

115
223



UNIVERSIDAD NACIONAL
AUTONOMA DE MEXICO

FACULTAD DE INGENIERIA

ACONDICIONADOR PARA SERVOACELEROMETROS
CONTROLADO DIGITALMENTE.

T E S I S
QUE PARA OBTENER EL TITULO DE
INGENIERO MECANICO ELECTRICISTA
PRESENTA

ERIK MOLINO MINERO RE



Director de Tesis:
Ing. Enrique Gómez Rosas

México, D.F.

1994

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

A mis padres.

A mi hermana.

A mis abuelos.

*Gracias por todo el apoyo
que siempre me han brindado,
por su cotidiana amabilidad
y comprensión.*

*A todas aquellas personas que hicieron posible la
realización de este trabajo, en particular al Ing.
Enrique Gómez Rosas y al personal del Instituto de
Ingeniería de la UNAM.*

**ACONDICIONADOR PARA
SERVOACCELEROMETROS CONTROLADO
DIGITALMENTE.**

INDICE

1.	INTRODUCCION.	1
	a. Justificación.	2
	b. Objetivos.	3
2.	SISTEMA DE MEDICION GENERALIZADO PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES.	4
	a. Descripción del Acondicionador.	5
	b. Desarrollo del Acondicionador.	7
3.	SERVOACELEROMETROS.	12
	a. Conceptos Básicos de la Aceleración.	13
	b. Galvanómetros.	16
	c. Funcionamiento del Transductor.	18
4.	RESTAURADOR.	24
	a. Malla de Realimentación.	25
	b. Ajuste de Cero y Cruce por Cero.	28
5.	AJUSTE FINO DE CERO.	33
	a. Convertidores Digital-Analógico.	34
	b. Proceso de Ajuste.	38
	i. Cruce por Cero.	41

6.	ETAPA DE AMPLIFICACION.	43
a.	Proceso de Amplificación.	43
7.	FILTRO.	49
a.	Tipos de Filtros.	50
b.	Realización de Filtros.	52
i.	Los Capacitores como Resistencias.	53
ii.	Muestreo y Efecto ALIAS.	55
iii.	Filtro de Octavo Orden.	57
c.	Generador de la Señal de Reloj. Contador Programable.	61
8.	ENLACE CON EL SISTEMA DE CONTROL.	65
a.	Puerto Paralelo.	65
9.	SISTEMA DIGITAL DE CONTROL.	69
a.	Descripción del Sistema.	70
i.	Características Básicas del Microcontrolador.	70
ii.	Modo de Operación.	72
iii.	Arquitectura y Mapa de Memoria.	73
b.	Proceso Lógico de Control.	76
i.	Programa Principal.	77
ii.	Rutina de Ajuste de cero.	77
iii.	Rutina de Ganancia.	78
iv.	Rutina para la Frecuencia de Corte.	78

10. OPERACION DEL EQUIPO.	83
11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.	86
APENDICES.	88
a. Fuente de Voltaje de Encendido Programable.	88
b. Costós de Producción del Equipo.	92
c. Diagramas Eléctricos.	96
d. Comportamiento del Acondicionador.	102
 BIBLIOGRAFIA.	 117

1. INTRODUCCION

En el campo de la ingeniería, es necesario llevar a cabo pruebas experimentales donde se recopilan datos y se almacenan para luego ser analizados y llegar a las conclusiones.

Existen muchos tipos de pruebas y hay una gran variedad de métodos para llevarlas a cabo. En la práctica, es común que las pruebas de medición se realicen con aparatos electrónicos, donde los transductores cambian la variable a medir en alguna variable eléctrica; estas pueden ser un voltaje, una corriente, o un cambio de resistencia, de capacitancia, etc..

La función de un transductor es detectar cambios en la variable que se desea medir y proporcionar un cambio en la variable eléctrica que se presenta a la salida del transductor; esta señal eléctrica es la que se usa como medida indirecta. Dependiendo de las características del transductor, las variaciones pueden ser lineales en todo el rango útil o en secciones de éste.

El proceso para efectuar pruebas puede llegar a ser complicado o laborioso, incluso podría ser necesaria la presencia de varios individuos, ya sean técnicos de apoyo o ingenieros. Para realizar los experimentos, se requieren diversos aparatos conectados entre sí, los cuales tienen funciones determinadas dependiendo de la prueba y de los transductores.

En el Instituto de Ingeniería, dentro de la Coordinación de Estructuras, se están llevando a cabo pruebas experimentales a distintos tipos de estructuras. Algunas de ellas se instalan en una mesa vibradora y se someten a oscilaciones de diversas intensidades y frecuencias, otras (prototipos) simplemente se someten a vibración ambiental. El propósito es hacer un estudio para ver como se comportarían si se presentara un sismo. Para esto, se estudian diversas variables como son el desplazamiento, la velocidad y la aceleración.

Para monitorear las variables, se usan distintos tipos de transductores, tales como los DCDT, las celdas de deformación y los acelerómetros. Con estos dispositivos es posible conocer las condiciones y características de las estructuras durante y después de las pruebas.

En el caso de los servoacelerómetros, se requiere de un circuito que lo polarice y que ajuste el nivel de la señal en una zona cercana a cero volts para la posición de inicio. En ocasiones, las variaciones que tiene la señal son demasiado pequeñas para ser medidas por lo que se requiere de una etapa de amplificación. Aun se puede requerir otro módulo para filtrar la señal que aparece mezclada con ruido y con señales parásitas que no son deseables, además, las señales de interés en estos casos son casi siempre de baja frecuencia, por lo que es necesario usar filtros. Después del filtro la señal puede ser ingresada en un sistema de adquisición de datos el cual se encargará de almacenar y en dado caso de procesar las lecturas.

a. Justificación.

Si para una prueba se tiene montado todo un sistema de medición, el número de transductores y aparatos de medición que se requieren llega a ser grande. Cada uno de ellos necesita un cable de conexión para cada etapa del proceso, uno del transductor al restaurador, otro de éste al amplificador, otro para que la señal llegue a los filtros, uno más entre estos y el sistema de adquisición de datos, que puede ser una computadora. Como se puede ver hay muchos cables, muchos aparatos, mucha gente que hace las conexiones y las revisa, además, la probabilidad de falla o errores o la presencia de ruido es alta. Deben revisarse que los acoplamientos entre los módulos sean adecuados, en caso contrario podría desestabilizarse es sistema o bien la señal se atenúa o se pierde.

Además de lo anterior, también hay que considerar que cada aparato se opera independientemente de los demás, algunos funcionan digitalmente y otros analógicamente, unos tienen ajustes variables y otros son fijos.

Un factor también muy importante es el precio que tienen los equipos de medición, ver Apéndice b.. Estos son bastante caros al igual que su mantenimiento, puesto que no es fácil de proporcionar. El costo de los aparatos puede ser un problema cuando se requieren en gran número. Además, la mayor parte de los equipos como estos, que son de buena calidad, provienen del extranjero y es necesario esperar un cierto tiempo para que lleguen.

Todo esto hace pensar en la conveniencia de diseñar e implementar un solo aparato que integre todas las etapas que se requieren para un acondicionador; que realice todas las

funciones entre el transductor y el sistema de adquisición de datos de forma automática; que no sea caro fabricarlo y que el tiempo que se requiera para su fabricación sea relativamente pequeño.

b. Objetivos.

El sistema que se propone es un acondicionador para servoacelerómetros tipo Donner. Tiene como objetivos:

- Facilitar el desarrollo de pruebas.
- Disminuir los problemas que se tienen al hacer las conexiones.
- Reducir el tiempo que se requiere para conectar y probar todos los canales que se usan en la prueba.
- El tiempo requerido para la construcción de más acondicionadores y los costos deben ser viables.
- Dar oportunidad al desarrollo de infraestructura humana capaz de desarrollar y crear dispositivos útiles que por lo general se compran en el extranjero y que son bastante caros.

Este tipo de dispositivos de instrumentación son muy delicados, están destinados a trabajos donde se requiere de precisión y exactitud. Su fabricación requiere elementos y procesos de alta calidad, por lo general también las personas que intervienen en la fabricación requieren de capacitación especial, por lo que son caros.

Una forma de reducir gastos es la de desarrollar tecnología propia que se aplique a las necesidades que se tienen. Otra forma es ver que se requiere y adecuar la tecnología existente para ese propósito, siendo esto otro objetivo.

Un objetivo más es demostrar que se pueden reproducir tantos aparatos como se requieran, con las mismas características. Este tipo de acondicionadores debe de funcionar adecuadamente aún cuando se usen distintos acelerómetros, en otras palabras, deben hacerse de tal manera que los acondicionadores sean intercambiables para que las características de las señales que han procesado sean las mismas.

