unidad analógica II de perturbaciones ocasionadas por ruido y altas impedancias provenientes de la unidad de pruebas.

Posee dos modos de manejo:

- **Modo de pruebas:** Conecta la trama para revisar las conexiones ejecutadas por el alumno.
- **Modo de práctica:** desconecta la trama para realizar la experiencia de laboratorio sin tener ningún tipo de perturbación externa en la unidad analógica II.

8.7 Resultados y análisis de datos obtenidos en el laboratorio

Para la obtención de los datos en el laboratorio utilizamos los siguientes elementos.

- FLUKE 123 Industrial Scopemeter.



Figura 8.14

- Tech TM-109



Figura 8.15

- FLUKE OC4USB optical cable for USB, USB drivers for Windows, FLUKE VIEW Scopemeter software for Windows.



Figura 8.16

A continuación se hacen las respectivas comparaciones y comentarios de los resultados obtenidos en el laboratorio de control.

Datos tomados de la unidad Feedback Instruments 33-110.

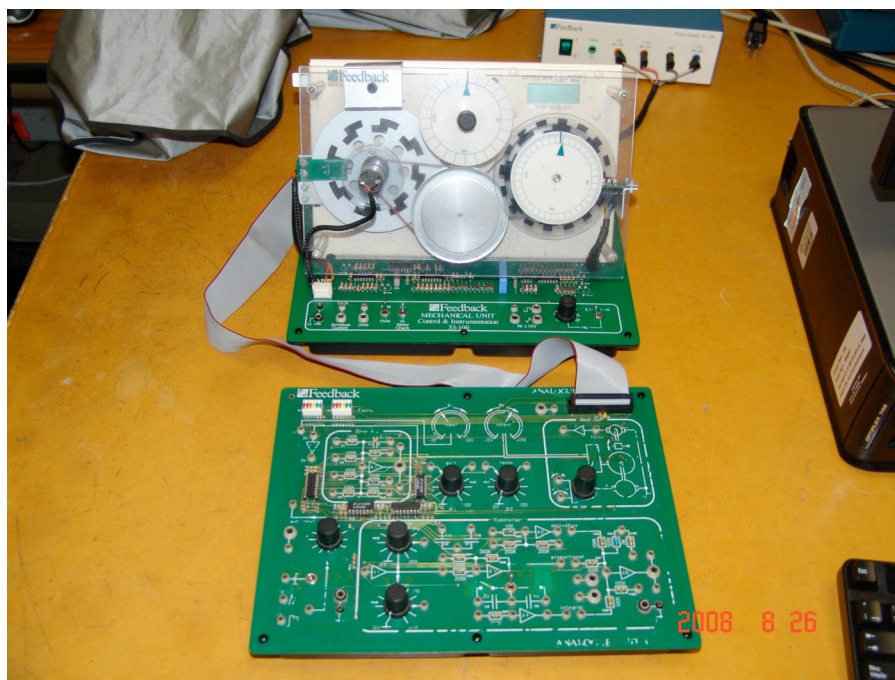


Figura 8.17 Unidades analógica y mecánica FEEDBACK INSTRUMENTS

En esta gráfica se observan los 10 voltios que entrega la unidad analógica Feedback Instruments 33-110.

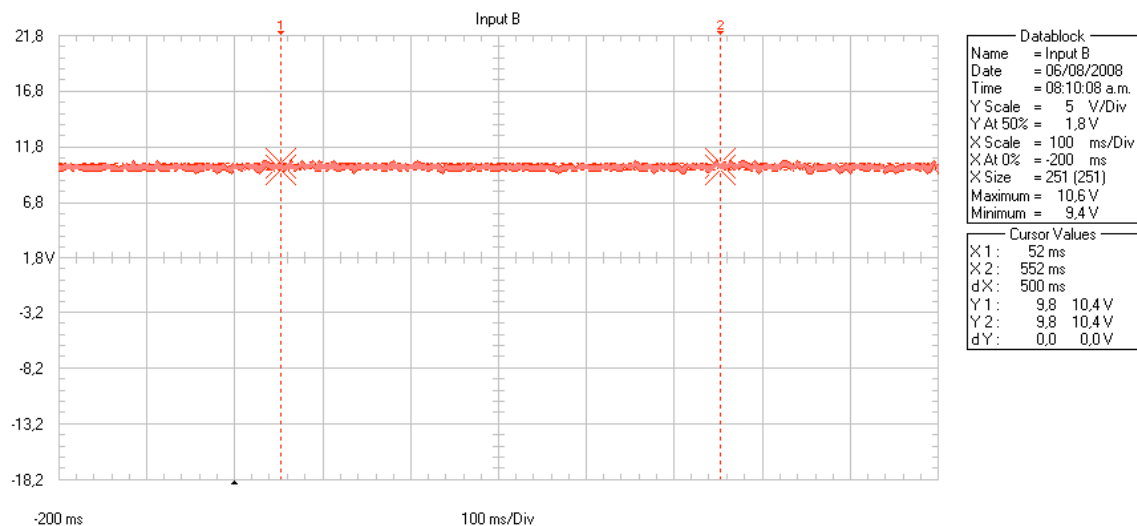


Figura 8.18

En la siguiente gráfica se observa los -10 voltios que entrega la unidad analógica Feedback Instruments 33-110.

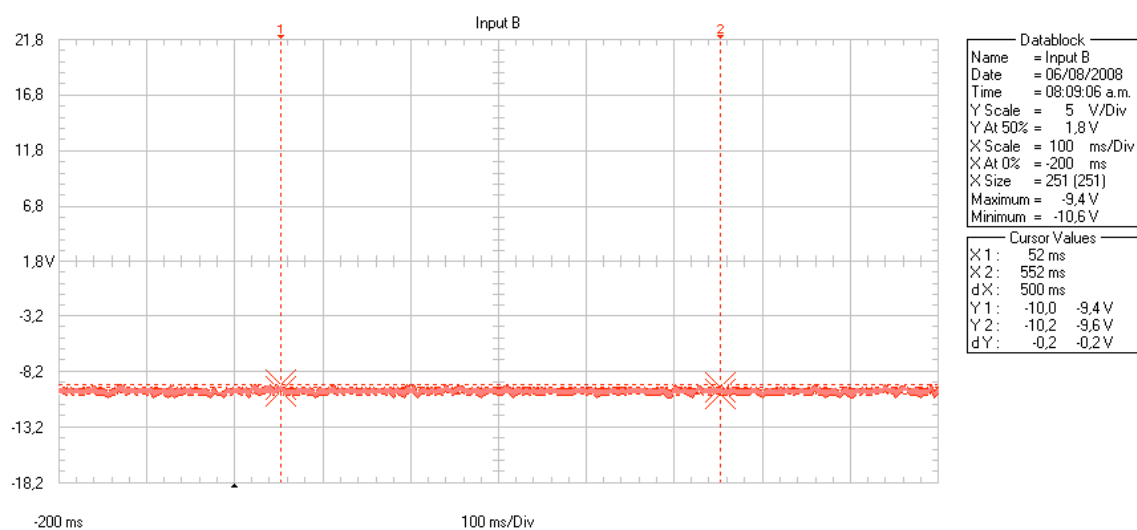


Figura 8.19

Claramente podemos afirmar que esta unidad esta generando los patrones esperados para las señales de 10 y -10 voltios DC.

La señal triangular que se observa a continuación fue entregada por la Feedback Instruments 33-110.

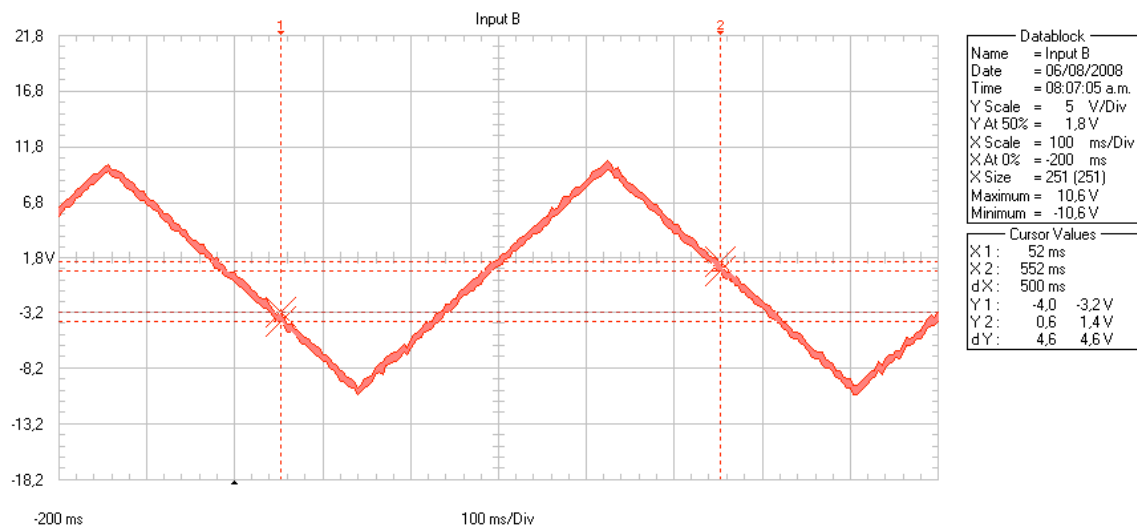


Figura 8.20

La señal cuadrada que se observa a continuación fue entregada por la Feedback Instruments 33-110.

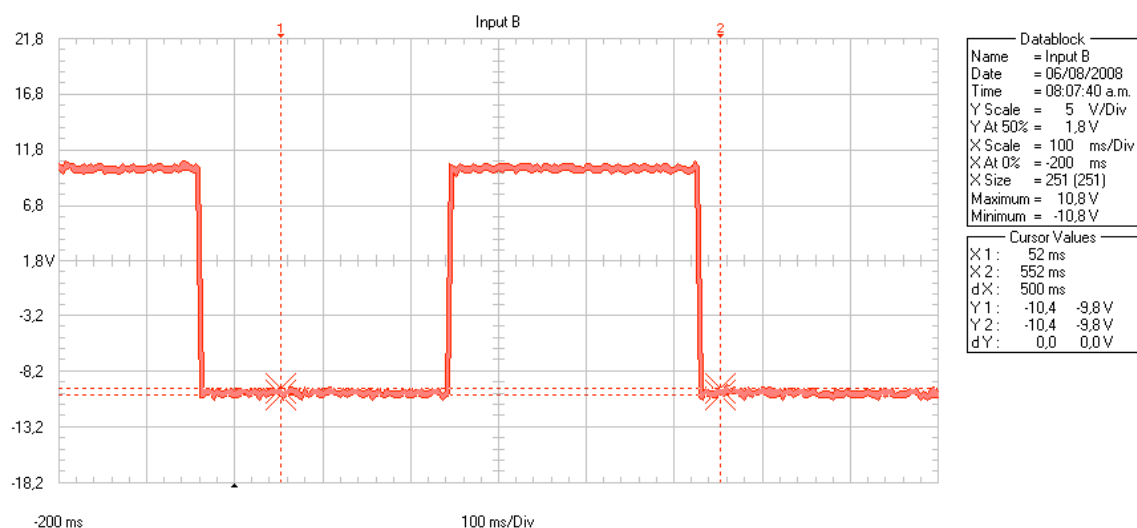


Figura 8.21

En la figura 8.22 se observan ambas señales la triangular y la cuadrada, las cuales se encuentran en fase. Los datos obtenidos corresponden con las especificaciones dadas por el fabricante FEEDBACK INSTRUMENTS.

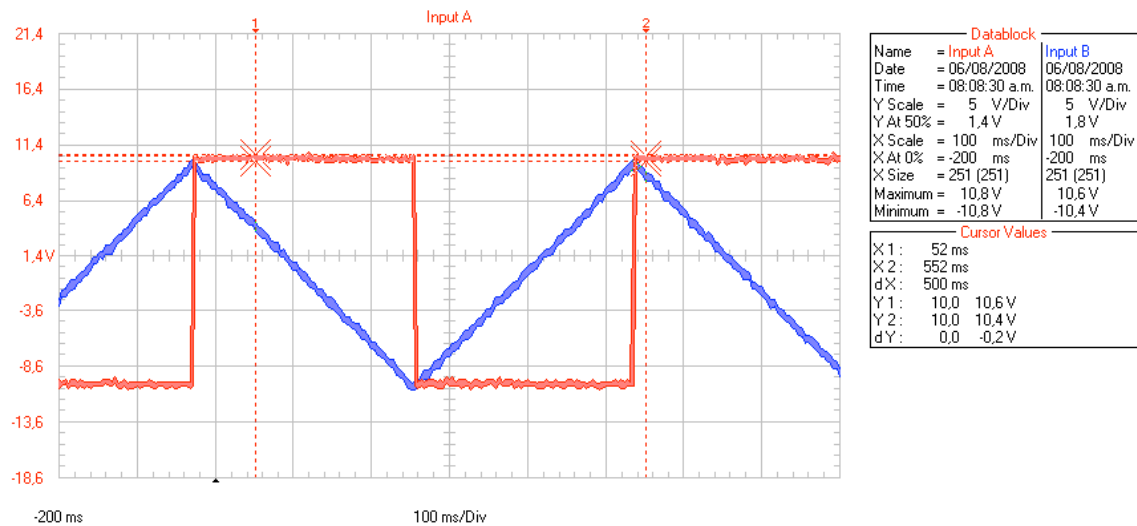


Figura 8.22

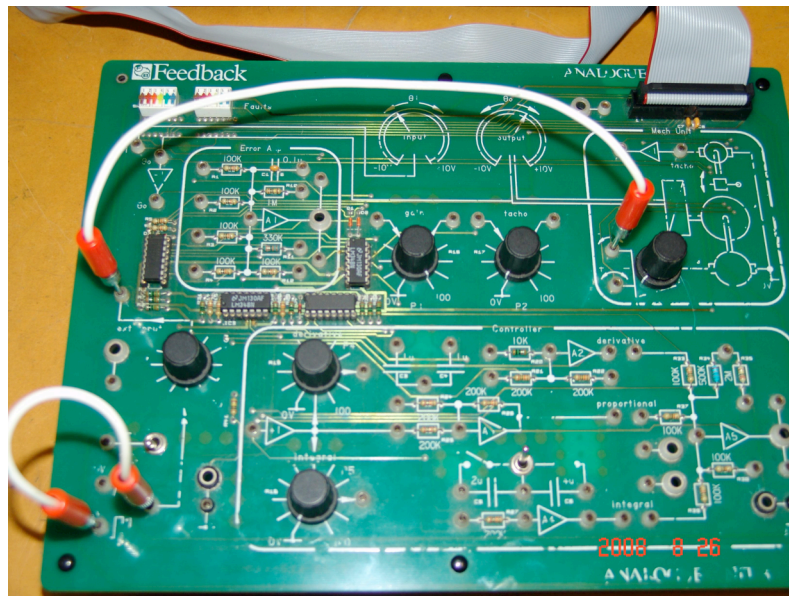


Figura 8.23

La figura 8.23 muestra el montaje de un circuito, el cual introduce una señal cuadrada al sistema la cual aparece de color rojo en la figura 8.22. La señal azul corresponde a la señal obtenida del lazo de realimentación; a medida que aumenta la frecuencia en el generador la señal de salida va perdiendo su cualidad cuadrada. Tal como lo apreciamos en la figura 8.24