2. SISTEMA DE MEDICION GENERALIZADO PARA EL ACONDICIONAMIENTO DE SEÑALES.

En la realización de mediciones puede haber involucrados muchos criterios y propósitos; esto de alguna manera influye en el método y en el sistema que se emplea en la medición.

Con las necesidades, la experiencia y el tiempo, se han generalizado los procesos y las etapas que se requieren para llevar a cabo, confiablemente, las mediciones. Muchos sistemas de medición usan un sistema general compuesto por tres etapas, como se observa en la figura 1 que se encuentra a continuación.

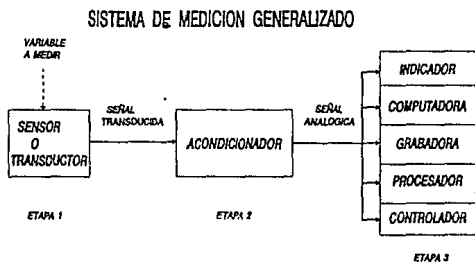


Figura 1

Cada una de las 3 etapas tiene una tarea en el proceso de medición y es importante comprender que función desempeña cada una de ellas.

- Etapa 1:* Este bloque se compone por el dispositivo de detección o transducción. La función de esta etapa es la de sensar o detectar la variable a medir y aquí es donde aparece la señal de interés. El dispositivo transductor idealmente debe discriminar y ser insensible ante cualquier variable que no sea la de interés. Esto, lamentablemente, no es cien del todo, ya que siempre hay presentes señales parásitas que contaminan y pueden dañar el contenido de la señal que se desea estudiar. A consecuencia de esto se llega a la siguiente etapa.
- Etapa 2:* Este bloque es un estado intermedio, el cual lleva a cabo un proceso de acondicionamiento. El propósito es el de modificar algunas características de la señal para que pueda ser aceptada por la tercera etapa. Este acondicionamiento puede realizar, además, diversas tareas en su proceso de modificación. La información que fue transducida se puede filtrar, amplificar, integrar, diferenciar, o bien, tantas tareas como se quieran, lo importante es que la señal esté lista para que la última fase la pueda recibir como se debe.
- Etapa 3:* Esta última etapa de la medición es un sistema que se encarga de almacenar la información y en dado caso de procesarla. El objetivo es presentar los datos de tal forma que el ser humano pueda comprenderlos o interpretarlos. Esta parte puede ser un sistema indicador, un grabador o bien un sistema de adquisición de datos controlado por computadora.

El trabajo que se presenta está basado en la elaboración de un acondicionador, lo que vendría siendo la segunda etapa del sistema de medición generalizado. La primera etapa ya se tiene y es un transductor de aceleración, un servoacelerómetro. La última etapa es un sistema de adquisición de datos que ya existe, por lo que nos concentraremos únicamente en estudiar las características del acondicionador.

a. Descripción del Acondicionador.

El acondicionador es un sistema compuesto por varias etapas, las cuales son independientes entre sí pero en conjunto conforman un solo módulo, como se puede apreciar en la siguiente figura.

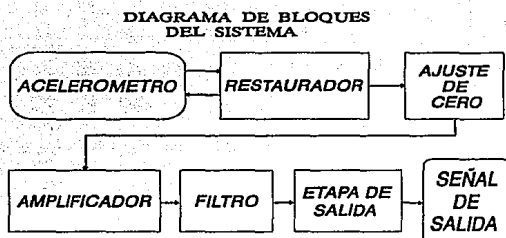


Figura 2

El sistema completo se diseñó para manejar ocho acondicionadores por aparato, esto es, que podrán manejarse ocho canales independientes en un solo equipo, aunque el prototipo que se presenta solo maneja dos.

Cada módulo cuenta con un restaurador, con una etapa de ajuste fino de cero, hay un amplificador/atenuador, un filtro pasa-bajas de octavo orden y finalmente, en la etapa de salida, un amplificador de ganancia 2. A lo largo de éste trabajo se dará una explicación detallada de cada uno de los bloques que componen al acondicionador.

Para controlar los diversos módulos se utiliza un microcontrolador MC68HC11F1, de Motorola, con el propósito de que el sistema pueda ser independiente, además de realizar todos los ajustes automáticamente. El microcontrolador tiene varias funciones que están relacionadas tanto con los procesos que debe realizar el acondicionador como con la interfaz con el usuario.

En primer lugar, se encarga de mandar las señales de control que requiere cada etapa del acondicionador. Empezando por el restaurador de los servoacelerómetros, el microcontrolador mananda las señales que hacen que se abra y cierre la malla de realimentación; se encarga de realizar un ajuste de cero grueso y detecta cuando ocurre el cruce por cero de la señal, con el fin de terminar el ajuste, ver capítulo 4.

En el bloque correspondiente al ajuste de cero fino, el microcontrolador manda las palabras binarias que reciben unos convertidores D/A y las suman con la señal del servoacelerómetro. Además, recibe otra señal de cruce por cero, la cual indica que ha ocurrido un cambio de signo en la señal del transductor. Ver capítulo 5.

Para la etapa del amplificador, el sistema digital de control se encarga de establecer la ganancia o factor de amplificación que el usuario desea. El amplificador puede proporcionar hasta 13 ganancias distintas, a cada una de ellas le corresponde una palabra binaria, la cual es proporcionada por el microcontrolador. En el capítulo 6 se explica detalladamente como opera el amplificador.

El filtro está bajo el control del microcontrolador cuando se desea cambiar de frecuencia de corte. Hay un dispositivo externo (un 8254) cuya función es la de proporcionar una señal cuadrada con una frecuencia proporcional a una palabra binaria de 16 bits, ésta la recibe del sistema de control.

El usuario escoge, dependiendo de sus necesidades, las características operativas del acondicionador y lo hace a través del teclado, que es otra de las responsabilidades del microcontrolador, aparte del despliegue en una pantalla. El propósito de esto es que el usuario pueda modificar las condiciones de trabajo del sistema de tal manera que estas sean adecuadas a sus necesidades.

A través del teclado el usuario puede modificar otros parámetros aparte de la ganancia o factor de amplificación, como son la frecuencia de corte de los filtros, determinar el canal que se desea visualizar durante las pruebas y ajustar la señal a cero. Por otro lado se tiene un selector de canales que permite manipular los parámetros anteriores en cada uno de los ocho canales que se tienen.

b. Desarrollo del Acondicionador.

La idea de crear un acondicionador automático surgió a raíz del trabajo de apoyo que se tenía con la Coordinación de Estructuras del Instituto de Ingeniería durante las pruebas en la mesa vibradora, como ya se comentó en la introducción.

El trabajo previo a las pruebas comenzaba 3 ó 4 días antes de estas y consistía en instrumentar la estructura (colocar los transductores en zonas predeterminadas) e instalar los distintos aparatos que son necesarios para las mediciones y la adquisición de datos.

Había que hacer las conexiones entre todos los aparatos y verificar que estuvieran bien hechas, luego llegaba la etapa de ajuste y calibración y finalmente la prueba.

A raíz de esto se pensó en diseñar un acondicionador general, esto es, que se pudiera usar con cualquiera de los transductores que se necesitan en las pruebas. Además se consideró el diseño de un circuito restaurador, acoplado al acondicionador, para cada uno de los transductores.

Para empezar el diseño, el primer restaurador acoplado al acondicionador, se haría para los servoacelerómetros tipo Donner. Estos transductores son los más comunes en éste tipo de pruebas, además de ser los dispositivos que más dificultad presentan en su manejo.

El primer paso fue el análisis y desarrollo de un sistema a nivel de bloques. Se estudió que partes y funciones serían necesarias, figura 2. Posteriormente y considerando que debían realizarse como mínimo dos sistemas que funcionaran igual, se pensó en la posibilidad de que el control de cada una de las funciones se llevara a cabo mediante un microprocesador, así que se consideró integrar junto al acondicionador un dispositivo que funcionara como interfaz entre éste sistema analógico y el sistema de control que sería digital.

A partir del análisis de los diversos bloques que constituirían al sistema junto con los conocimientos y la experiencia adquirida en otros proyectos y del trabajo realizado en la mesa vibradora, se vio que la etapa más complicada de poder duplicar serían los filtros. Estos son difíciles de reproducir ya que por lo general usan elementos que almacenan energía, como son los capacitores e inductores, que son difíciles de fabricar con características iguales.

Debido a esto, el desarrollo del proyecto comenzó con la creación de dos filtros que trabajaran igual. Como se optó por usar filtros con capacitor conmutado, el primer paso fue investigar en libros y revistas la forma en que trabajan éste tipo de filtros. Una vez superada esta etapa comenzó la parte del diseño e implementación de los filtros.

Había dos opciones en esta parte del desarrollo, la primera era diseñar en forma discreta los filtros. Esto requeriría de mucho trabajo, tiempo, dinero e investigación, además, del espacio que ocuparían en caso de que se implementaran sería grande, por otro lado, en los integrados, las tolerancias de los capacitores son pequeñas. La otra opción, mucho más económica, eficiente y fácil de implementar, era la de usar los filtros en circuitos integrados que existen en el mercado. En estos los capacitores se encuentran ya dentro del chip, no es necesario buscar que todos sean iguales. Los únicos dispositivos externos que deben usarse son resistencias y estas son fáciles de encontrar.

Se optó por usar los filtros integrados debido a que el objetivo era implementar un aparato en corto tiempo y económico. Los filtros monolíticos son sencillos de manejar, pequeños, de fácil implementación, de muy buena calidad y los cálculos matemáticos que se requieren no son complicados, además, no son caros y se pueden encontrar en el mercado nacional.

Para escoger el filtro adecuado se consideraron varios factores; uno de ellos fue que el filtro pudiera ser configurado principalmente como pasa-bajas; otro fue que pudiera trabajar a baja frecuencia (menor a 1000 Hz); otro fue el precio, además de que cumpliera con algunos requisitos relacionados con la arquitectura.

Los requisitos de arquitectura que se consideraron para la elección de un circuito integrado fueron los siguientes: en primer lugar, el circuito externo debía ser lo más sencillo posible, tratando de evitar que el armado de siguientes sistemas no fuera complejo y que el mantenimiento que pudiera requerir fuese sencillo. Otro factor importante fue la relación que existía entre el arreglo de resistencias externas y la frecuencia del reloj. Estos dos parámetros son los que determinan la frecuencia de corte a la cual operará el filtro, por lo que era importante encontrar la relación más lineal, con el fin de reducir problemas de diseño.

Se encontraron varios circuitos integrados que satisfacían los requerimientos, entre estos el seleccionado fue el MF10CN, que además de lo anterior, se encontraba en el laboratorio, por lo que se comenzó el desarrollo del filtro usando éste dispositivo.

Después de muchas pruebas y errores se lograron diseñar dos filtros con la técnica del capacitor conmutado que funcionaban prácticamente igual. Ver capítulo 7..

La siguiente etapa del desarrollo se centró en la creación de un circuito restaurador para acelerómetros.

Para desarrollar el restaurador de servoacelerómetros, se consideraron varios factores, como es la realimentación que se requería para que el dispositivo funcionara correctamente. También se estudió el efecto de bloqueo que presenta el transductor cuando es encendido. Ver capítulo 3..

La implementación del restaurador involucró también otro aspecto, que fue el ajuste de la señal a cero. En esta parte, el ajuste debía abarcar un rango que estuviera cerca de los ± 15 V. El problema se solucionó con la aplicación de un convertidor D/A; con éste dispositivo fue posible acercar a la señal a una zona cercana a cero volts. Ver capítulo 4..

Después de implementar dos restauradores y de probar que funcionaran correctamente, se procedió con el diseño del bloque de ajuste fino de ceros. Esta parte se desarrolló usando dos convertidores D/A. Además se incluyó un dispositivo digital, un puerto paralelo, el 8255 de Intel, para que los C D/A pudieran recibir las señales procedentes del sistema de control.

Tanto el restaurador como el ajuste de cero se probaron juntos para observar que no hubiese problemas. Como aún no se contaba con la etapa de control, se utilizó una computadora PC como medio de control, y se hizo un programa que se encargó de emular las posibles operaciones que haría el sistema de control.

Después de resolver algunos problemas de programación en la computadora y de alambrado en el circuito del restaurador y del ajuste, se verificó que esta parte del sistema funcionara correctamente.

Una vez que las etapas hasta entonces construidas funcionaban correctamente, se procedió con el diseño de un amplificador. Por solicitud de la Coordinación de Estructuras, el amplificador debía tener la capacidad de ser variable y presentar distintos valores de ganancias.

Con esta especificación del usuario, se comenzó a trabajar en las diversas opciones que había para realizar el amplificador. La alternativa que se escogió fue la de crear un amplificador que proporcionara una ganancia constante y luego, mediante un arreglo de resistencias y switches, provocar una atenuación determinada.

La implementación del amplificador se realizó una vez que se comprobó el buen funcionamiento de éste bloque. Ya armado se verificó que las distintas ganancias que proporcionaba el amplificador fueran lo más cercano a lo calculado teóricamente.

Después del amplificador, se procedió a conectar al filtro con el resto de los bloques que ya se encontraban armados. Aquí se implementó también un dispositivo contador que se encargaría de proporcionar la frecuencia de reloj que requiere el filtro para funcionar. El dispositivo es un 8254, éste es un dispositivo digital que es programable. Proporciona una señal casi cuadrada cuya frecuencia se determina a partir de una palabra binaria. Con esto fue posible modificar la frecuencia de corte del filtro, de esta forma ya se tenían listos todos los bloques importantes que requería el acondicionador.

La última parte consistió en un amplificador que proporciona una ganancia de dos. Esta es la etapa de salida del acondicionador, pero a su vez es la señal de entrada al sistema de adquisición de datos.

De esta forma se desarrolló el restaurador para servoacelerómetros y el acondicionador de propósito general, que puede ser usado con cualquier transductor que presente la señal en forma de voltaje.

3. SERVOACELEROMETROS.

En el estudio de los fenómenos, de los naturales y de los que no lo son, la medición siempre se ha llevado, de alguna forma, como una herramienta. Se puede medir la velocidad del viento, la cantidad de lluvia que cae en una zona determinada, la temperatura de los cuerpos y de los medios, las dimensiones de algún objeto o superficie, el tiempo, la presión, la aceleración, el peso, la densidad, la fuerza, el desplazamiento, etc.. A todas estas características se les puede conocer ya sea como variables, parámetros o bien cantidades.

Hay un gran número de parámetros que pueden medirse y como consecuencia, hay toda una gama de dispositivos e instrumentos que son capaces de cuantificar las dimensiones de las variables que se desean estudiar.

Las variables que llegan a ser de interés no siempre se pueden medir de forma directa, o bien, a veces resulta poco viable o práctico hacerlo de esta manera. Cuando éste es el caso, generalmente lo que se hace es realizar la medición de forma indirecta. Esto es, mediante el estudio de otra variable se puede llegar a saber o determinar el valor de la cantidad de interés, siempre y cuando haya una relación entre las dos variables.

Un ejemplo de esto podría ser la medición del peso usando una báscula mecánica. Aquí, el cuerpo cuyo peso se desea conocer, por efecto de su propia masa, mueve un eje y se produce un desplazamiento. La medición del peso se puede obtener, indirectamente, midiendo cuanto se movió la aguja que está pegada al eje. Como se puede observar, en éste caso hay una relación entre el peso de los cuerpos y la distancia recorrida por la aguja de la báscula.

Se pueden encontrar muchos instrumentos que como la báscula, proporcionan una medida indirecta de alguna variable. Estas pueden estar expresadas bajo cualquier parámetro, pero cuando la variable de salida está relacionada con alguna cantidad eléctrica, se les conoce como transductores.

La definición formal que presentó la ISA (Instrumentation Society of America), es la siguiente: Un transductor es un dispositivo que proporciona una salida eléctrica en respuesta a una cantidad física variable o fenómeno medido.

Un transductor no es propiamente el dispositivo que lleva a cabo la medición, es más bien un elemento detector que al estar expuesto a la variable para la cual fue diseñado, la transduce en alguna cantidad eléctrica y este es el parámetro que posteriormente se medirá.

Hay varios principios de transducción que con el tiempo se han ido aplicando dependiendo de las necesidades. Entre estos principios, se encuentran la transducción capacitiva, electromagnética, inductiva, piezoeléctrica, resistiva, etc..

Para estos principios, la medición está basada en el cambio que hay en la variable eléctrica que proporciona el transductor. Por ejemplo, cuando se aplica el principio de transducción capacitivo, lo que se obtiene como resultado es un cambio de capacitancia en la salida del transductor.

En éste capítulo, nos concentraremos en los transductores de aceleración, mejor conocidos como acelerómetros; en particular en los que son servomecanismos.

a. Conceptos Básicos de la Aceleración.

Una rama importante de la física es la mecánica. Esta se encarga de estudiar las relaciones que existen entre la fuerza, la masa y el movimiento. El tema que nos interesa es el del movimiento y la parte de la mecánica que estudia esto se llama cinemática.

El movimiento o desplazamiento podemos definirlo como un cambio continuo de posición¹. Sabiendo esto, la velocidad media puede verse como la razón de cambio del desplazamiento ($x_2 - x_1 = \Delta x$) en un cierto intervalo de tiempo ($t_2 - t_1 = \Delta t$).

$$v = \frac{\Delta x}{\Delta t}$$

¹Sears & Zemansky.: "Física General", Editorial Aguilar, 1962.