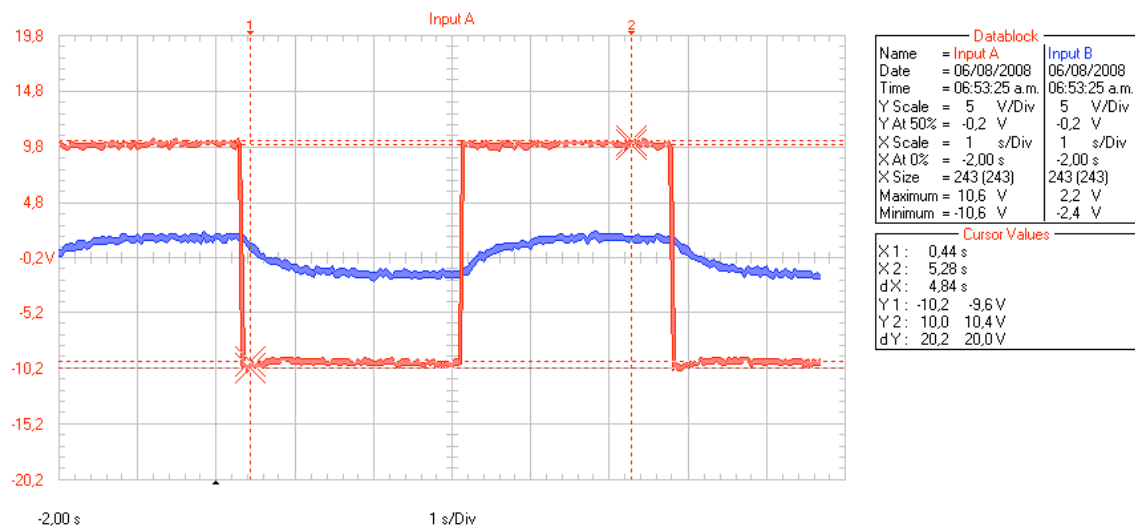


Figura 8.24 Gerador a 0.2Hz

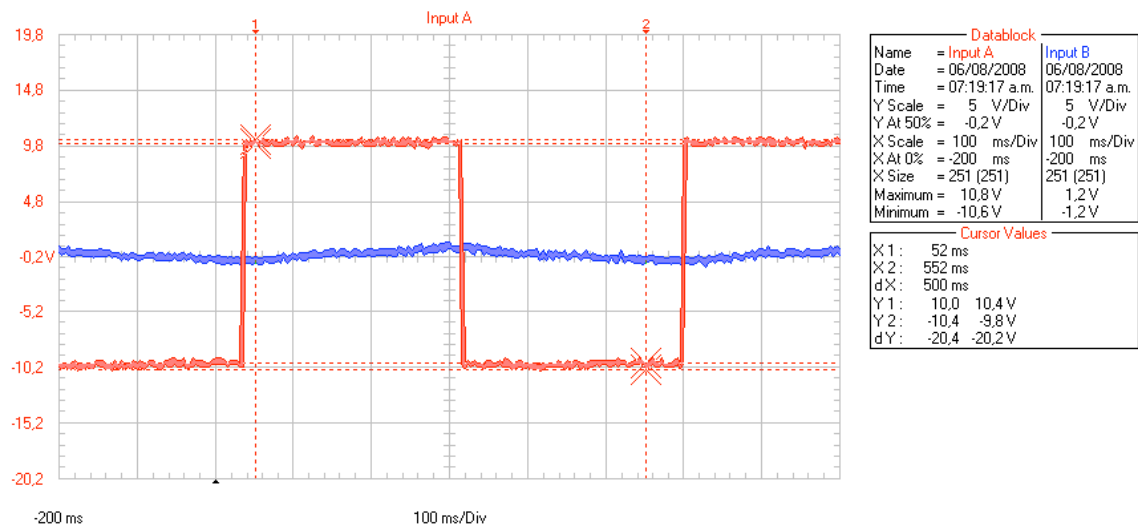


Figura 8.25 Gerador a 2HZ

Datos tomados de la nueva unidad analógica.

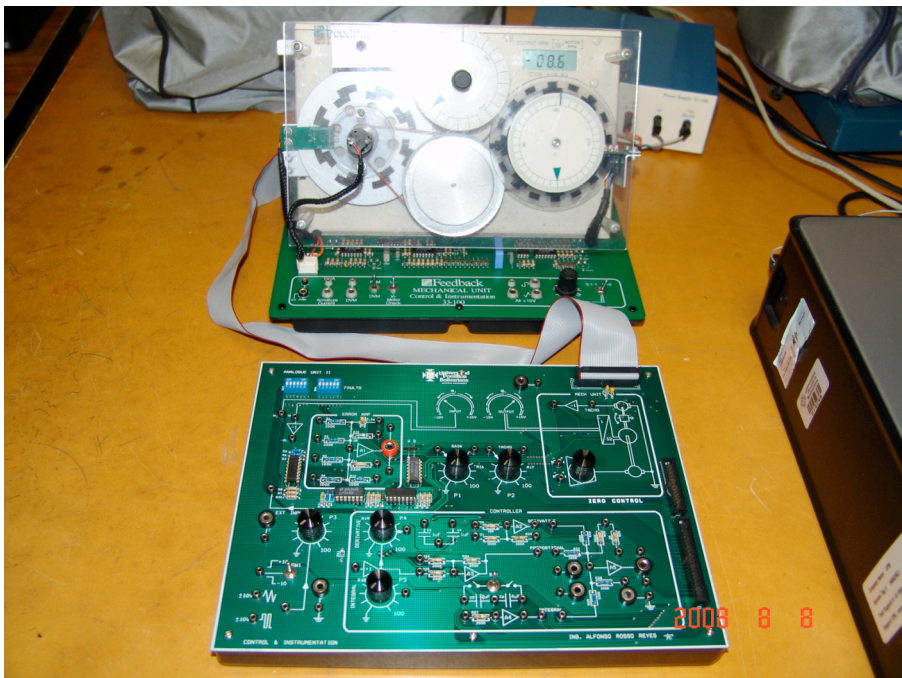


Figura 8.26 Unidad mecánica junto con el nuevo modulo analógico.

En la siguiente gráfica se observa los 10 voltios que entrega la nueva unidad analógica.

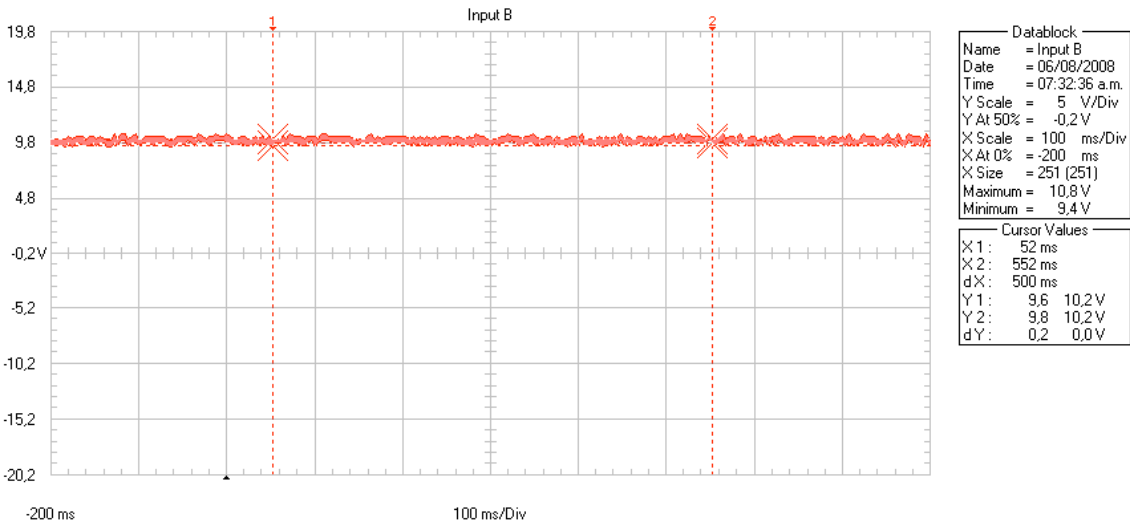


Figura 8.27

En la gráfica 8.28 se observan los -10 voltios que entrega la nueva unidad analógica.

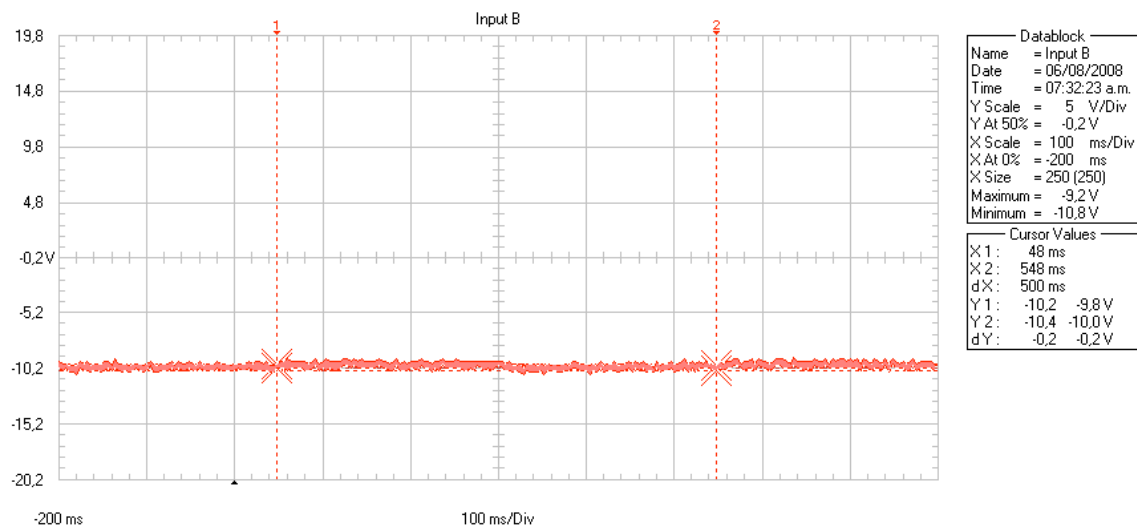


Figura 8.28

La similitud es clara, los voltajes obtenidos por ambas unidades son efectivamente 10 voltios y -10 voltios.

La señal triangular que se observa a continuación fue entregada por la nueva unidad.

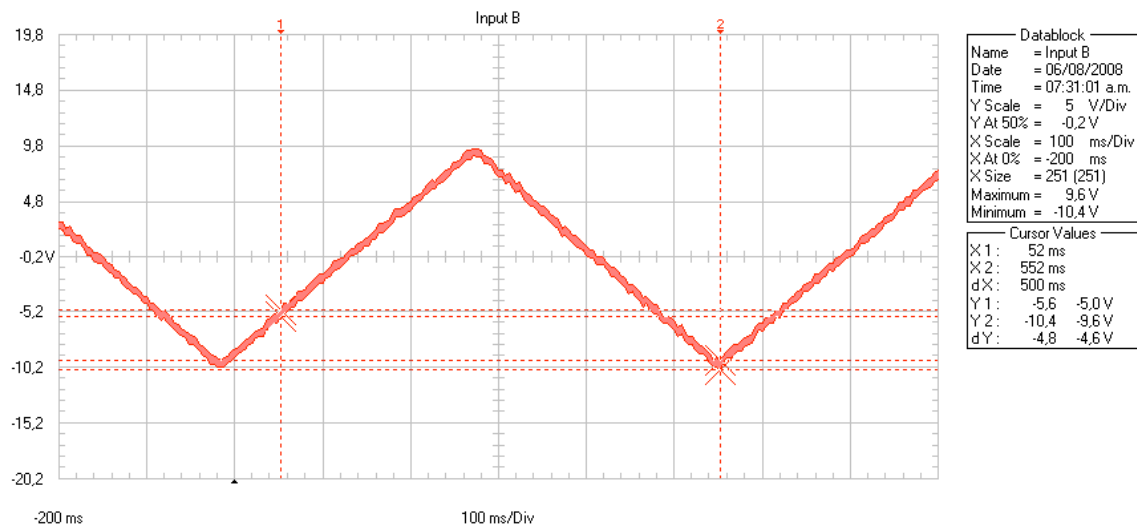


Figura 8.29

La señal cuadrada que se observa a continuación fue entregada por la nueva unidad.

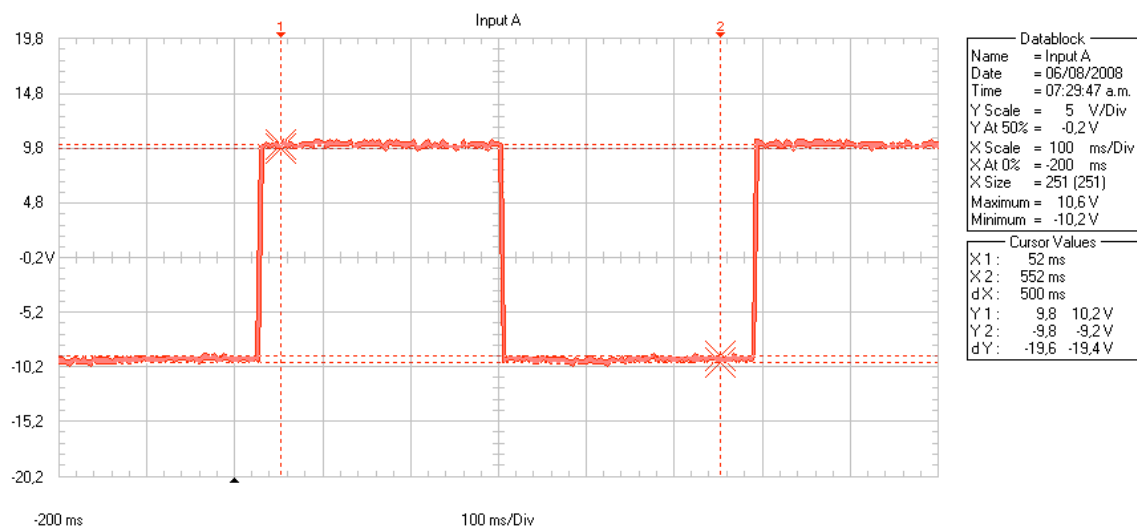


Figura 8.30

Las características de las señales son satisfactorias tanto en amplitud como en frecuencia. Esto es de vital importancia ya que el desarrollo de todas las prácticas depende la exactitud y precisión de los parámetros de estas señales.

En la figura 8.31 se ven ambas señales proporcionadas por la nueva unidad se encuentran en fase tal como las entrega la antigua unidad analógica.

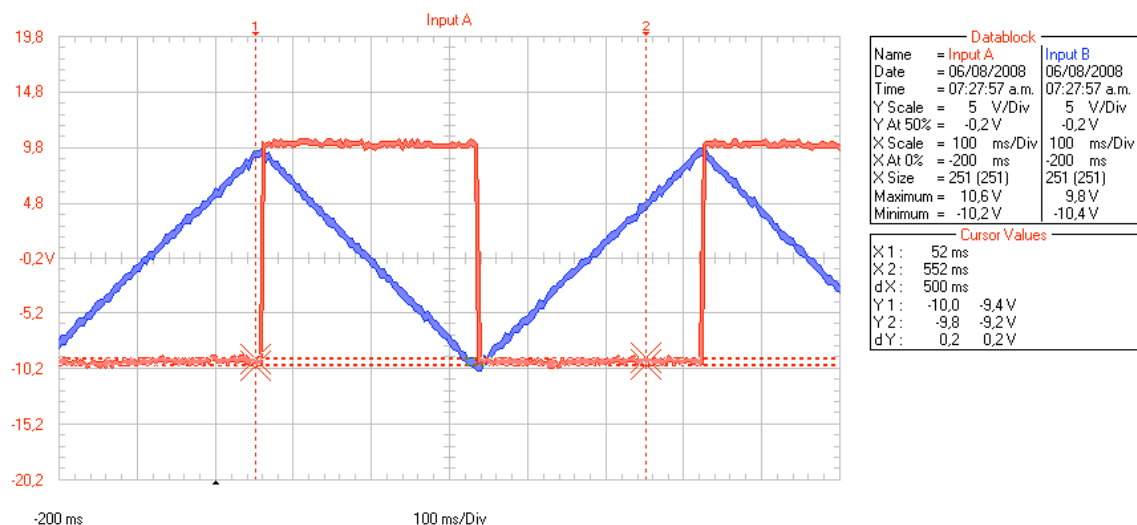


Figura 8.31

En la figura 8.32 la señal azul corresponde a la señal obtenida del lazo de realimentación; a medida que aumenta la frecuencia en el generador la señal de salida va perdiendo su cualidad cuadrada. Tal como lo apreciamos en la figura 8.33

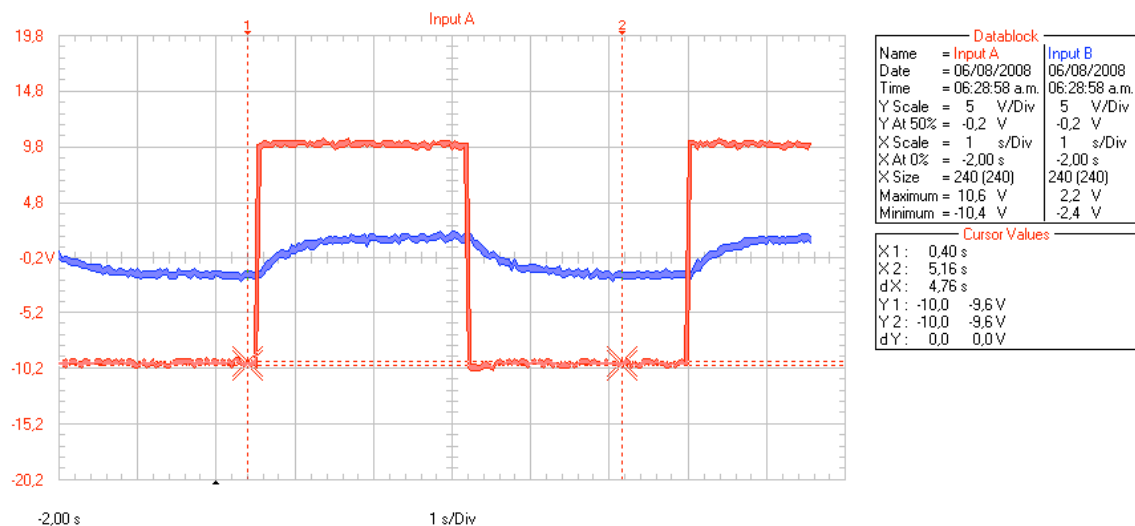


Figura 8.32 Generador a 0.2Hz.

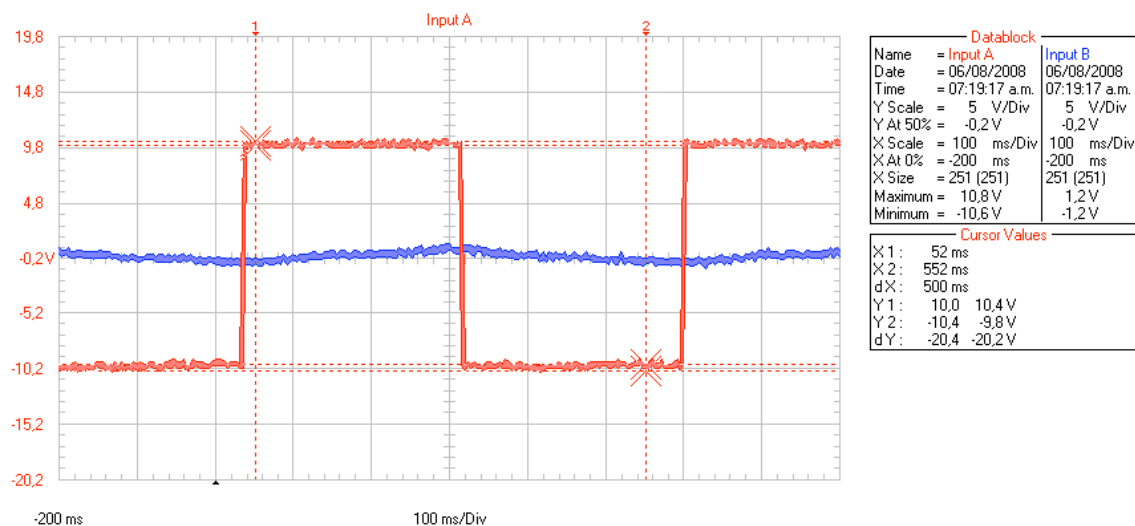


Figura 8.33 Generador a 2Hz.

Con estas pruebas ya se puede afirmar que la similitud funcional es la esperada. Sin embargo se prosiguió a realizar pruebas a todo el controlador para terminar de corroborar el correcto funcionamiento de la nueva unidad analógica.

AMPLIFICADOR OPERACIONAL COMO DERIVADOR

Datos obtenidos de la unidad analógica Feedback Instruments 33-110.

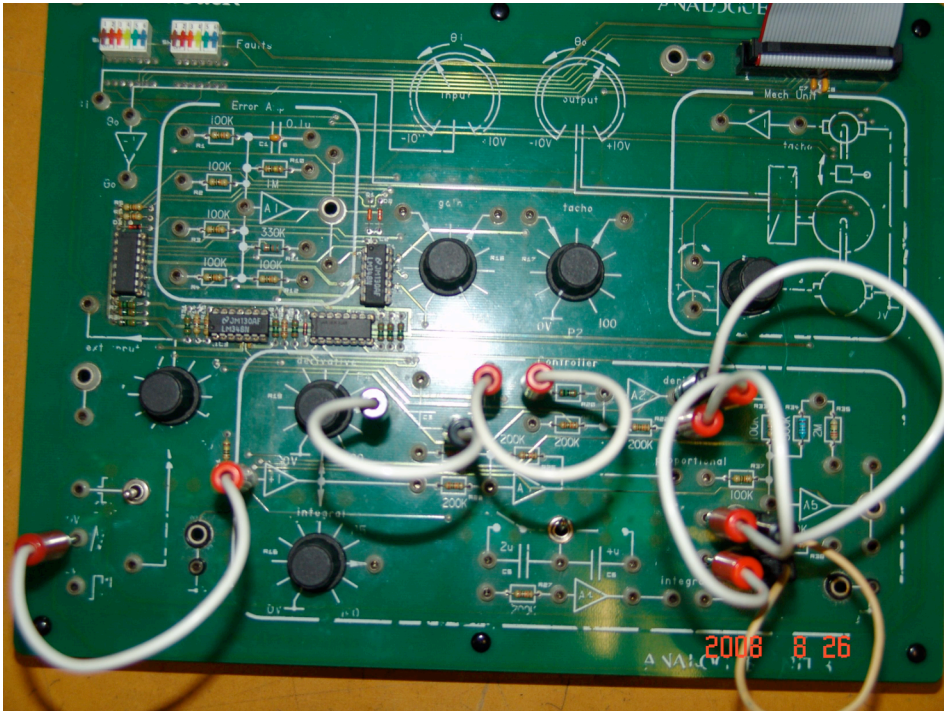


Figura 8.34

Utilizando la capacitancia de 1 μ f.

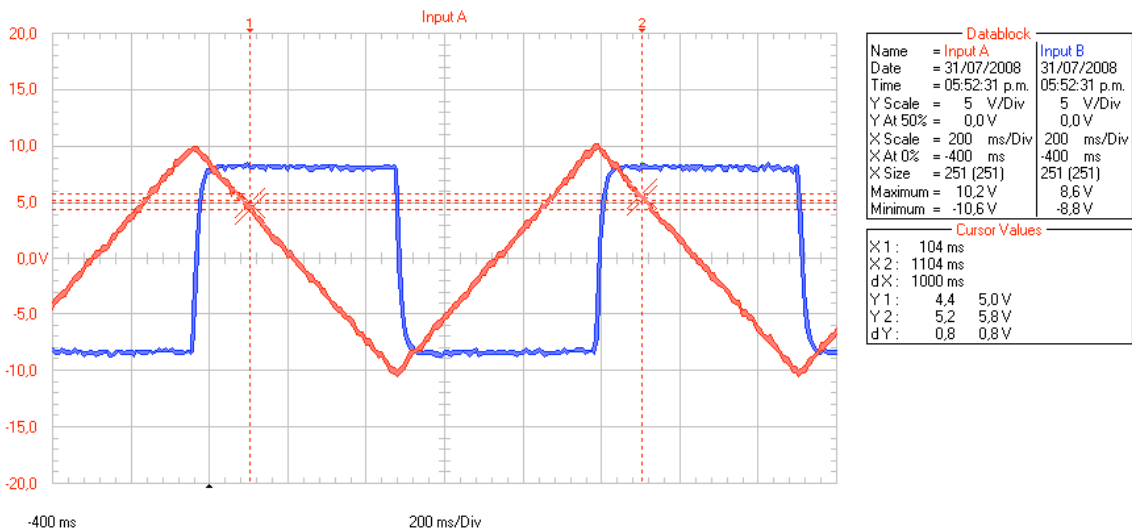


Figura 8.35

Utilizando la capacitancia de 0.5 μ f.

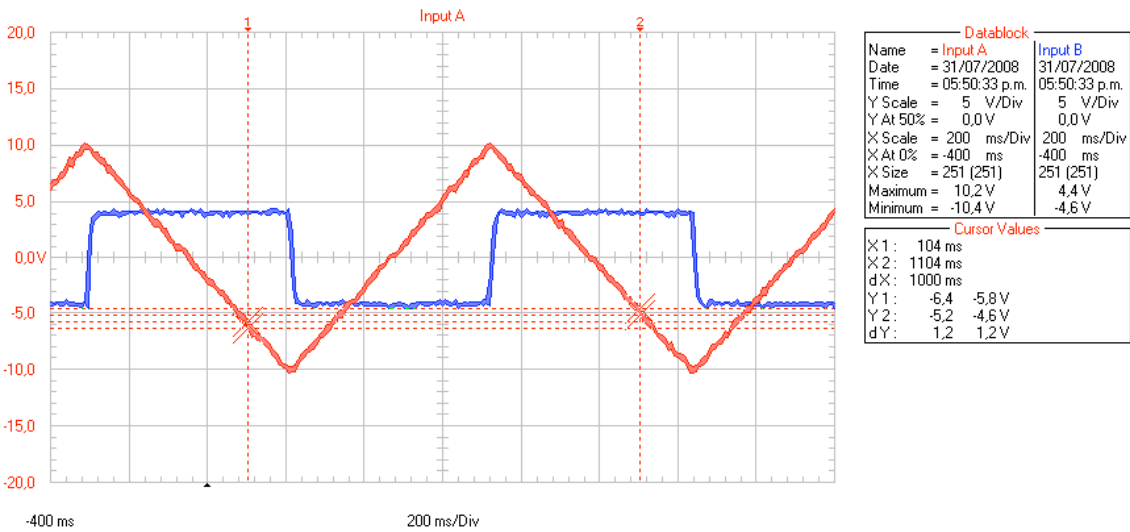


Figura 8.36

En estos resultados se observa que al disminuir la capacitancia aumenta la señal a la salida del derivador.

Datos obtenidos de la ANALOGUE UNIT II.

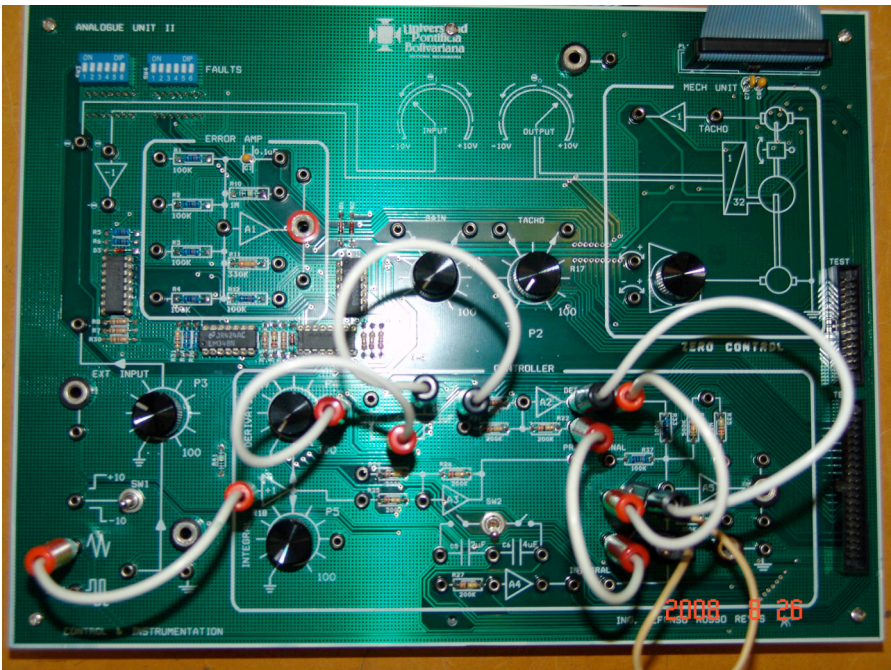


Figura 8.37

Utilizando la capacitancia de 1 μf .

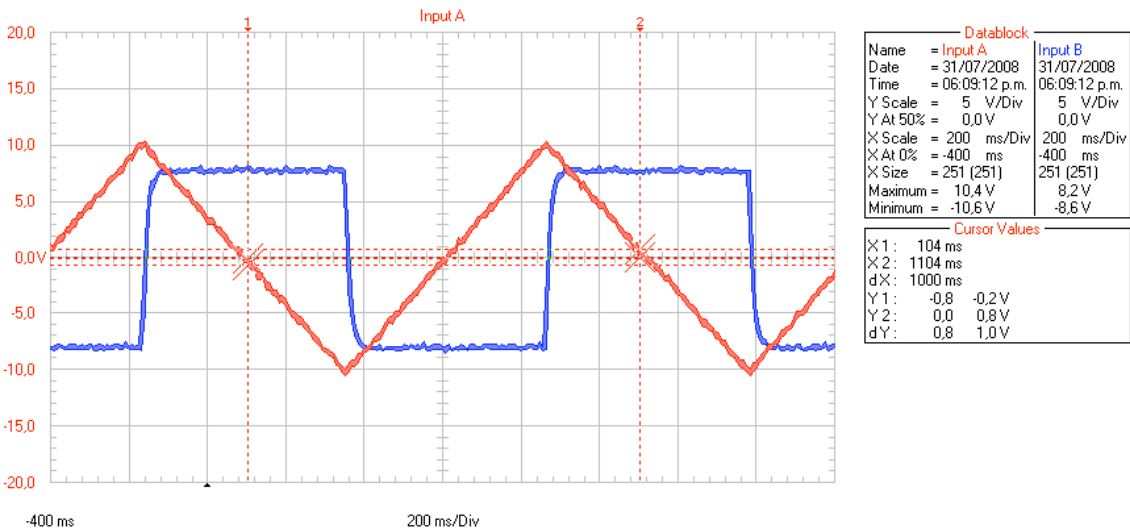


Figura 8.38

Utilizando la capacitancia de 0.5 μf .

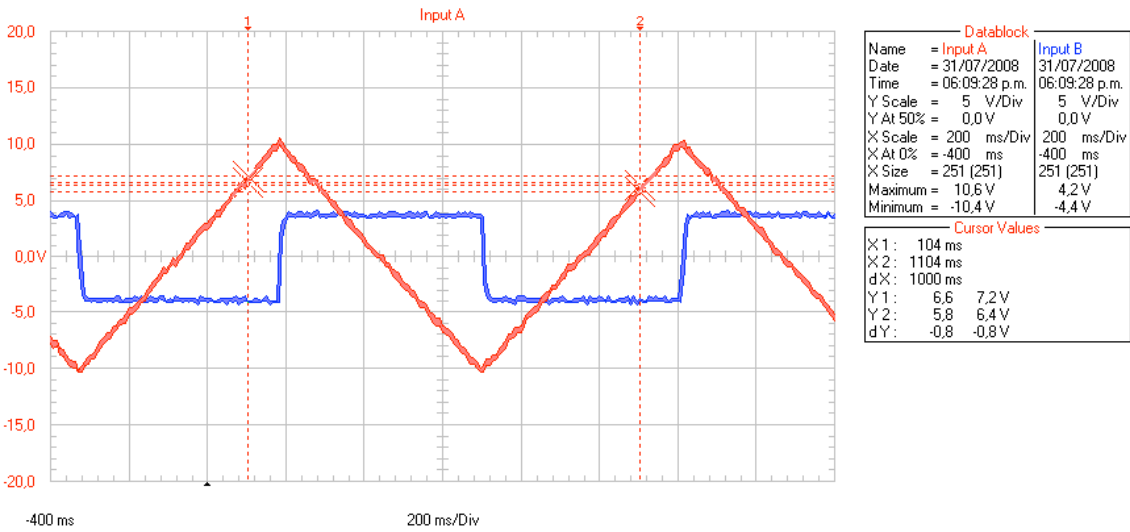


Figura 8.39

De igual modo la nueva unidad analógica entrega los resultados esperados con una capacitancia de 1 μf y 0.5 μf respectivamente.

AMPLIFICADOR OPERACIONAL COMO INTEGRADOR

Datos obtenidos de la unidad analógica Feedback Instruments 33-110.

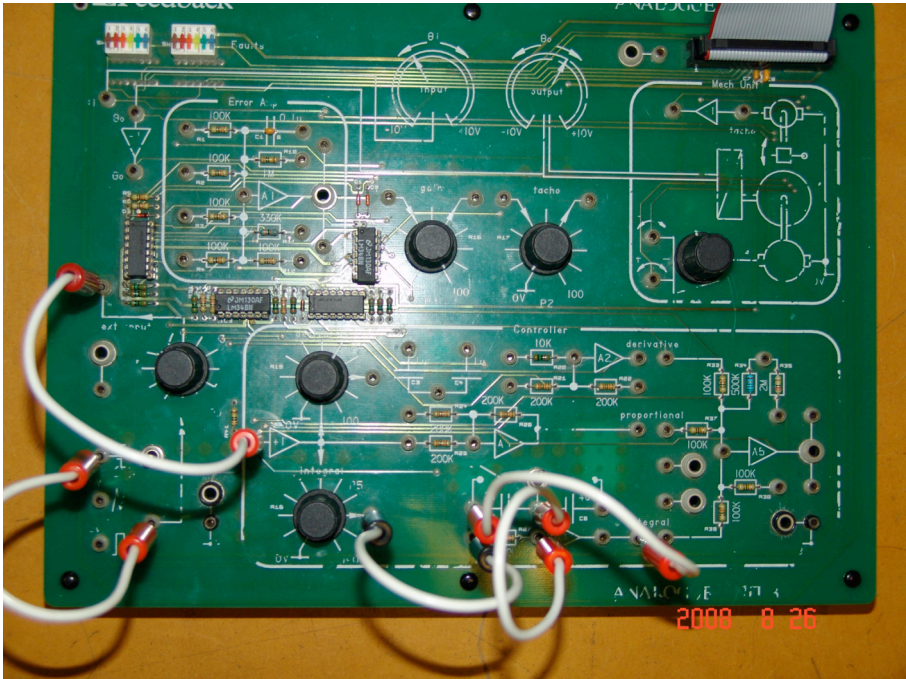


Figura 8.40

El tiempo que transcurre mientras la salida del integrador alcanza el máximo voltaje es de 5 segundos.