Conforme los intervalos de tiempo se hacen más pequeños, se llega al límite donde el tiempo t_2 es casi t_1 y la diferencia entre ellos es infinitesimal. Esta es la definición de velocidad instantánea. Matemáticamente,

$$v = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{dx}{dt} \quad (3. i. 1)$$

Por lo general los cuerpos viajan a velocidades variables. Durante la trayectoria de movimiento del cuerpo, éste modifica su dirección y velocidad constantemente, cuando esto ocurre, se dice que el cuerpo tiene un movimiento acelerado. Como en el caso de la velocidad, aquí también hay aceleración media e instantánea.

La aceleración media se entiende como el cambio de velocidad que hay en un determinado rango de tiempo. La siguiente expresión muestra esta idea.

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t}$$

Por otro lado se tiene a la aceleración instantánea, que no es otra cosa que la aceleración que hay en cada punto de la trayectoria recorrida. Su definición es igual a la de la velocidad instantánea y se obtiene cuando los intervalos de tiempo se hacen cada vez más pequeños, hasta llegar a ser infinitesimales y se define como:

$$a = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{dv}{dt} \quad (3. i. 2)$$

De la ecuación (3. i. 1) y (3. i. 2) se puede observar que la aceleración está relacionada con el desplazamiento y con el tiempo, por lo que sus unidades son $[m/s^2]$, metros por segundo cuadrado.

Cuando se conoce la aceleración de un cuerpo, se pueden conocer otras características, como son la velocidad y el desplazamiento, debido a que están relacionadas entre sí. Esto se logra integrando la curva que describe la aceleración. Pero también se puede

llegar a conocer la fuerza resultante a la cual fue sometido el cuerpo para que modifique su velocidad, si es que se conoce su masa (3. i. 3).

Se sabe, gracias a las leyes del movimiento, que un cuerpo no cambia su estado de movimiento estable o de reposo, a menos que sea sometido a los efectos de una fuerza². Aquí, la fuerza aplicada produce una aceleración en el cuerpo; esto lo describe claramente la segunda ley de Newton, la cual dice que la aceleración es proporcional a la fuerza resultante aplicada, y tiene la misma dirección que dicha fuerza.

Para un cuerpo dado, la relación que existe entre la fuerza y la aceleración, es una constante. Esta constante puede considerarse como una propiedad del cuerpo y se le denomina como su *masa*.

$$\frac{F}{a} = m$$

Escribiéndola de otra forma,

$$F = ma \quad (3. i. 3)$$

Si sabemos que fuerza se le aplica a un cuerpo y cual es su masa, entonces podemos saber cual es la aceleración que recibe. Por esta razón es importante la ecuación (3. i. 3), nos permite relacionar tres parámetros importantes de los cuerpos.

La masa de un cuerpo, además de ser una propiedad, es también una medida cuantitativa de la resistencia que ofrece un cuerpo a acelerarse o cambiar linealmente su velocidad. Si la ecuación (3. i. 3) se reescribe de esta forma:

$$F - ma = 0$$

²Primera ley de Newton. Isaac Newton la estableció en 1687, junto con sus otras dos leyes del movimiento.

se observa que el factor $-ma$ es un vector y se le denomina como *vector fuerza de inercia*. La palabra "inercia" se utiliza debido a que la masa, como ya se dijo, es una medida de la resistencia o inercia que tiene un cuerpo para efectuar un cambio de velocidad³.

La inercia de un cuerpo se manifiesta en sí misma como una fuerza, sólo si actúa sobre el cuerpo una fuerza desequilibradora, que le provoque una aceleración.

Hasta ahora hemos estado estudiando los conceptos básicos de la aceleración y de las fuerzas que la producen. Además, vimos que hay un factor muy importante, la masa, la cual es también una medida de la inercia de todo cuerpo. Es importante comprender lo anterior, para poder entender el funcionamiento de los acelerómetros.

b. Galvanómetros.

Por regla general, cualquier dispositivo utilizado para medir o detectar una corriente eléctrica, se llama galvanómetro⁴. El principio bajo el cual están diseñados la mayoría de estos aparatos, está basado en el par que se genera en un conductor o bobina cuando está dentro de un campo magnético y circula una corriente por él.

La mayor parte de los galvanómetros usados son del tipo D'Arsonval, de cuadro móvil. En estos hay un imán fijo y su campo rodea a una bobina, la cual puede girar dentro del campo. En la figura 1 se puede observar el esquema básico de un galvanómetro de cuadro móvil.

El cuadro móvil está compuesto, en general, por unas 20 vueltas de fino alambre de cobre aislado que se encuentra fijamente sujeto a través de dos pivotes, los cuales permiten que gire libremente sobre su eje.

³Es importante hacer notar que la "fuerza de inercia" no es una fuerza. Además, inercia, técnicamente se aplica al movimiento rotacional, mientras que masa es para el movimiento lineal. Hibbeler, R. C.: "Mecánica para Ingenieros, Dinámica". CECSA, México D. F. 1989.

⁴Sears, Francis W.: "Fundamentos de Física, Electricidad y Magnetismo". Editorial Aguilar, España 1961.

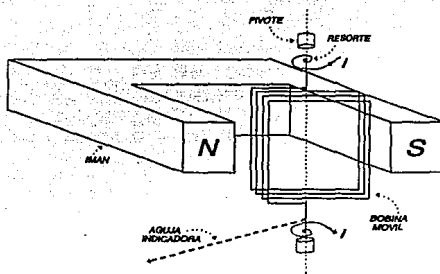


Figura 1
Esquema básico del galvanómetro tipo D'Arsonval.

A los lados del cuadro se encuentran los dos polos (N y S) de un imán permanente. La corriente llega a la bobina a través de las terminales que están ubicadas junto a los pivotes, las cuales también funcionan como resortes de recuperación. Así mismo, hay pegado al eje una flecha indicadora, la cual señala el desplazamiento que ha tenido el cuadro.

Cuando no circula ninguna corriente por la bobina, el cuadro se encuentra en equilibrio y fijo en la posición que los resortes permiten. Cuando pasa una corriente a través de la bobina, la aguja se desplaza una cierta distancia, la cual es una medida proporcional de la intensidad de corriente que circula por el cuadro.

Para una corriente dada, que pasa a través del cuadro del galvanómetro, hay un cierto desplazamiento θ que es directamente proporcional a la corriente i , al número de vueltas N de la bobina y a su superficie A , e inversamente proporcional a la constante de torsión k del resorte.

$$\theta = \frac{iNA}{k}$$

El movimiento de la bobina y consecuentemente de la aguja, sucede debido a que aparecen fuerzas sobre los lados laterales del cuadro. Esto produce un par que obliga a la bobina a girar sobre su eje, figura 2. El cuadro deja de girar cuando las fuerzas o par

que aparecen en la bobina debido al flujo de corriente y las fuerzas de los resortes se equilibran.

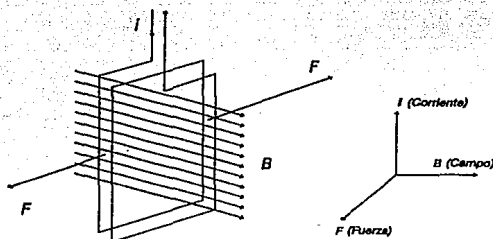


Figura 2. El efecto que produce una corriente (i) en una bobina cuando se encuentra en un campo magnético (B), es una fuerza (F).

El par que se genera en el cuadro se puede entender si usamos la regla de la mano derecha. Con la dirección de la corriente y del campo podemos determinar que dirección tiene la fuerza que produce el desplazamiento. Los ejes que se observan en la parte derecha de la figura 2, son los que definen la regla. Estos son perpendiculares entre sí y señalan las direcciones de la fuerza, la corriente y el campo. Para esto, cuando una corriente fluye a través de un conductor y éste se encuentra dentro de un campo magnético, se genera una fuerza. Esta fuerza es la que hace que se mueva el cuadro de la bobina.

Una vez comprendido el funcionamiento del galvanómetro, podemos entonces pasar a explicar el funcionamiento del transductor de aceleración, cuyo diseño está basado en el uso de galvanómetros como uno de sus elementos básicos.

c. Funcionamiento del Transductor.

Un acelerómetro es un dispositivo transductor cuya función es la de transducir la aceleración de un cuerpo en movimiento. Por lo general, en los acelerómetros, la aceleración actúa sobre un elemento sensor, una *masa sísmica*. El movimiento de la masa sísmica sólo puede hacerse en la dirección del eje sobre cuya aceleración se desea sensar.

Los acelerómetros que estudiaremos son conocidos como servoacelerómetros. El prefijo *servo* se debe a que el mecanismo cuenta con una realimentación. El movimiento de la masa sísmica es normalmente amortiguado. Cuando se aplica una aceleración a la caja del acelerómetro, la masa sísmica se mueve con respecto a ésta. Cuando no hay aceleración, la corriente de corrección que se genera, junto con los resortes, regresan a la masa a un equilibrio mecánico y eléctrico.

Estos transductores tienen dos elementos fundamentales, un galvanómetro con un péndulo y un detector de posición. Dichos dispositivos, a través de la masa sísmica, son los que permiten sensar la aceleración.

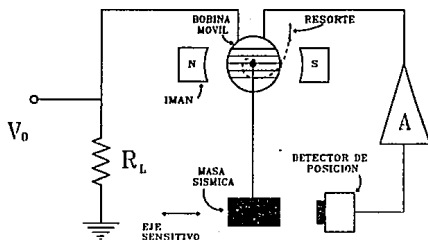


Figura 3
Diagrama esquemático de un servoacelerómetro básico.

Como se observa en la figura 3, el galvanómetro tiene sujeto un péndulo con una masa en su extremo inferior. Esta es la masa sísmica. A un lado de la masa se encuentra el detector de posición, que mide la distancia que los separa, o bien, detecta el movimiento que tiene la masa.

Todo el sistema se encuentra empaquetado en una caja especial que se acopla a un cuerpo vibrante. El único elemento que no está sujeto a la caja, es la bobina con el péndulo y la masa, estos están sobre un juego de pivotes que les permiten moverse.

Cuando hay una oscilación, la caja del acelerómetro se mueve junto con el cuerpo como si fueran uno solo. La masa sísmica, antes del movimiento se encuentra en reposo, pero cuando ocurre la vibración trata de mantenerse en esa posición; efecto que como ya vimos se debe a la inercia que tienen todos los cuerpos. Como la caja del acelerómetro

se mueve junto con el detector de posición y la masa trata de mantenerse estática, se produce una separación entre ellos, la cual es sensada por el detector de posición⁵.

Representando al servoacelerómetro en un diagrama de bloques, figura 4, podemos ver que la separación o distancia, usando la nomenclatura correcta, se denomina como señal de error (e) y llega al detector de posición. A la salida de éste bloque se produce una señal que es proporcional a la distancia que separa al detector de posición con la masa sísmica. De aquí, pasa a un amplificador, A , que aumenta el nivel de la señal y la presenta como una corriente, I_0 . De esta forma, se llega a un nodo donde hay una realimentación y una resistencia de carga, R_L , que es la salida del transductor. Por la realimentación pasa la corriente que proporciona el amplificador y llega al galvanómetro que en la figura se representa como el imán y la bobina.

El propósito de la realimentación, con la corriente que pasa a través del galvanómetro, es hacer que el péndulo, con la masa, se muevan a una posición tal que la distancia, entre el detector de posición y la masa sísmica, vuelva a ser la misma que se tenían antes de la vibración.

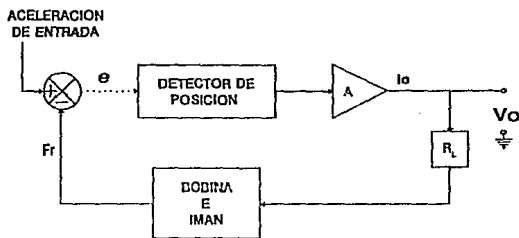


Figura 4.
Diagrama de bloques de un servoacelerómetro.

La corriente que se requiere para que el péndulo recupere su posición, I_0 , se puede medir y resulta ser una medida de la fuerza que se le aplicó al cuerpo para que se moviera. Como ya vimos antes, la fuerza es proporcional a la aceleración, por lo que el medir la corriente también puede verse como una medida de la aceleración. Entonces,

⁵En los servoacelerómetros, la separación u oscilación máxima entre la masa sísmica y el detector de posición es aproximadamente de 2 mm.

F_r , es la fuerza de recuperación, o par que se genera en el galvanómetro, que se requiere para equilibrar la fuerza que se le aplicó al cuerpo.

Al moverse el péndulo con la masa sísmica, la distancia que hay entre la masa y el detector de posición se acerca a la posición original, por lo que gradualmente se reduce la corriente. Este es un proceso recursivo, así que se llega a un momento en que se detecta un cambio de distancia cero y es cuando las fuerzas están equilibradas. Teóricamente, en éste momento la corriente I_0 es igual a cero y el detector de posición no está sensando un movimiento o cambio de distancia. Como el movimiento es una vibración, el detector de posición está sensando continuamente un cambio de posición, entonces el estar midiendo la corriente de salida significa que se está midiendo la aceleración que se le está aplicando al cuerpo vibrante que tiene sujeto el servoacelerómetro.

Los diagramas 3 y 4 son una representación generalizada del funcionamiento de los servoacelerómetros. En el caso que nos ocupa, los transductores que se usan son servoacelerómetros Donner, de posición horizontal, y tienen la configuración que se muestra en la figura 5.

La línea punteada delimita al servoacelerómetro. El bloque que dice *restaurador*, es un elemento externo al transductor. En éste tipo de dispositivos y en particular los Donner de posición horizontal, poseen seis terminales, las cuales tienen un uso determinado y sirven para hacer funcionar al servoacelerómetro. Las terminales 1 y 2 son la conexión a tierra, o bien, son el punto de referencia sobre el cual están basadas todas las calibraciones. Los contactos 3 y 4, son las terminales de la malla de realimentación. Se presenta de esta forma con el propósito de que el usuario pueda ajustar los niveles de la señal de salida y los parámetros de control, dependiendo de las necesidades. Las terminales 5 y 6 son para energizar al acelerómetro ya que éste es un dispositivo activo. Los niveles de voltaje que se recomiendan en estos Donner son de +15V y de -15V.

En el bloque marcado como restaurador, hay un circuito que polariza y controla la malla de realimentación del servoacelerómetro. La resistencia R se encuentra ahí para limitar la corriente, que es la señal eléctrica que sirve como medida de la aceleración. El restaurador se usa por las razones expuestas a continuación.

Hasta ahora hemos hablado de los principios y las características de funcionamiento de los servoacelerómetros, pero hay varios factores que deben mencionarse antes de continuar con la descripción del acondicionador.

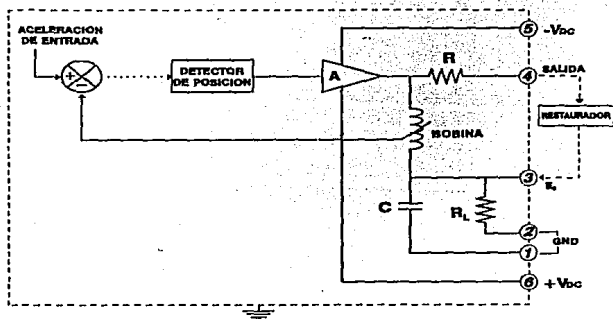


Figura 5
Configuración y modo de conexión de los servoacelerómetros usados.

Como ya se dijo, los servoacelerómetros requieren ser polarizados por medio de una fuente de corriente directa que les proporcione unos ± 15 V. En un caso teórico, el momento en el que se polariza el transductor no es crítico, pero en un caso real sí lo es, sobre todo con los Donner.

Este tipo de transductores está diseñado para trabajar en posiciones horizontales, aunque no siempre se puede lograr que esto sea así, por lo que el péndulo que cuelga del galvanómetro no se encuentra en la posición central, donde el detector de posición no sensa movimiento y no proporciona la señal de corrección.

La función del sistema de control, del servoacelerómetro, es corregir o colocar en posición a la masa sísmica. Esto se hace muy rápido, por lo que si se enciende de forma abrupta, hay un transitorio y si el péndulo se encuentra fuera de lugar, entonces la corriente de corrección que se genera es muy grande y al pasar por la bobina del galvanómetro se genera un par con la fuerza suficiente para lanzar al péndulo contra el detector de posición, produciendo que se atore con éste. En éste momento se considera que el péndulo se encuentra bloqueado eléctricamente y mecánicamente.

Para evitar que se atore el péndulo, se puede abrir la malla de realimentación del servoacelerómetro, la que está en el restaurador, y luego se enciende; ver capítulo 4.. Con esto se evita que el detector de posición sence un desplazamiento y trate de

corregirlo. Dejando pasar un poco de tiempo, unos 4 segundos, lo suficiente para que se estabilice el sistema, se cierra la malla de realimentación. Ahora el detector de posición trata de corregir la posición del péndulo, pero como ya se estabilizó, la intensidad de corriente que pasa por el galvanómetro no es tan grande ni aparece de forma brusca, así que se evita el lanzamiento de la masa sísmica y el bloqueo.

El segundo efecto que se presenta en los servoacelerómetros como éste, es el offset que aparece en la señal que proporciona el transductor. Esto ocurre cuando el sistema se encuentra estable pero el péndulo no forma una perpendicular con el plano horizontal, ver figura 6.