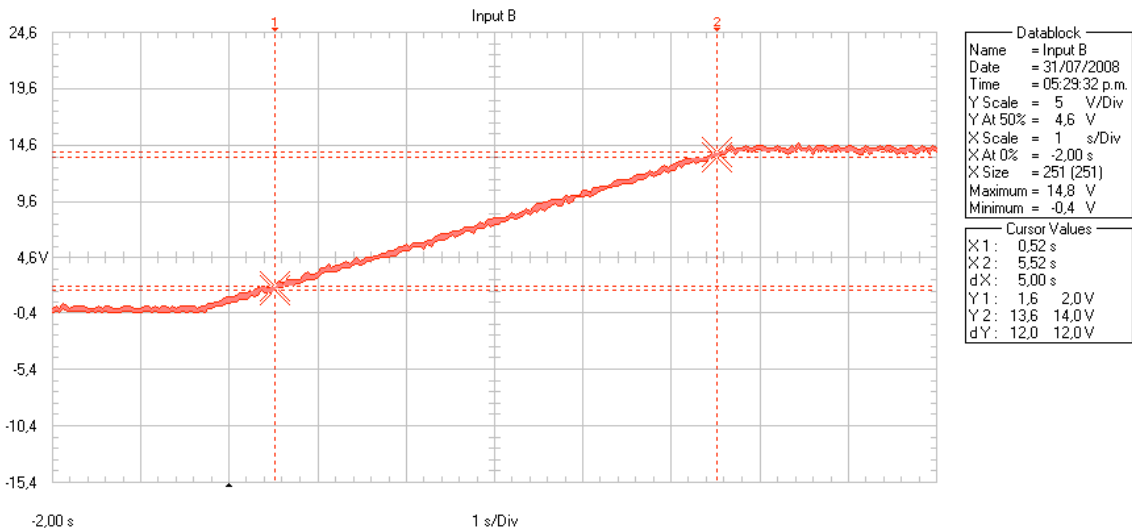


Figura 8.41

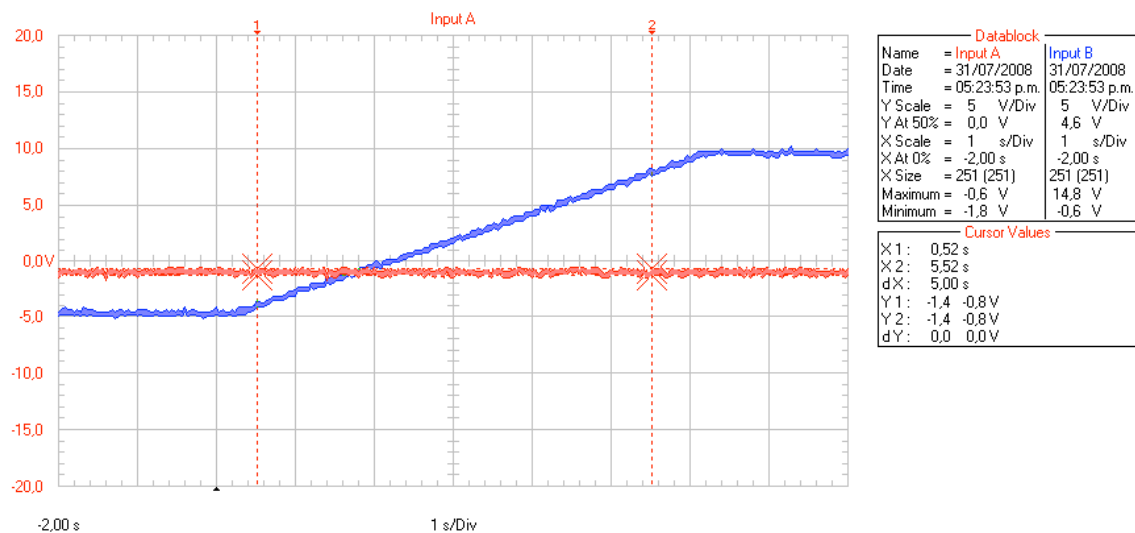


Figura 8.42

Datos obtenidos de la ANALOGUE UNIT II.

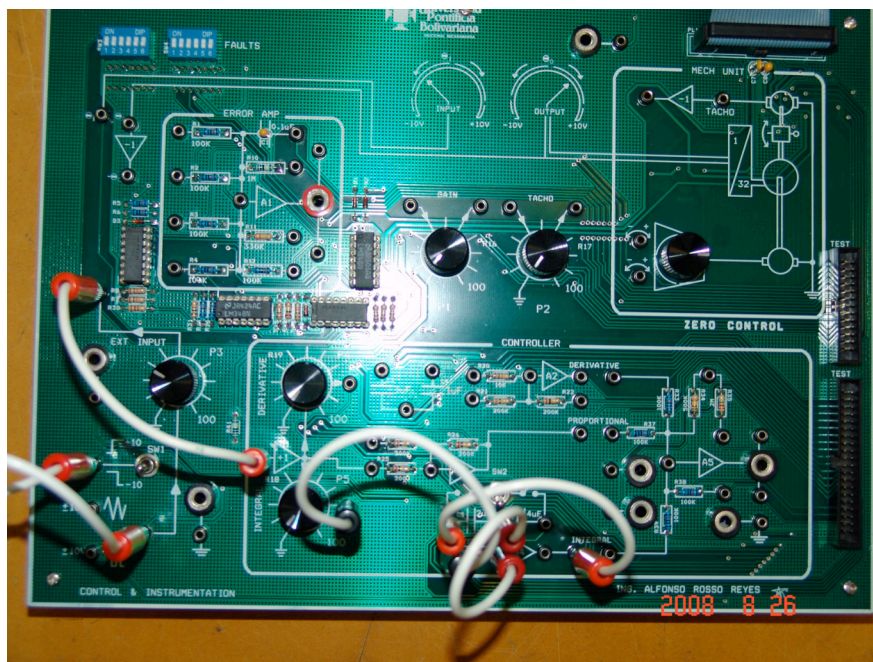


Figura 8.43

En esta unidad de igual modo transcurren 5 segundos en alcanzar el mismo voltaje.

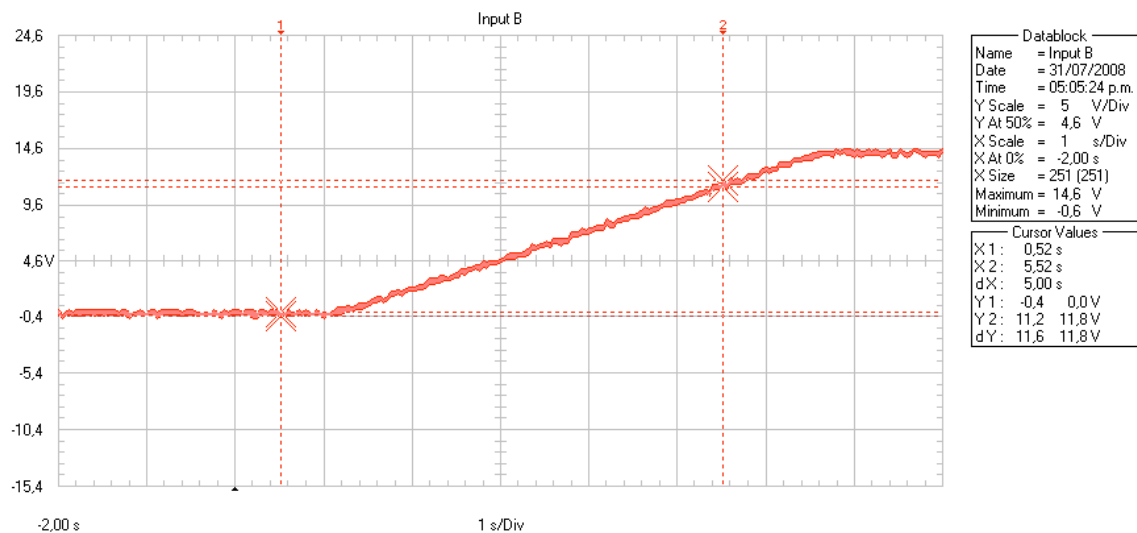


Figura 8.44

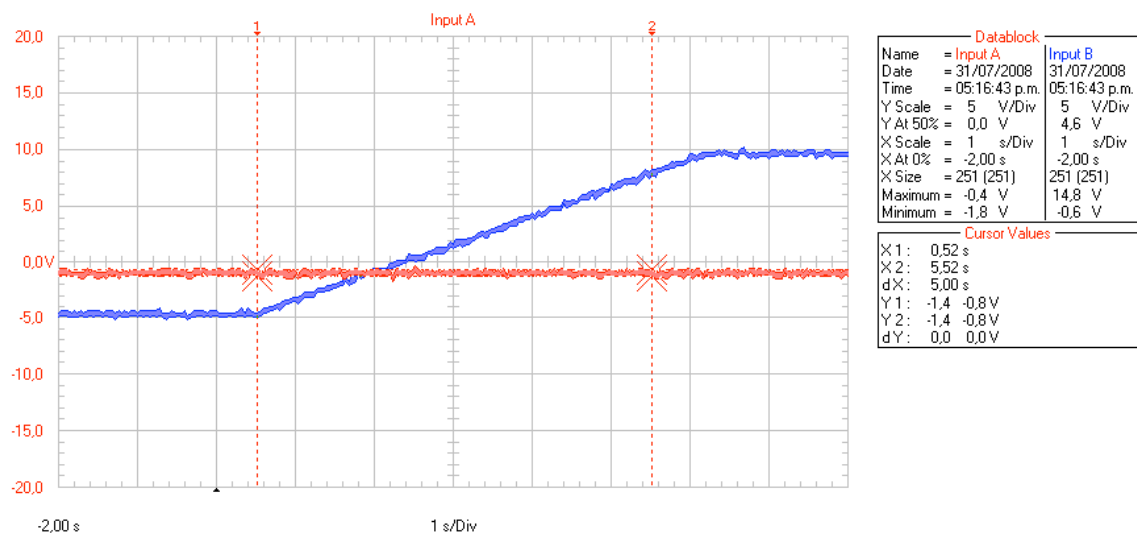


Figura 8.45

Como se puede observar en las figuras 8.43 y 8.45 ambas unidades arrojaron resultados idénticos en cuanto a voltaje y tiempo, demostrando que la nueva unidad de control trabaja satisfactoriamente.

REALIZACIÓN DEL CONTROLADOR PID O DE TRES TERMINOS

Datos de la unidad feedback Instruments 33-110.