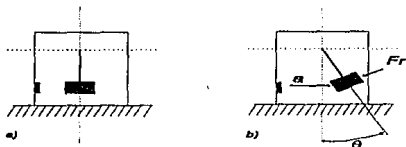


Figura 6.

a) Posición horizontal del servoacelerómetro. b) Posición no horizontal, provocando un desplazamiento θ en el péndulo.

El péndulo se encuentra fuera de su lugar debido a que la fuerza de la gravedad está actuando sobre la masa sísmica y la corriente de corrección no es suficiente para mover al péndulo. Al medirse la corriente, se observa que hay un cierto desplazamiento con respecto a tierra. A éste desplazamiento se le conoce como offset, o bien, también se dice que la señal tiene sumada una señal de corriente directa, que es la que le produce el desplazamiento. Este fenómeno se puede corregir si se le suma a la señal otro offset, pero con signo contrario. Esto es fácil hacerlo en el lazo de realimentación que se encuentra en el restaurador.

Hasta aquí se ha explicado como funcionan y operan los servoacelerómetros. Se ha hablado de ellos en forma general cuando se trataba del principio de funcionamiento, pero en los casos operativos y en los prácticos, nos referimos en particular a los fabricados por la empresa Sysron Donner.

4. RESTAURADOR.

En el capítulo anterior se dio una explicación sobre el funcionamiento de los servoacelerómetros que se están usando. Como ya se dijo, estos son servomecanismos, que para funcionar, requieren de una malla de realimentación.

Con la realimentación se fijan las condiciones de trabajo del acelerómetro y por tanto su estabilidad. Por otra parte, el flujo de corriente que circula a través de la malla de realimentación, es la señal eléctrica de interés que se usa para medir la aceleración.

La función del restaurador es principalmente la de polarizar, o bien, dar energía al acelerómetro. Además, controla que el acelerómetro no se bloquee cuando se enciende y evita que la señal esté cerca de los límites o rangos de operación establecidos por la polarización, que en éste caso son de +15V y -15V. Figura 1a y 1b.

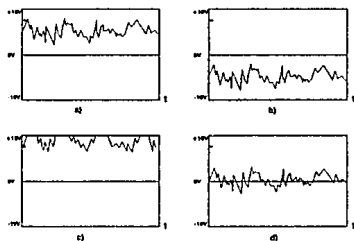


Figura 1.

Señal de un acelerómetro. a) Nivel de offset positivo, b) Nivel de offset negativo, c) Señal fuera de rango, d) Caso deseable.

Cuando la señal se encuentra fuera de la zona central, o bien, lejos de 0V, significa que hay una componente de corriente directa (CD), u *offset*¹, sumada a la señal del

¹*Offset* se usa para indicar que hay un corrimiento de cero.

transductor. Este *offset* puede tener diversas amplitudes y se debe a la posición que tiene el péndulo con respecto al sensor de posición. Este detecta que el péndulo no está en el centro y su forma de indicarlo es mediante una corriente de CD. Este fenómeno aparece cuando la posición del acelerómetro no es totalmente horizontal.

Para desaparecer éste nivel de CD se usa un circuito de ajuste a cero; para esto se usa un Convertidor Digital-Analógico (CDA). Esta parte del restaurador es muy importante. En ocasiones, la amplitud de las señales es muy pequeña, por lo que deben amplificarse para poder analizarlas. Si se le da una ganancia cuando hay presente un nivel de DC, éste también será amplificado y se corre el riesgo de que la señal de interés sobre pase los límites de la polarización, Figura 1c. Esto implica que se pierde información al no tener la señal completa. El caso deseable y uno de los objetivos del restaurador es tener a la salida una señal que esté cerca de 0V. Figura 1d.

a. Malla de Realimentación.

Como se mencionó al principio de éste capítulo, la malla de realimentación tiene varias funciones.

La primera es mantener al péndulo en una posición determinada, en el centro. Cuando se energiza un acelerómetro, es muy difícil que el péndulo se encuentre en la posición adecuada, por lo que se genera una señal de error, la cual, a través de una corriente, proveniente de la realimentación, trata de llevar al péndulo a la zona central. Como la corriente llega de improviso debido a que se enciende de golpe, el péndulo sufre una aceleración tal que lo desplaza hacia alguno de los extremos, ocasionando, en la mayoría de los casos, que se atore.

Este fenómeno se debe al diseño del transductor. Para corregir esta situación, lo que se propuso fue lo siguiente: primero se desconecta la fuente de alimentación del acelerómetro, que es programable y proporciona $\pm 15V$. Ver apéndice a.. En segundo lugar, mientras el acelerómetro no tiene energía, se abre la malla de realimentación, usando un pequeño relevador, así como se muestra en la figura 2. Después de esto se energiza al transductor. Como la malla está abierta, la corriente que se genera a raíz de la señal de error no llega a la bobina, por lo que el péndulo no se mueve.

En éste momento el acelerómetro se encuentra estable y es posible cerrar la malla. La señal de error que se genera no es tan grande como cuando se polariza el transductor, por lo que el péndulo ya no es lanzado con tanta fuerza hacia los extremos.

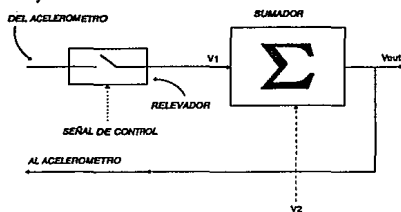


Figura 2.

Diagrama esquemático de la malla de realimentación. V2 es la señal que proviene del convertidor D/A. La señal de control proviene del sistema de control.

La señal que proporciona el acelerómetro, probablemente tiene una componente de CD, que como vimos, es importante eliminar. Para esto se cuenta con un sumador o amplificador diferencial y con un CDA que agrega un nivel de CD a la señal. Más adelante se explica el circuito de ajuste y de cruce por cero.

El sumador se encuentra dentro de la malla de realimentación y su función es la de agregar un nivel de CD, proporcionado por el CDA, a la señal que genera el acelerómetro. Cuando esto sucede, el péndulo se mueve y poco a poco se va colocando en una zona cercana al centro, proporcionando una señal como la de la figura 1d.

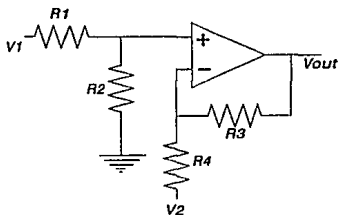


Figura 3.

Diagrama eléctrico del sumador.

Para determinar el valor de V_{out} a partir de V_1 y V_2 , se aplica el siguiente desarrollo: Primero se considera que el valor de todas las resistencias es igual. Luego se determina el voltaje en la terminal positiva (V_p).

$$V_p = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_2 = \frac{V_2}{2} \quad (4. i. 1)$$

Después, para calcular el voltaje en la terminal negativa (V_n), aplicamos el teorema de superposición, el cual establece la siguiente condición:

$$V_n = V_{n_1} + V_{n_2} \quad (4. i. 2)$$

A raíz de esto:

$$V_{out} = 0, V_2 \neq 0 \quad (4. i. 3)$$

Obteniéndose:

$$V_{n_1} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_2 = \frac{V_2}{2} \quad (4. i. 4)$$

Además, para V_{n_2} :

$$V_{out} \neq 0, V_2 = 0 \quad (4. i. 5)$$

Dando como resultado:

$$V_{n_2} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{out} = \frac{V_{out}}{2} \quad (4. i. 6)$$

Finalmente, sustituyendo la ecuación (4. i. 4) y (4. i. 5) en la ecuación (4. i. 2) y considerando que $V_p = V_n$, obtenemos:

$$V_{out} = V_1 - V_2 \quad (4. i. 7)$$

De esta forma se obtiene que el voltaje a la salida del sumador es la diferencia entre las dos entradas. Como se puede observar, cuando V_2 es negativo, las dos señales se suman y cuando es positivo se restan. De esta forma trabaja el sumador. A través de V_1 llega la señal procedente del acelerómetro y en V_2 está presente el voltaje que llega del bloque de ajuste de cero.

b. Ajuste de Cero y Cruce por Cero.

Para realizar el ajuste de cero, o en otras palabras, eliminar la componente de CD que tiene la señal, se usa un Convertidor D/A y un circuito detector de cruce por cero.

El proceso de ajuste se realiza de la siguiente manera:

Primero se manda una palabra digital de 8-bits a un CDA *latcheado*. El CDA la convierte en un voltaje analógico. El valor de éste voltaje depende de los voltajes de referencia del convertidor, de un arreglo de resistencias y de la palabra que llega al CDA. Los voltajes máximos que se usan en esta etapa son de +11.32 V y -11.32 V.

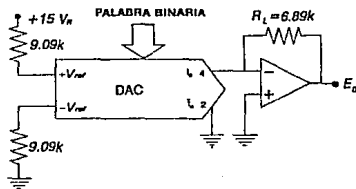


Figura 4.