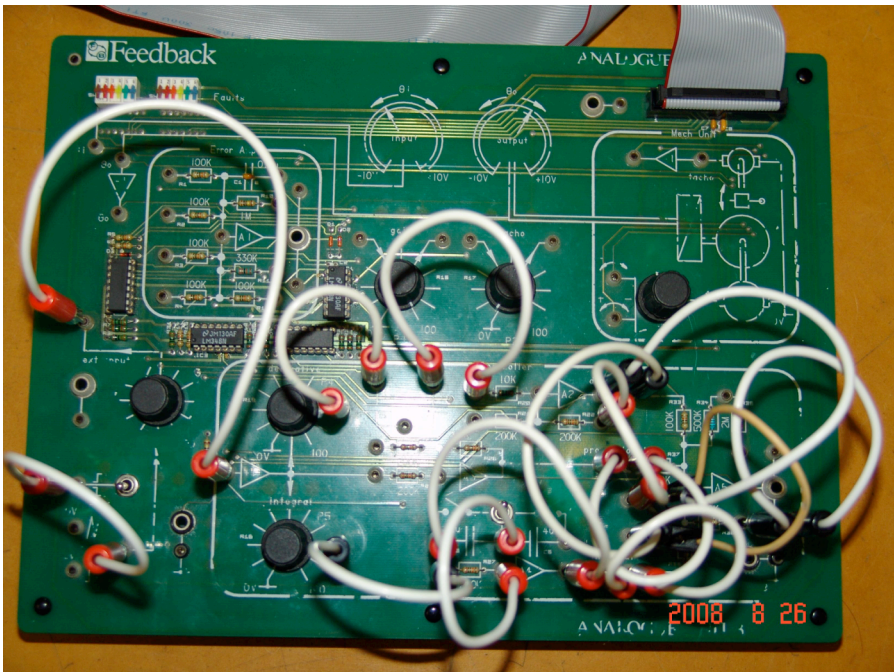


Figura 8.46

Control proporcional

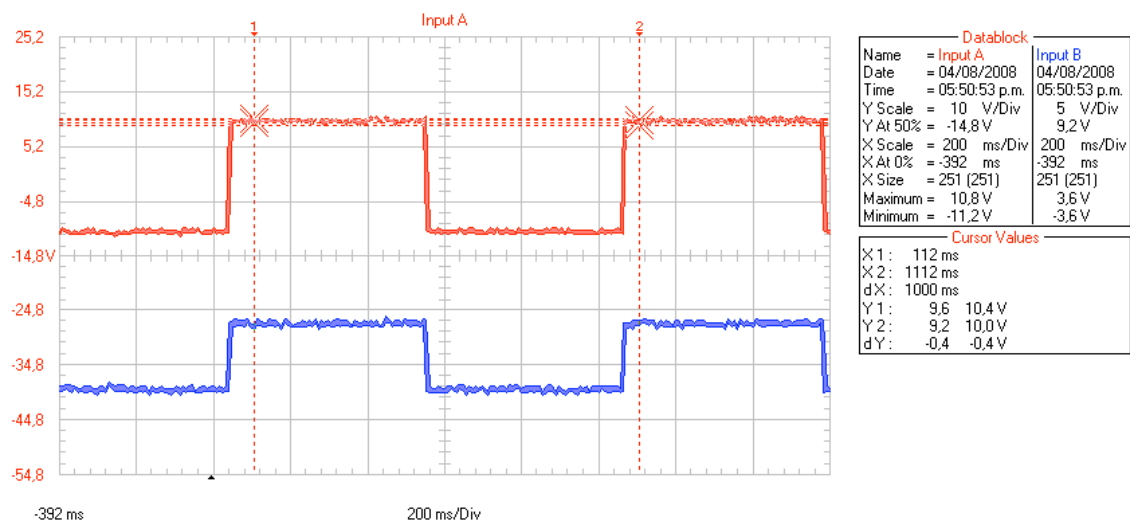


Figura 8.47

Control integral

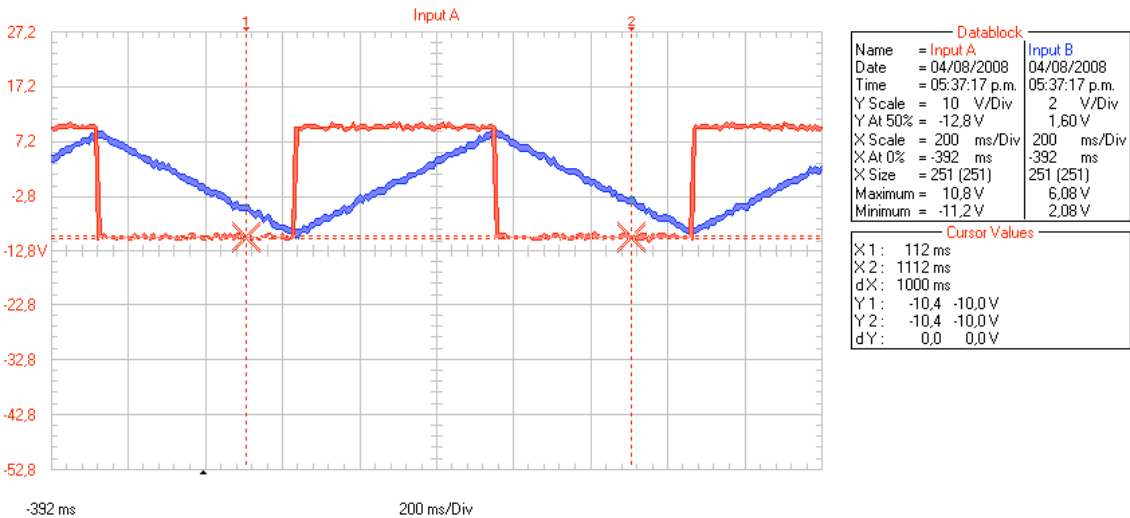


Figura 8.48

Control derivativo

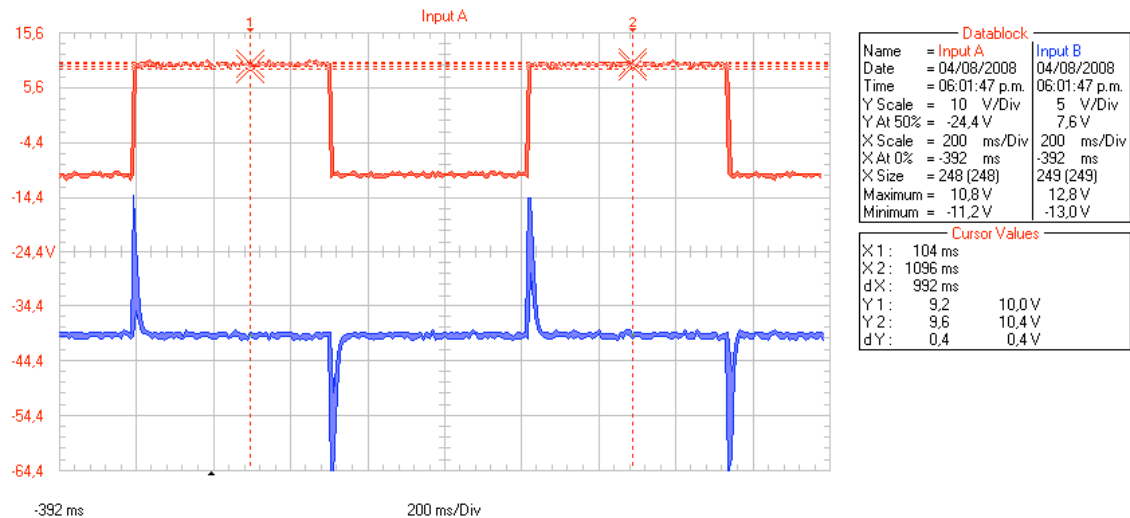


Figura 8.49

Controlador P.I.D. o de tres términos

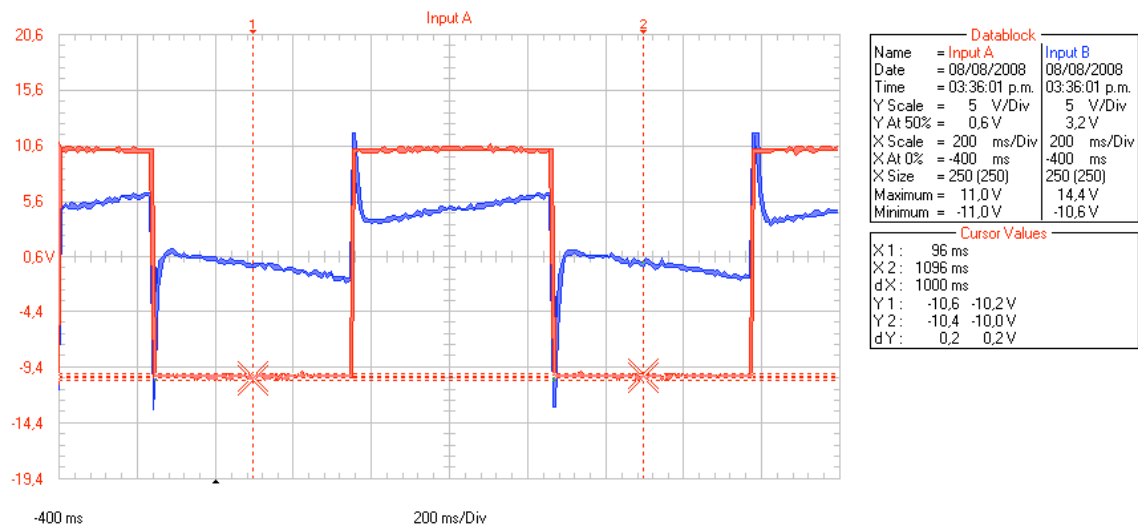


Figura 8.50

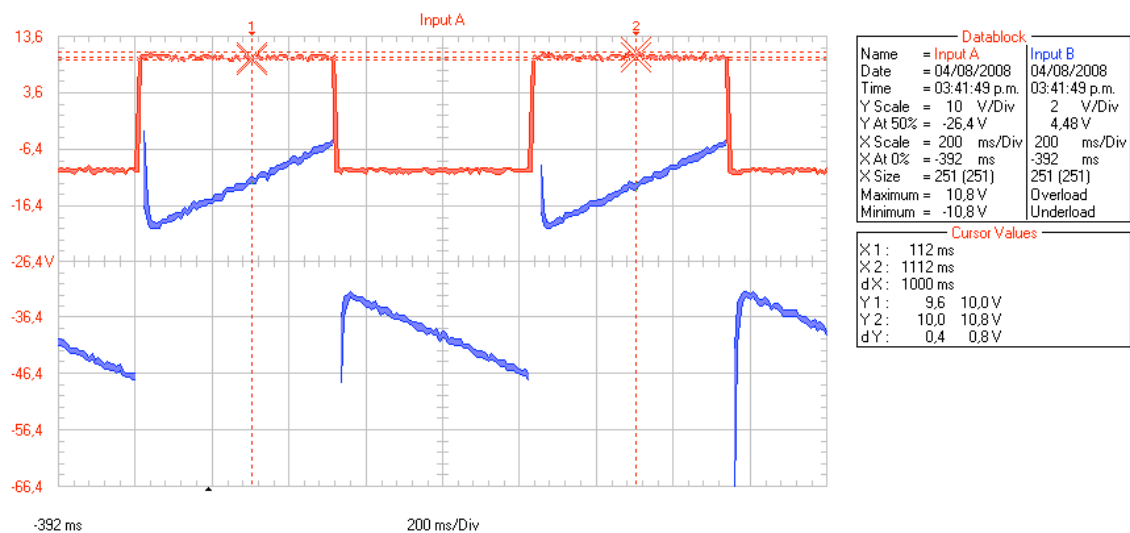


Figura 8.51

Las señales observadas corresponden correctamente a las descritas en las guías de la experiencia y la teoría adjuntada en este libro; lo cual nos da un estándar para comparar con la nueva unidad de control.

Datos obtenidos de la ANALOGUE UNIT II.

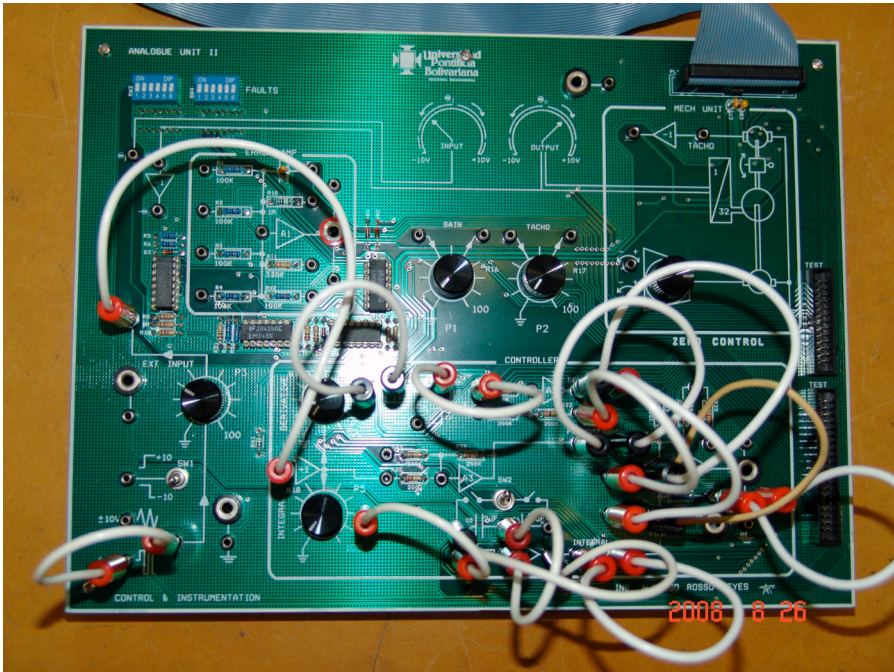


Figura 8.52

Control proporcional.

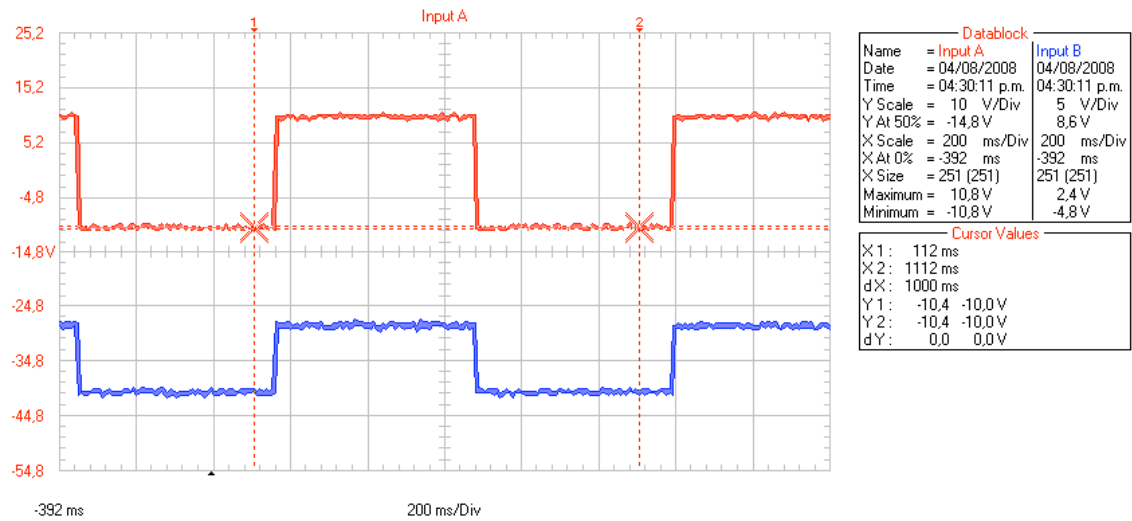


Figura 8.53

Como se observa la entrada en azul es proporcional a la salida en rojo solo que el valor de la magnitud es inferior. Esto es debido a que la señal de entrada es introducida en un amplificador operacional como seguidor con ganancia de +1.

Control integral.

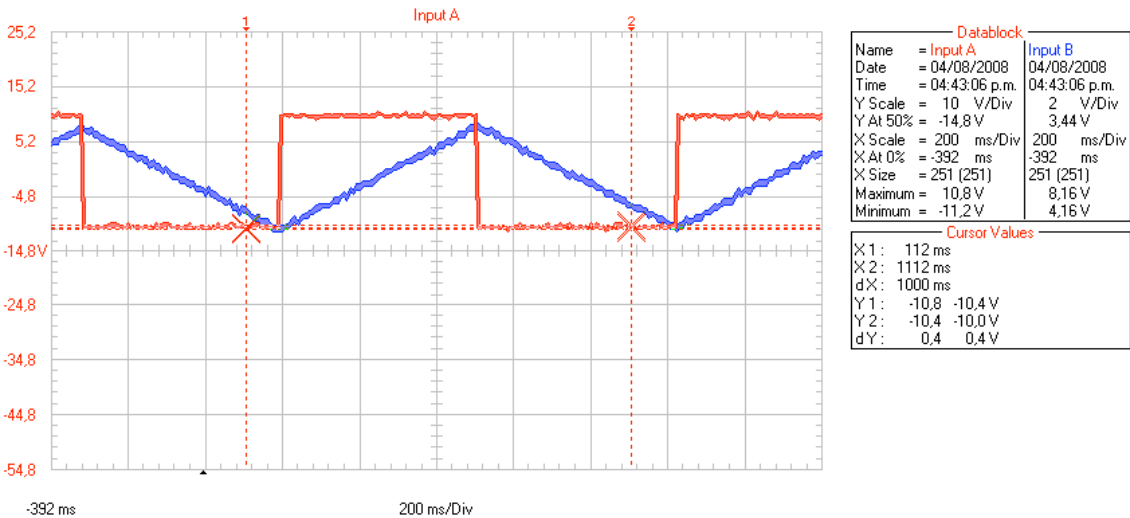


Figura 8.54

Control derivativo.

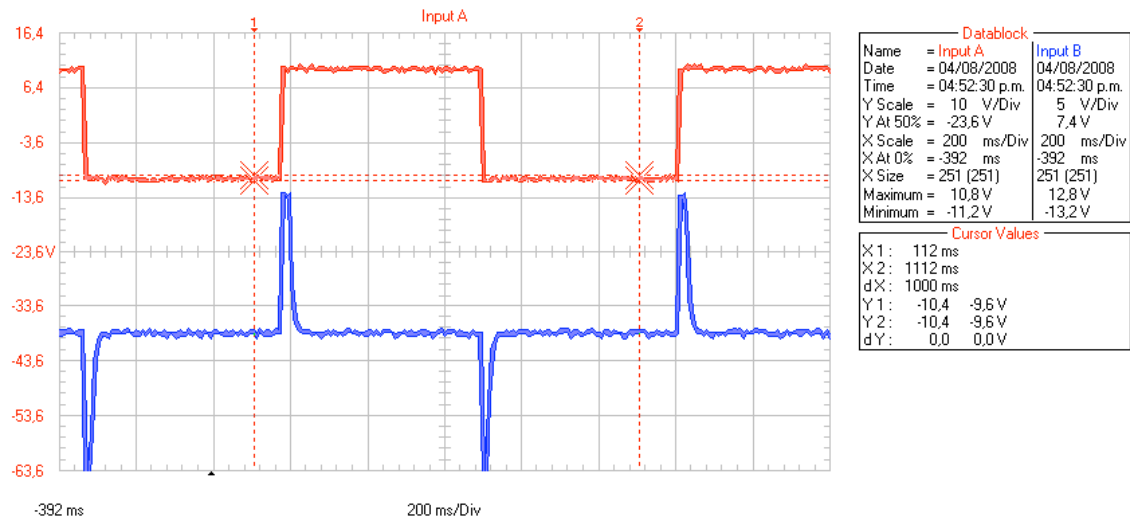


Figura 8.55

Controlador P.I.D. o de tres términos.

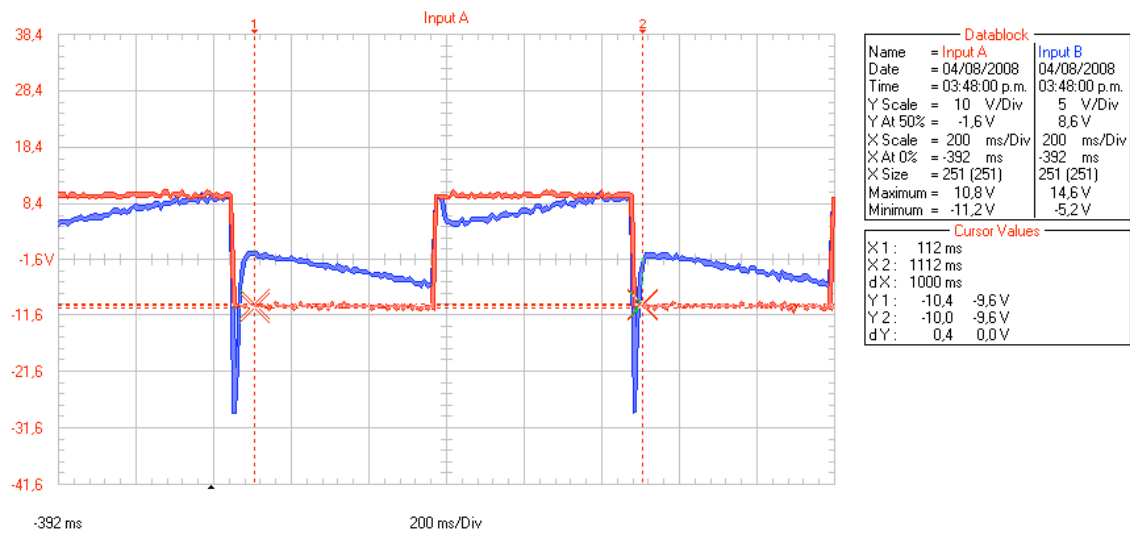


Figura 8.56

Se captó que para obtener una señal adecuada el controlador P.I.D. debe ser sintonizado ajustando P5 en 100% con el SW2 encendido y luego ajustar P4 en 20% para conseguir una optima señal a la salida. Este se debe realizar en ambas unidades de control.

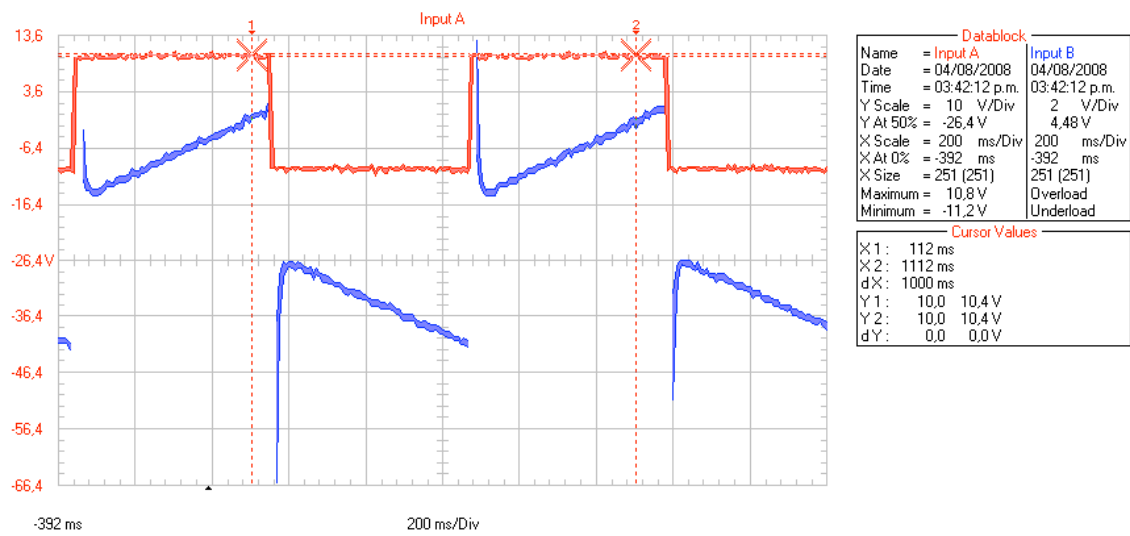


Figura 8.57

Todas las señales obtenidas del controlador P.I.D. de la nueva unidad de control son satisfactoriamente idénticas a las señales de la unidad analógica Feedback Instruments 33-110.

CONTROL PROPORCIONAL + DERIVATIVO (P+D)

Datos de la unidad feedback Instruments 33-110.

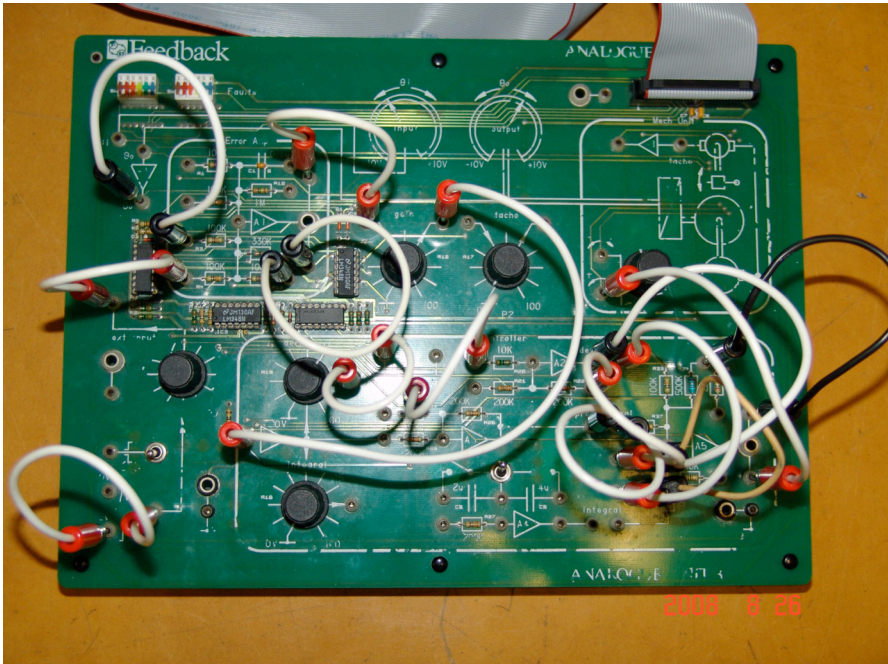


Figura 8.58

P1 potenciómetro de ganancia
P2 potenciómetro de control derivativo

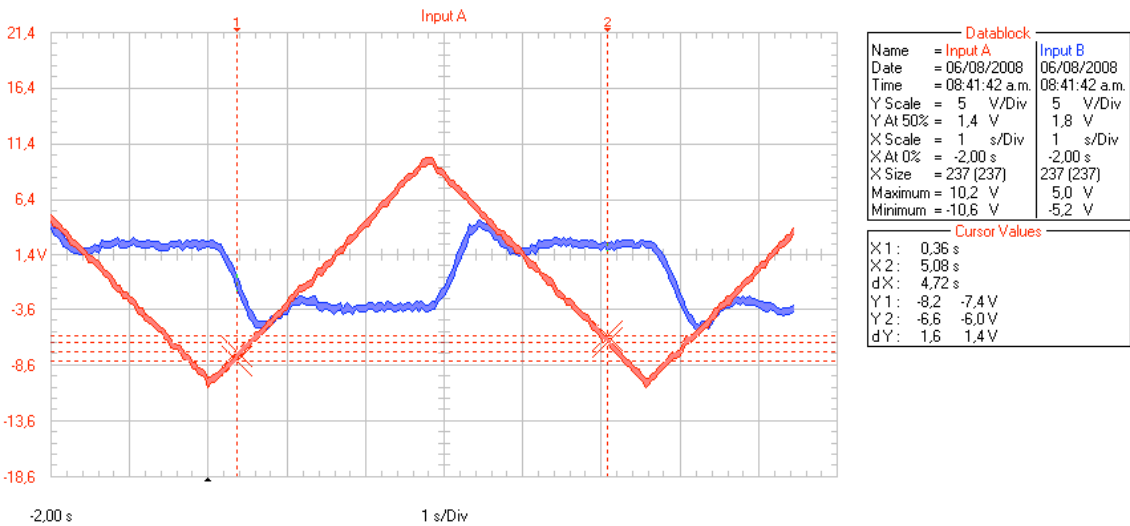


Figura 8.59 P1 en 100% y P2 en 0%

Se observa señal triangular con la señal de realimentación del sistema. Se capta como se elimina el transitorio al introducirle más control derivativo

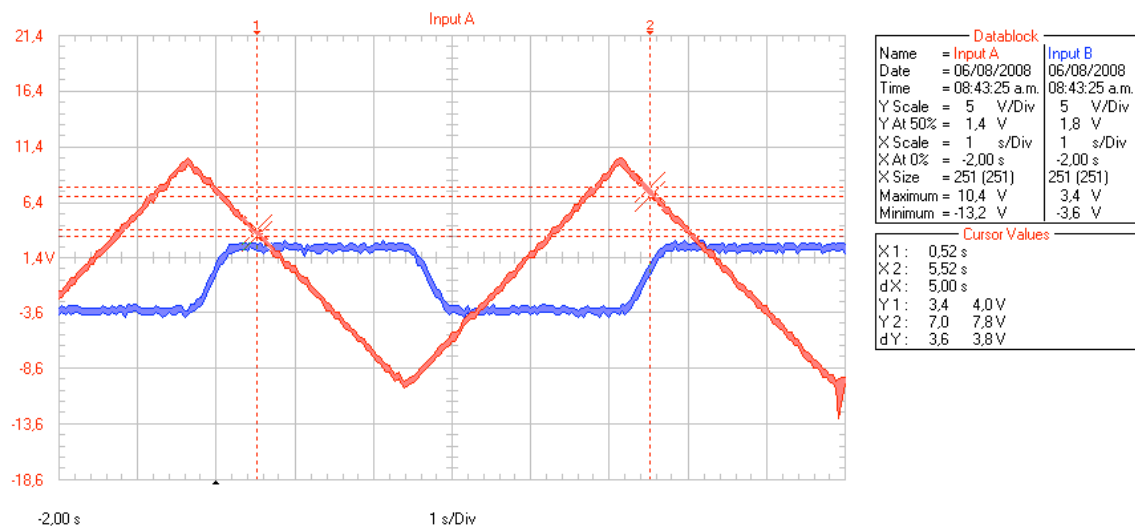


Figura 8.60 P1 en 100% y P2 en 100%

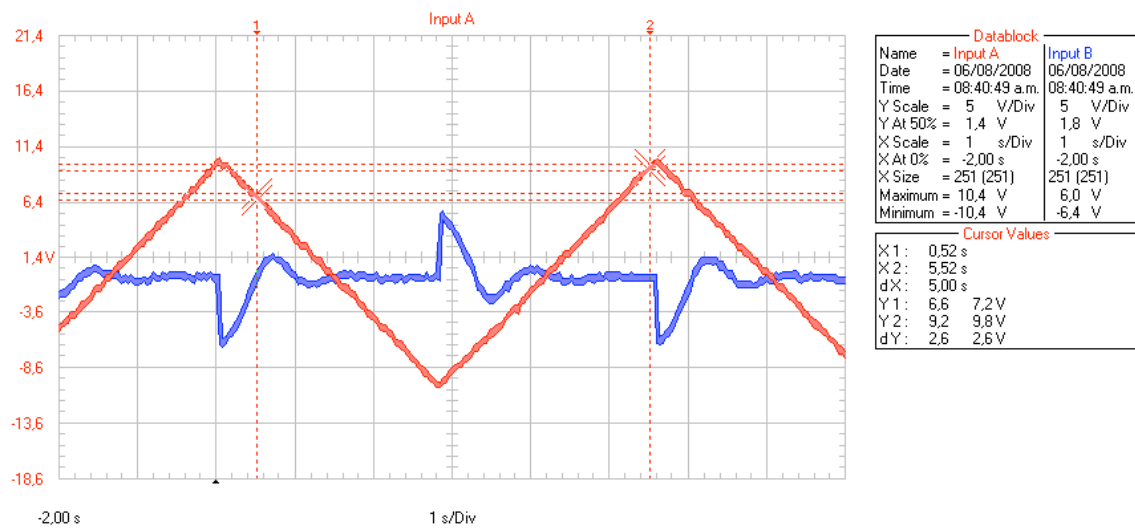


Figura 8.61 P1 en 100% y P2 en 0%

De igual modo la señal de entrada al controlador también disminuye el transitorio al aplicar más control derivativo.

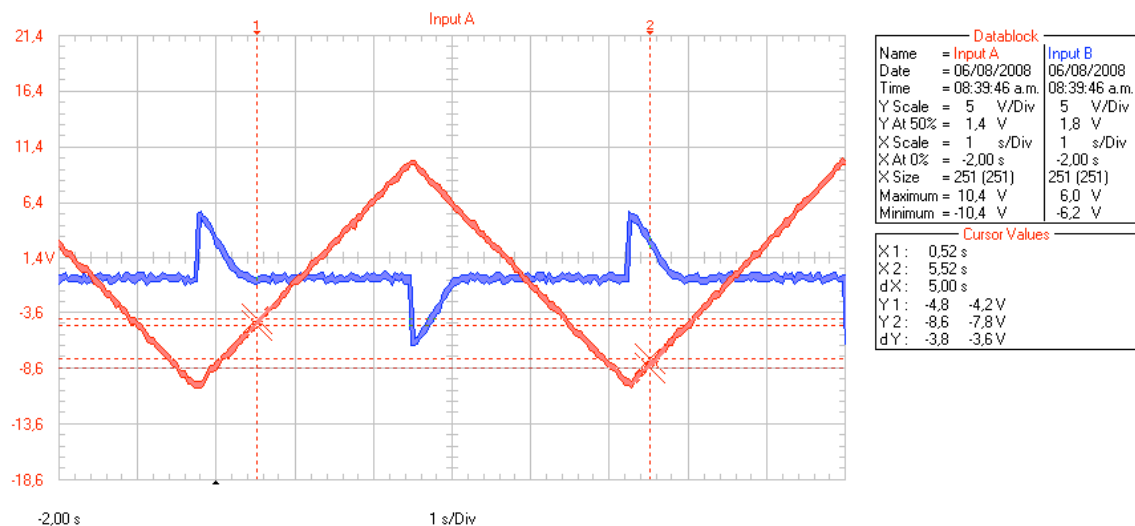


Figura 8.62 P1 en 100% y P2 en 100%

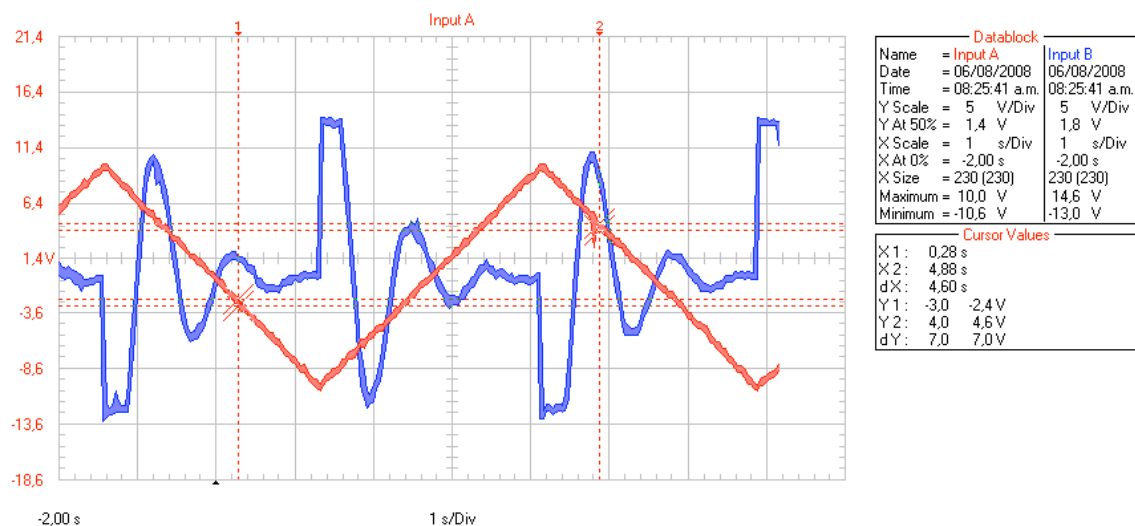


Figura 8.63 P1 en 100% y P2 en 0%

La señal resultante de control derivativo más proporcional mejora notablemente al introducir al sistema mayor control derivativo.

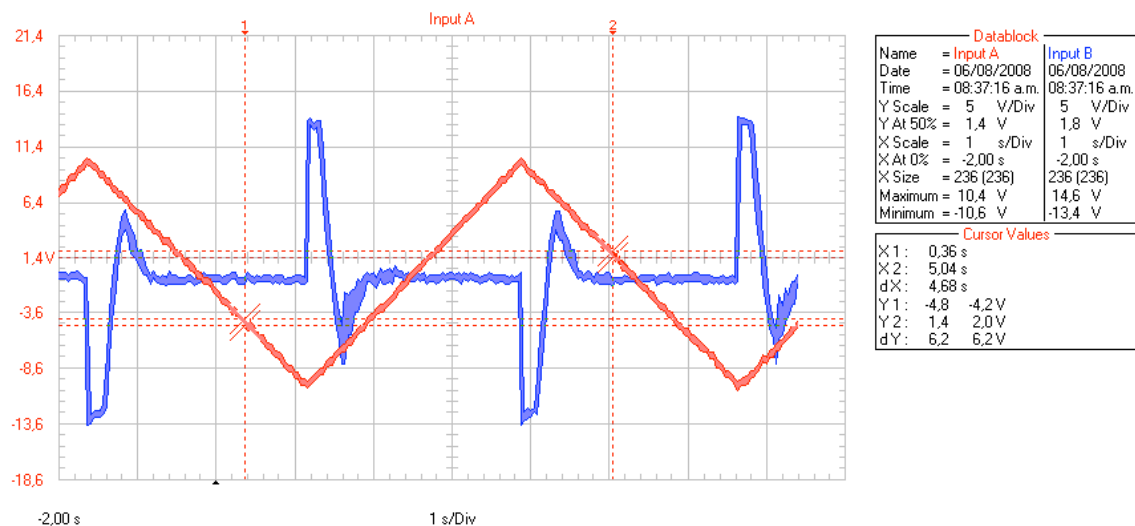


Figura 8.64 P1 en 100% y P2 en 100%

Datos obtenidos de la ANALOGUE UNIT II.