Diagrama del Convertidor D/A que se encuentra en el restaurador, como parte del ajuste de cero.

Para calcular los voltajes máximos, se usan las siguientes ecuaciones:

$$E_0 = I_{FS} * R_L \quad (4. ii. 8)$$

$$I_{FS} = \frac{255}{256} I_{ref} \quad (4. ii. 9)$$

$$I_{ref} = \frac{+V_{ref}}{R_{ref}} \quad (4. ii. 10)$$

Las ecuaciones se obtienen de los manuales de especificaciones, ver apéndice. Sustituyendo valores en las tres últimas ecuaciones, se obtienen los siguientes resultados:

$$I_{ref} = \frac{+15V}{9.09k\Omega} = 1.65 \text{ mA} \quad (4. ii. 11)$$

$$I_{FS} = \frac{255}{256} * 1.65 \text{ mA} = 1.643 \text{ mA} \quad (4. ii. 12)$$

Finalmente, el voltaje proporcionado por el CDA:

$$E_0 = 1.643 \text{ mA} * 6.89k\Omega = 11.32V \quad (4. ii. 13)$$

Un FFh en las entradas digitales del CDA significa que en la salida analógica se tendrá un voltaje máximo (4. ii. 13). Si éste se suma a la señal del acelerómetro (a través de

V2), como se puede apreciar en la figura 3, el péndulo será desplazado hacia un extremo, llegando al límite del posible desplazamiento, habiendo un nivel máximo de CD.

En segundo lugar, se comienza a decrementar, de uno en uno, la palabra binaria que llega al CDA. El propósito es ir acercando gradualmente, a la señal, a un nivel muy cercano a 0V, figura 1d.

Simultáneamente se está verificando que en la señal del acelerómetro no haya un cruce por cero. Esto se logra viendo que la señal no cambie de signo.

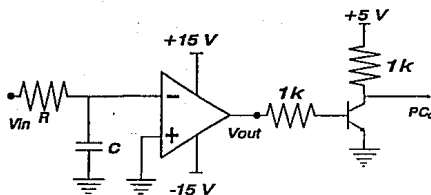


Figura 5

Diagrama del circuito detector de cruce por cero. El arreglo RC es un filtro pasa-bajas de primer orden, con frecuencia de corte en 338 Hz.

El circuito de cruce por cero es básicamente un comparador inversor, figura 5. En éste caso, cuando llega una señal que es mayor a cero volts ($V_{in} > 0V$), el comparador a la salida mantiene constante un voltaje igual al de la alimentación negativa (4. ii. 15). Cuando el voltaje es menor a cero ($V_{in} < 0$), en la salida del comparador hay un voltaje igual al de la polarización positiva (4. ii. 14). Ver figura 6.

$$\text{Si } V_{in} < 0, \text{ entonces: } V_{out} = +15V \quad (4. ii. 14)$$

$$\text{Si } V_{in} > 0, \text{ entonces: } V_{out} = -15V \quad (4. ii. 15)$$

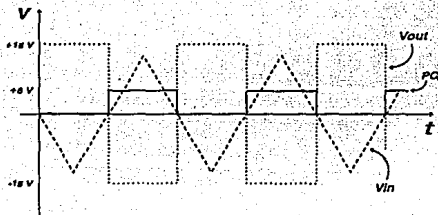


Figura 6
Gráfica de las señales de entrada y salida en el detector de cruce por cero. V_{in} representa la señal de entrada, mientras que V_{out} es la señal de salida.

En la figura 5 se puede ver que después del comparador hay un transistor en configuración emisor común. La función de éste dispositivo, que está polarizado con +5V, es proporcionar en la salida PC0 un voltaje que sea o bien 5V ó 0V.

El transistor está trabajando en corte y saturación, esto se puede entender mejor si se piensa en el transistor como si fuera un interruptor. Cuando en la base se tiene un voltaje de +15V, el transistor se encuentra en saturación y es como si el colector y el emisor estuvieran puenteados, por lo que en PC0 habrá 0V. Cuando en la base el voltaje es -15V, el dispositivo está en corte y esto es como si no hubiera conexión entre el colector y el emisor, dando como resultado que en PC0 hay +5V.

Esto se puede ver de la siguiente manera, cuando el signo de la señal V_{in} es positivo, se tiene como resultado un uno lógico y cuando es negativo, se tiene un cero lógico. Estos niveles lógicos o digitales son detectados por un sistema digital, un microcontrolador, que es el que se encarga de controlar todo el proceso.

En la figura 5 también puede observarse que antes del comparador hay un circuito RC. Este es un filtro pasa-bajas y su función es la de amortiguar las rápidas oscilaciones que hay en la señal. Este filtro corta a 338 Hz. Si no estuviese presente, cuando la señal ya está muy cerca de cero volts, entonces el detector de cruce por cero estaría cambiando, de estado bajo a alto y viceversa, constantemente.

En el momento en que se detecta un cambio de signo, se deja de decrementar la palabra que llega al convertidor. Es importante hacer notar que el CDA debe seguir manteniendo la última palabra que recibió. Si se quitara, entonces la señal del

transductor recuperaría el nivel de offset que tenía originalmente. Debido a esto se usa un *latch*. Este tiene la cualidad de mantener presente a la salida la palabra que recibe aun cuando esta haya desaparecido de la entrada.

Este es en sí el funcionamiento del restaurador. Como se puede apreciar por la descripción, hay una interacción continua con el sistema de control. Este se encarga de generar y mandar la palabra binaria que recibe el Convertidor D/A, también es el que enciende o apaga la fuente de alimentación del acelerómetro. Además, es el que se encarga de abrir o cerrar la malla de realimentación.

5. AJUSTE FINO DE CERO.

Hasta ahora hemos visto cuales son las características de los servoacelerómetros, del restaurador y del porque y como funciona éste. El restaurador es una etapa necesaria cuando se quiere trabajar con servoacelerómetro ya que estos requieren de un circuito adicional para poder funcionar.

La señal del servoacelerómetro no sufre ninguna modificación a lo largo del restaurador, tan solo tiene un ajuste de *offset* que permite que la siguiente etapa pueda operar correctamente. En el caso de que se quisiera trabajar con algún otro tipo de transductor, el restaurador del servoacelerómetro no serviría y sería necesario hacer uno especial para el transductor que se desea usar. El resto del sistema no requeriría ser alterado o rediseñado para que se usara otro transductor, de hecho, el diseño se hizo con el propósito de que el resto de las etapas, después del restaurador, fueran de propósito general y pudieran ser usadas por cualquier tipo de instrumento que maneje señales de voltaje. Debido a esto se considera que la primera etapa del acondicionador comienza con éste bloque de ajuste fino de cero.

En éste capítulo estudiaremos el proceso mediante el cual se lleva a cabo el ajuste fino de ceros. Como ya se mencionó en el capítulo anterior, la señal del servoacelerómetro por lo general viene mezclada con una señal de CD u *offset*. Como después de esta etapa hay un amplificador, si no se elimina el *offset*, el nivel de CD que hay en la señal también será amplificado y puede suceder que la señal sobrepase el rango de trabajo.

En el restaurador, la señal es ajustada con ayuda la de un convertidor D/A y de un sumador. Aquí la señal puede encontrarse con un *offset* que está dentro de un rango que va desde los 0 V hasta -44 mV. A primera vista se podría considerar que la señal se encuentra muy cerca del cero, pero esto no necesariamente es así. En ocasiones, la amplitud máxima de las señales es de milivolts o menos y si se aumentan las escalas de lectura o se amplifica hasta que adquiere un valor adecuado para poder observarla, entonces también se amplifica el *offset* y la señal se perdería o se saldría del rango de trabajo. Para evitar que se pierda debido a la amplificación, se implementó un sistema de ajuste de cero que opera en rangos reducidos, muy cercanos a cero volts, por lo que se le considera como un ajuste fino de cero.

El método de ajuste está basado en la aplicación de los Convertidores D/A o "CDA". En éste capítulo veremos cuales son las características de los CDA, y de como se aplican para llevar a cabo el ajuste de cero, además de describir el circuito sumador y el circuito detector de cruce por cero.

a. Convertidores Digital-Analógico.

El uso de sistemas mixtos, donde se utilizan bloques digitales y analógicos, ha requerido de la aplicación de elementos capaces de traducir palabras digitales a valores analógicos y viceversa. Con el desarrollo de estos dispositivos ha sido posible mejorar los sistemas que sólo son analógicos o bien sólo digitales, permitiendo una mayor rapidez en el proceso de señales, eficiencia en la adquisición de datos, sistemas de control más flexibles y mejores y muchas otras aplicaciones. En éste capítulo únicamente veremos aquellos que transforman palabras digitales en voltajes analógicos, o sea, los Convertidores Digital-Analógico¹.