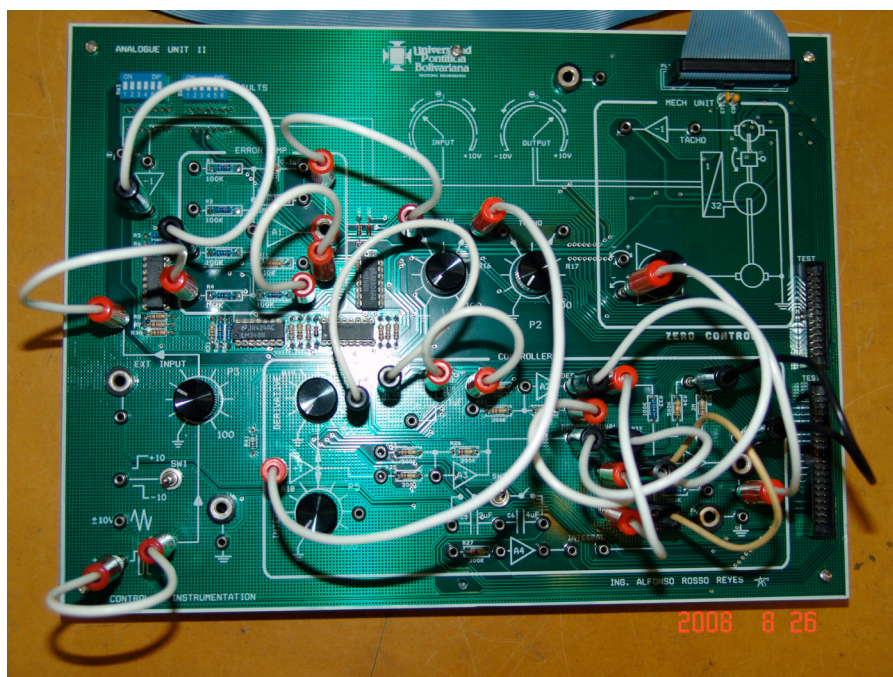


Figura 8.65

Señal de retroalimentación antes de entrar al amplificador.

Como se observa en esta señal aparece un transitorio ya que solo se esta aplicando una acción proporcional y en el sistema siempre va existir una inercia en los motores del mecanismo.

Los resultados para la nueva unidad son idénticos a los de la modulo FEEDBACK INSTRUMENTS 33-110.

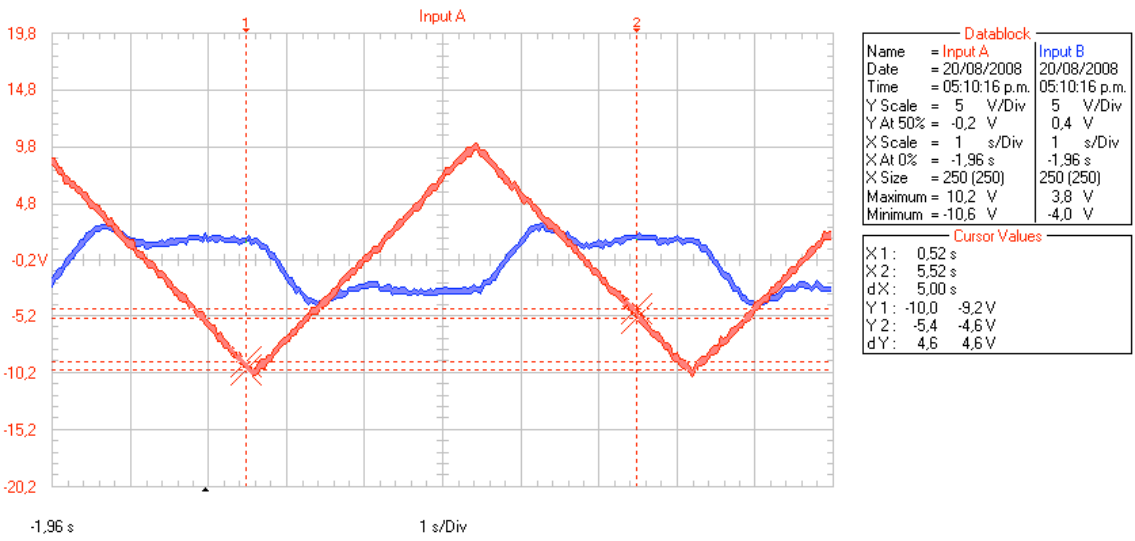


Figura 8.66 P1 en 100% y P2 en 0%

Al aplicar control derivativo igualmente reduce el transitorio del sistema. De esta manera podemos observar lo bien y adecuadamente que trabaja la nueva unidad analógica.

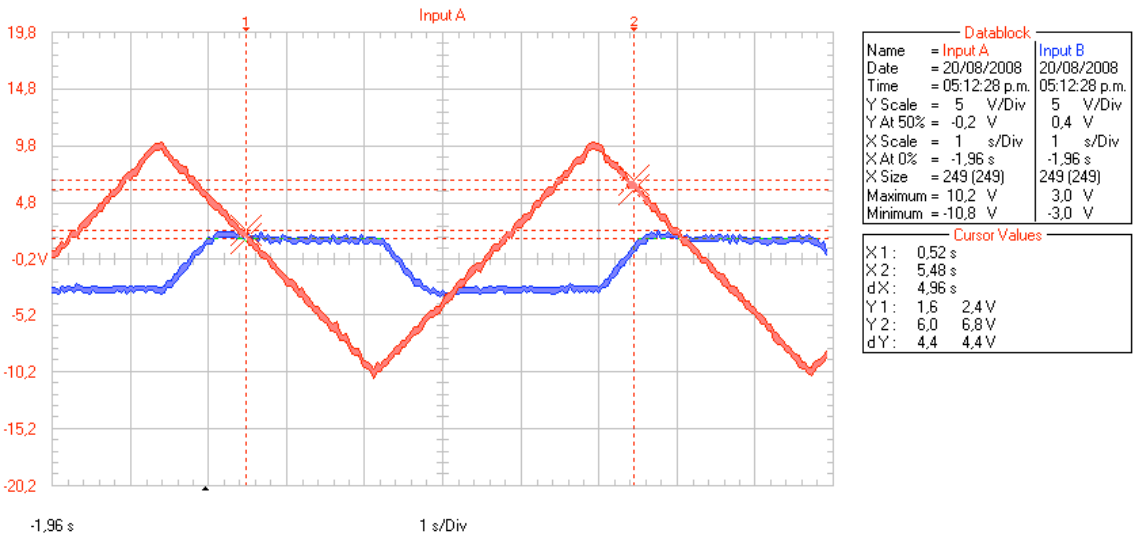


Figura 8.67 P1 en 100% y P2 en 100%

En el resto de las graficas se observa el mismo comportamiento demostrando el por que el uso del control derivativo es de amplia aplicación en la industria. Sencillamente el control derivativo corrige las oscilaciones indeseadas del servomecanismo.

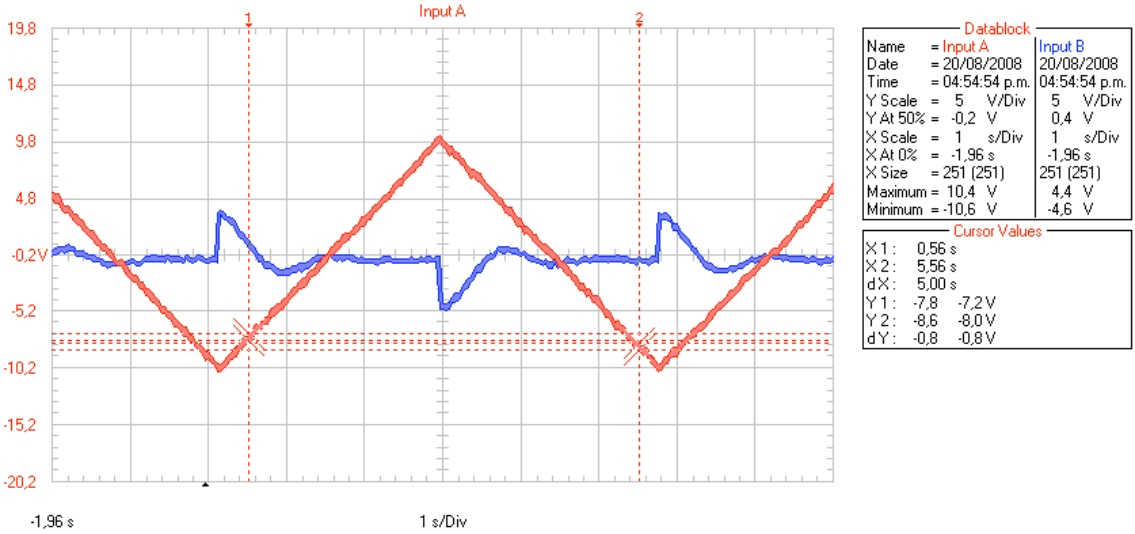


Figura 8.68 P1 en 100% y P2 en 0%

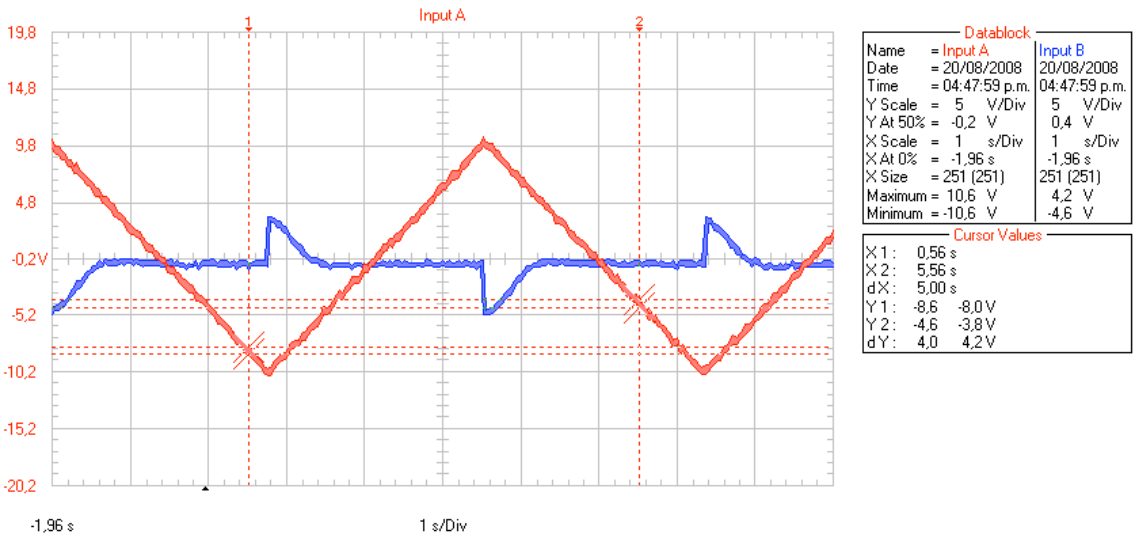


Figura 8.69 P1 en 100% y P2 en 100%

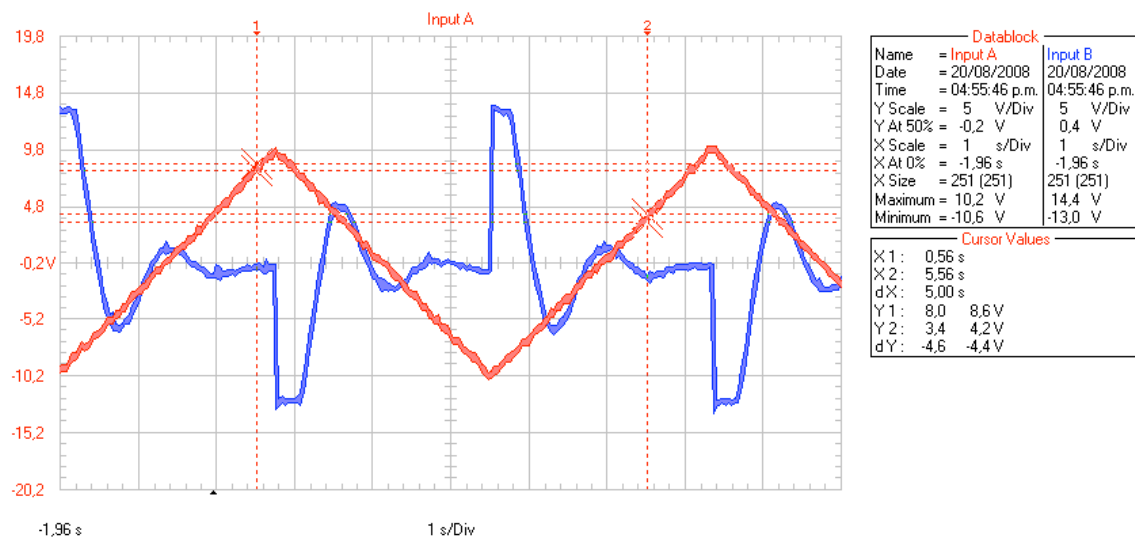


Figura 8.70 P1 en 100% y P2 en 0%

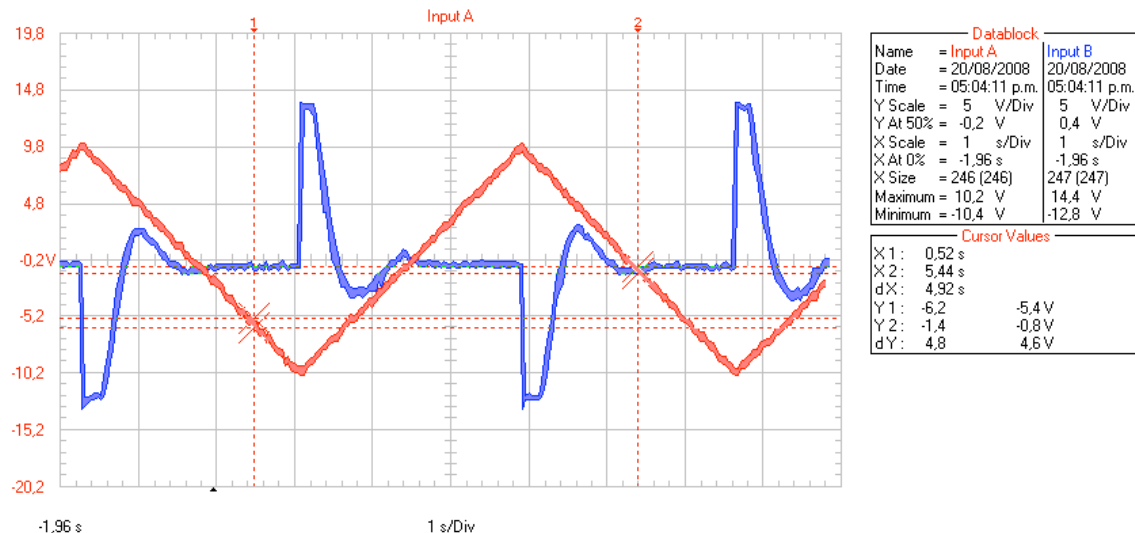


Figura 8.71 P1 en 100% y P2 en 100%

Con resultados tan satisfactorios e idénticos a los esperados podemos concluir que nuestra unidad de control analógico es un éxito en cuanto a funcionalidad se refiere. Lo cual nos indica que esta lista para el uso diario en el laboratorio.

Por otro lado todos los componentes son de alta calidad para obtener excelentes prestaciones y la mayor durabilidad posible, pues ambos módulos (unidad probadora y unidad analógica) fueron diseñados para trabajar eficientemente en un entorno pedagógico en el cual se encuentran muchos factores que atentan contra la integridad del entrenador.

9. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Se comprobó que la nueva unidad analógica proporciona las mismas ventajas funcionales que ofrece el módulo FEEDBACK INSTRUMENTS 33-110. En cuanto a calidad se refiere la nueva tarjeta ofrece unos estándares más elevados, sin mencionar la calidad de cada componente de esta misma.

La unidad probadora de conexiones mostró su destreza para supervisar y proteger la integridad del entrenador analógico. Su habilidad para guiar cada práctica de laboratorio la convierte en una herramienta de vital importancia en el correcto desarrollo de laboratorio de control.

La sincronización entre la unidad probadora en conjunto con el módulo mecánico y la nueva unidad analógica fue un completo éxito. Pues el entrenador funciona solo cuando se realizan correctamente las conexiones en el módulo analógico y obliga a que se revise de nuevo el cableado, cumpliendo con su tarea pedagógica y a la vez con su función protectora del sistema.

Se demostró que se pueden diseñar y fabricar módulos de alta calidad con precios muy razonables, haciendo que este proyecto sea competitivo con respecto a otras alternativas en el mercado.

Queda abierta la posibilidad de seguir desarrollando nuevos proyectos de investigación ya que ahora se puede tener acceso a cada señal generada por el módulo analógico (ANALOGUE UNIT II) con la utilización de sus puertos de pruebas.

10. BIBLIOGRAFIA

[1] Ogata, Katsuhiko (1998). Ingeniería de Control Moderna. Tercera Edición. Prentice-Hall hispanoamericana, S.A. pag670-673

[2] Smith, Carlos A. Corripio (1996). Control Automático de Procesos. Teoría y Práctica. Limusa Noriega Editores.

[3] Guía de experiencia No. 2 sistemas de control de posición y velocidad analógicos pag25

[4] http://www.sapiensman.com/control_automatico/control_automatico6.htm

[5] http://usuarios.lycos.es/automatica/temas/tema2/pags/la_lc/lc.htm

[6] eii.unex.es/profesores/pmerchan/Automatizacion_Industrial/tipos%20de%20control.pdf

[7] <http://www.monografias.com/trabajos12/microco/microco.shtml>

[8] www.dte.us.es/ing_inf/ins_elec/temario/Tema%205.Multiplexores%20Analogicos.pdf

[9] http://www.ifent.org/temas/amplificadores_operacionales.asp

[10] <http://es.geocities.com/jeeesusmeeerino/procesos/tipos/tipos.html>

Anexo I

UNIVERSIDAD POTIFICIA BOLIVARIANA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA

**MANUAL DE OPERACIÓN DE LA TARJETA PROBADORA DE
CONEXIONES “TEST UNIT”**

POR: Ing. ALFONSO ROSSO REYES

Este manual esta ideado con el fin de que el alumno le de el mejor manejo posible a la unidad probadora para llevar un correcto desarrollo de cada practica dedicada al manejo de la nueva unidad analógica en el laboratorio de control.

En ningún momento se debe utilizar la unidad probadora sin haber leído antes este manual y las guía de experiencia autorizadas por la facultad de electrónica.

1. GENERALIDADES

Componentes: (Kit del instrumento)

- Instrumento TEST UNIT ó unidad probadora (ALIMENTACIÓN: 9Vcc)
- Adaptador de Red (Input: 100-240Vac 0.6A 60Hz Output: 9Vcc 1200mA)
- Cable de corriente AC
- Cable ribbon 40 hilos
- Cable ribbon 26 hilos
- Manual de usuario

ESPECIFICACIONES GENERALES

Consta básicamente de un modo de operación:

- Como probador de conexiones de la ANALOGUE UNIT II ó nueva unidad analógica

VARIOS

- **PANTALLA:**

Tamaño 25 x 75mm LCD Blue Dot matrix
Resolución: 4 líneas x 20 x 40puntos

- **ALIMENTACIÓN:**

Externa: mediante adaptador de 9Vcc 1200mA.

2. INSTRUCCIONES DE MANEJO DE LA UNIDAD PROBADORA “TEST UNIT”

2.1 POSICIONAMIENTO DE LA UNIDAD PROBADORA “TEST UNIT” EN CONJUNTO CON EL ENTRENADOR DE SERVOCONTROL

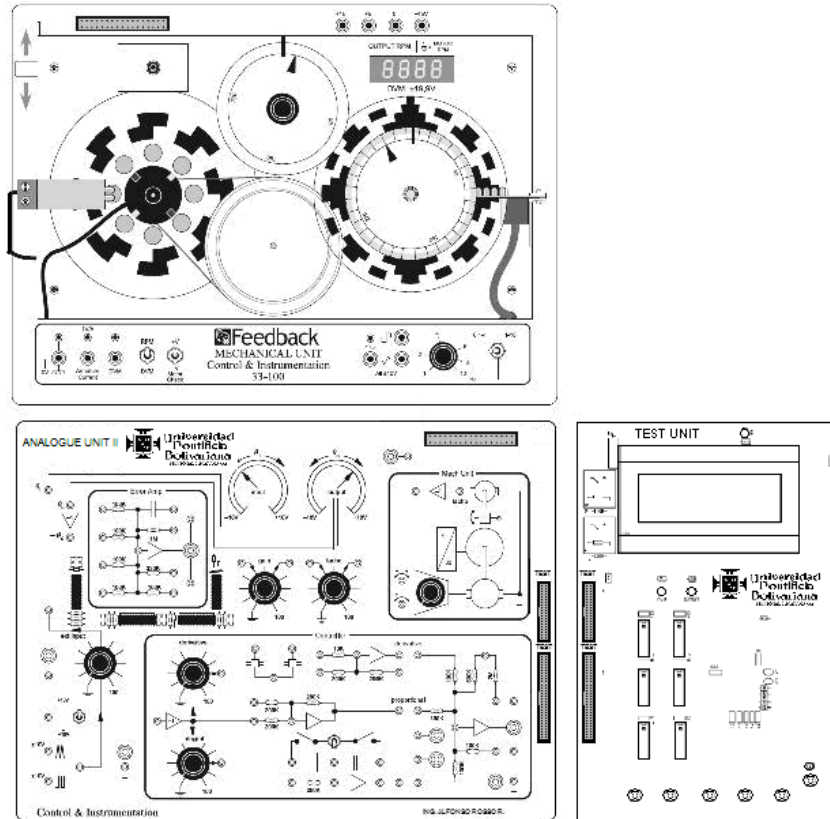


Figura 2.1 Entrenador analógico.

En este tipo de configuración siempre deben estar acoplados los tres módulos del entrenador de servocontrol junto con la fuente y el conmutador de conexiones.

2.2 CONEXIONES

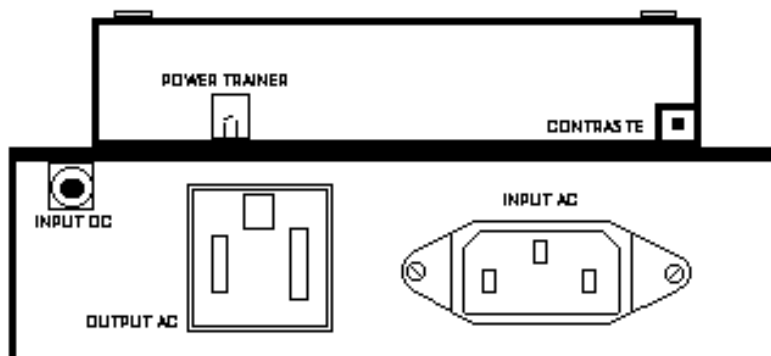


Figura 2.2 Conexiones parte superior TEST UNIT.

El instrumento presenta en la parte superior varias conexiones, entre ellas una entrada DC a la cual se conecta el adaptador de 9Vcc, una entrada AC a la cual se conecta un cable de 110Vca que a la vez esta conectado al banco de pruebas y una salida AC a la cual se conecta la fuente del entrenador de servocontrol. Además cuenta con LED de color verde que se ilumina cuando la unidad probadora da la orden de encender la fuente del sistema.

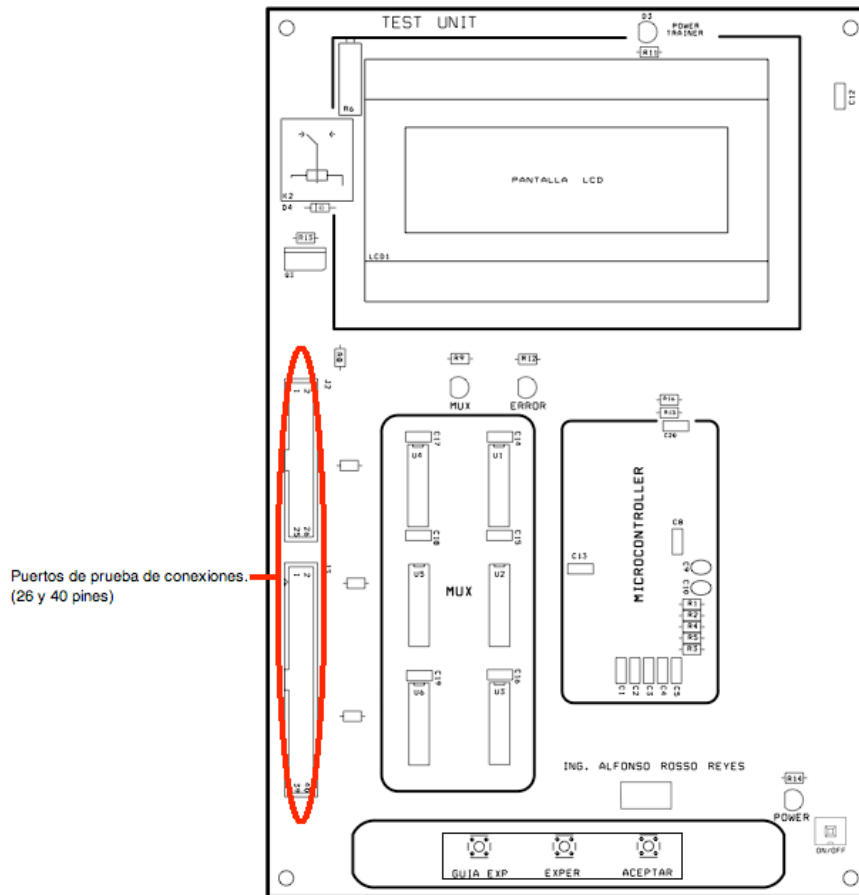


Figura 2.3 Conexiones parte frontal TEST UNIT

La unidad también presenta en la parte frontal dos conectores de 26 y 40 pines (**Figura 2.3**) los cuales se comunican mediante una cinta ribbon al conmutador de conexiones de prueba (**Figura 2.4**) que cuenta igualmente con dos tipos de conectores en su parte frontal derecha. Este dispositivo a su vez tiene otros dos puertos a la izquierda los cuales se conectan a la unidad analógica II (**Figura 2.5**).

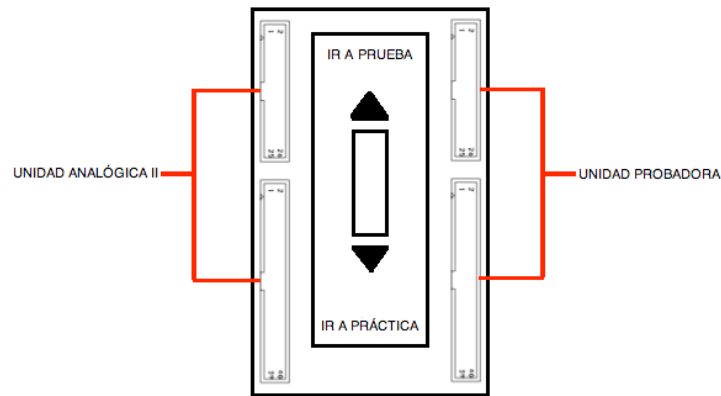


Figura 2.4 Conmutador de conexiones de prueba

El conmutador se encarga de conectar o desconectar las conexiones de prueba con el fin de aislar las señales funcionales de la unidad analógica II de perturbaciones ocasionadas por ruido y altas impedancias provenientes de la unidad de pruebas.

Posee dos modos de manejo:

- **Modo de pruebas:** Conecta la trama para revisar las conexiones ejecutadas por el alumno.
- **Modo de práctica:** desconecta la trama para realizar la experiencia de laboratorio sin tener ningún tipo de perturbación externa en la unidad analógica II.

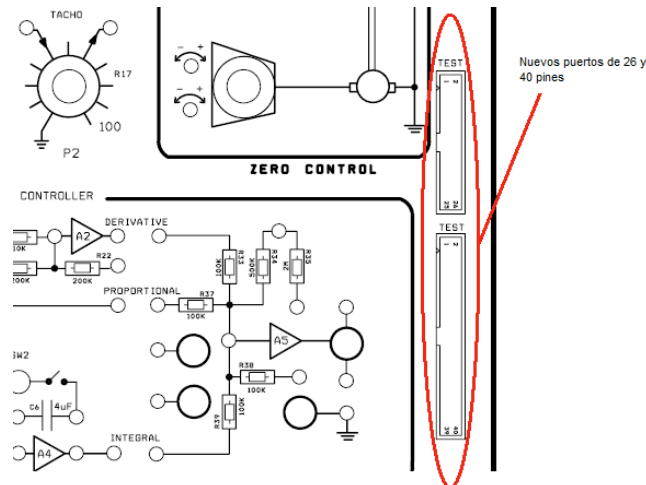


Figura 2.5 Conexiones parte frontal ANALOGUE UNIT II

IMPORTANTE:

Todas la conexiones deben realizarse antes de encender la unidad probadora, incluyendo los diferentes puentes en la unidad analógica II que se muestran en las guías de cada práctica del laboratorio.

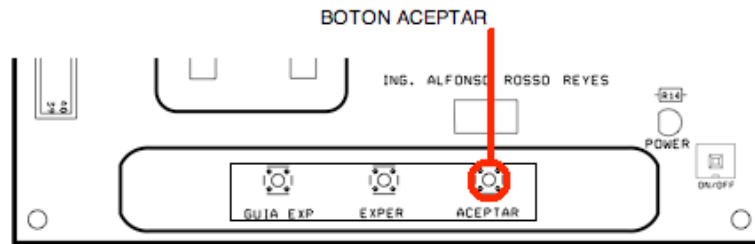


Figura 2.9 Botón Aceptar.

Luego de aceptar en el LCD el cursor se debe mover a la segunda línea donde se encuentra la selección de la práctica ó experiencia.

2.5 SELECCIÓN DE EXPERIENCIA

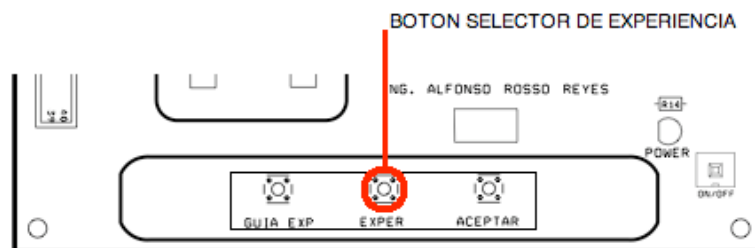


Figura 2.10 Botón selector de experiencia ó práctica.

De igual modo la selección se hace pulsando el botón indicado en la **Figura 2.10** repetidas veces hasta encontrar el numero de experiencia que desea realizar.

Antes de **ACEPTAR** la selección de guía y práctica es necesario ubicar el interruptor del conmutador de conexiones (**Figura 2.4**) en el **MODO DE PRUEBA**.

Seguido de haber hecho la selección se pulsa el botón indicado en la **Figura 2.9** para aceptar y dar comienzo a la supervisión del montaje realizado en la unidad analógica II. En la pantalla aparece el numero de conexiones que debe tener cada práctica de laboratorio.

La revisión del montaje se hace realizando tres barridos. Se observará que estado tiene cada conexiones; si se encuentra un error se ilumina el LED rojo y se detiene el proceso hasta que se conecte correctamente el puente. El LED azul del banco de multiplexores debe seguir encendido en cual quiera de los dos casos anteriores, solo se apagara cuando se realicen los tres barridos completos y el chequeo de las conexiones sea correcto. En ese mismo momento se debe iluminar el LED verde que indica que la fuente del entrenador esta energizada.

Luego de realizar la supervisión correcta de las conexiones se debe accionar el interruptor del conmutador (**Figura 2.4**) en el **MODO DE PRACTICA** para garantizar la veracidad del funcionamiento del modulo de control analógico.

Estas acciones se deben realizar en cada experiencia de laboratorio sin ninguna excepción.

2.6 APAGADO Y REINICIO

Al oprimir una vez más el botón azul indicado en la **Figura 2.6** se apaga la unidad probadora al mismo tiempo que se desenergiza la fuente del entrenador, deshabilitando de esta manera todo el sistema.

Al volver a encender la unidad probadora el microcontrolador se reinicia y muestra de nuevo el menú principal listo para una nueva práctica de laboratorio.

NOTA:

En las siguientes prácticas del laboratorio de control se podrán realizar cambios en una sola conexión de la unidad analógica II sin necesidad de apagar la unidad probadora. Este cambio es premeditado y está indicado en cada guía de experiencia según se el caso.

- Guía de experiencia No. 2 Practica No. 1 Parte B
- Guía de experiencia No. 2 Practica No. 3
- Guía de experiencia No. 2 Practica No. 5
- Guía de experiencia No. 3 Practica No. 1
- Guía de experiencia No. 3 Practica No. 4 Parte B