Un Convertidor D/A acepta palabras digitales como entrada y las traduce o convierte a un voltaje analógico. Los convertidores pueden diseñarse para que acepten la palabra digital en cualquier tipo de código, como por ejemplo, el BCD o el código binario.

Gran parte de los convertidores se han desarrollado con el propósito de servir como interfaz entre el mundo digital y el analógico. Hay una gran variedad de ellos y además existen varios métodos que permiten realizar las conversiones. Uno de los más comunes debido a su sencillez y fiabilidad, son los que utilizan un arreglo de resistencias conocido como circuito R-2R.

En la figura 1 se muestra el circuito de un Convertidor D/A, con un arreglo R-2R. Este arreglo solo requiere dos valores de resistencias, R y 2R. El diagrama está hecho para una palabra de 4 bits, de ser necesario agregar más, basta con poner otros interruptores y aumentar la malla de resistencias conservando la razón R-2R.

Como parte de la explicación del circuito, podemos empezar suponiendo que el bit S_0 está en uno mientras que los demás están aterrizados o bien en cero ($S_3S_2S_1S_0 = 0001$).

¹También suele llamarseles DACs, siglas que provienen del nombre en inglés, Digital-to-Analog Converter.

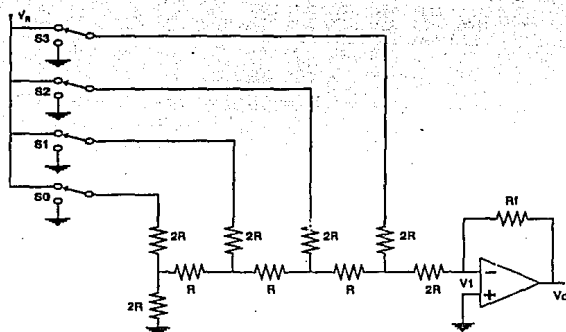


Figura 1.
Convertidor D/A usando un circuito R-2R.

Es importante hacer notar que los bits de la palabra digital sólo accionan los switches y no proporcionan voltaje al circuito. Los interruptores pueden ser electrónicos, usando transistores.

Una vez que S_0 está conectado a V_R y el resto está a tierra, podemos aplicar el teorema de Thevenin y reducir el circuito hasta obtener el equivalente que se muestra en la figura 2. El voltaje V_1 , que es el voltaje de entrada del amplificador operacional, resulta ser $V_R/16$ en serie con una resistencia $3R$.

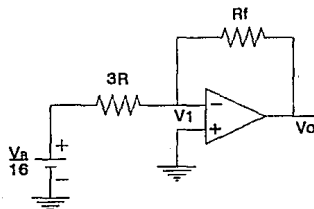


Figura 2.
Circuito equivalente con S_0 igual a uno.

Si ahora hacemos que S_1 sea igual a un uno lógico (esto ocurre cuando el interruptor está conectado a V_R), y si el resto de los interruptores quedan aterrizados para que sean cero (0010), entonces podemos realizar otro análisis como el anterior. El resultado que se obtiene es que V_1 ahora vale $V_R/8$ junto con una resistencia $3R$, en vez de $V_R/16$ como en el caso anterior.

Si seguimos con éste análisis, llegaremos al caso donde el bit más significativo, S_3 , es uno y todos los demás son cero (1000). Aquí se obtiene que V_1 es igual a $V_R/2$ junto con una resistencia $3R$. Aplicando el teorema de superposición podemos ver que el voltaje de salida del circuito de la figura 1 es²:

$$V_0 = -\frac{R_f V_R}{3R} \left(\frac{S_3}{2^1} + \frac{S_2}{2^2} + \frac{S_1}{2^3} + \frac{S_0}{2^4} \right)$$

o bien, escribiendo de otra forma,

$$V_0 = -\frac{R_f V_R}{48R} (2^3 S_3 + 2^2 S_2 + 2^1 S_1 + 2^0 S_0) \quad (5. i. 1)$$

El valor del voltaje de salida V_0 está en función, principalmente, del voltaje de referencia V_R . El amplificador operacional se utiliza para el acoplamiento de impedancias, para que la salida analógica sea un voltaje en vez de una corriente y para ajustar el nivel de voltaje de la señal analógica. El bit más significativo es el que más aporta al voltaje de salida y como se puede apreciar en la ecuación (5. i. 1), debido al tipo de conexión que se hizo en el amplificador operacional, V_0 es negativo. Es posible modificar el signo de la señal si se le agrega un *offset* suficiente para que cruce los cero volts y quede del lado positivo. Para hacer esto, se debe conectar en lugar de la tierra de los interruptores, una fuente negativa con un valor adecuado, de tal forma que haya un voltaje de referencia negativo y uno positivo. Así se logra que la señal pase de la parte positiva a la negativa o al contrario.

Los Convertidores Digital/Analógico son circuitos que proporcionan una salida en función de la palabra digital que se les aplica; si se cambia esta palabra, entonces el

²Schilling, Donald L. y Belove, Charles.: "Electronic Circuits, Discrete and Integrated." McGraw-Hill, Third Edition, Singapore 1989.

voltaje de salida cambia, lo mismo sucede si se quita la palabra binaria y se dejan las terminales al aire. Hay casos donde se necesita mantener un cierto voltaje por tiempo indefinido, esto implica que la palabra binaria que llega al convertidor no debe cambiar o desaparecer. Como la palabra está en la parte que corresponde al mundo digital, la solución se encuentra usando un dispositivo digital, un *latch*.

Un *latch* es un dispositivo compuesto por un flip-flop, es capaz de mantener en su salida un nivel de voltaje por tiempo indefinido, a pesar de que en la entrada haya desaparecido éste nivel (siempre y cuando se le esté suministrando energía). Se caracteriza por que su funcionamiento no depende en los flancos de subida o bajada de la señal digital, opera solo cuando los niveles están en estado alto o bajo. Un dispositivo común es el 74373. Este tiene 8 *latches* en paralelo y tiene varias características: son transparentes, las entradas y las salidas están controladas por habilitadores, además de que las salidas están en tres estados.

Los *latch* como el anterior, son dispositivos que se utilizan en los buses (de datos o de direcciones), cuando se desea separar una parte del sistema digital, pero sin perder información. Si se conecta uno de estos dispositivos se puede controlar que datos pasan, cuales no y cuales deben mantenerse.

En el caso de los CDA, los *latch* son muy útiles. Colocándolos antes de la entrada de la palabra binaria, es posible mantenerla aun cuando ya haya desaparecido. De ésta forma se evita que el convertidor deje de proporcionar un voltaje analógico. Debido a esto, para mayor facilidad en la explicación y descripción del acondicionador, a partir de ahora, cada bloque que esté indicado como CDA, estará compuesto por un circuito Convertidor D/A, un *latch* que mantenga la palabra y un amplificador operacional, tal como lo muestra la figura 3, que aparece a continuación.

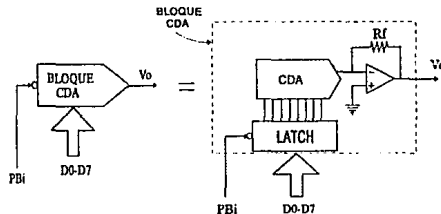


Figura 3.
Elementos que componen un bloque convertidor.

Hasta aquí hemos visto como funcionan los CDA y que dispositivos digitales son útiles cuando se emplean éstos. Ahora podemos pasar a la explicación de como se lleva a cabo el ajuste fino de cero con ayuda de los convertidores.

b. Proceso de Ajuste.

En la figura 4 se muestra un diagrama de bloques que describe el proceso utilizado para llevar a cabo el ajuste de cero. Como se puede apreciar, hay dos convertidores y junto con el que se encuentra en el restaurador, suman tres.

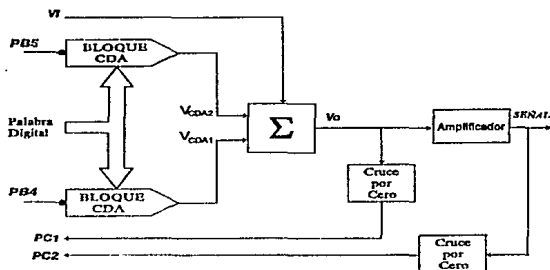


Figura 4.

Proceso de ajuste fino. V_i es la señal analógica que se desea ajustar y V_o es la señal ya ajustada, antes del amplificador.

La señal V_i proviene de la etapa del restaurador donde, como ya se mencionó, hubo un primer ajuste, por lo que la señal se encuentra dentro de un rango que puede abarcar desde 0V hasta aproximadamente -44 mV. La señal en éste punto tiene una polaridad negativa, por lo que para acercarla a cero volts es necesario sumarle un voltaje positivo. Esto se lleva a cabo con el segundo convertidor, aquel que proporciona el voltaje V_{CDA1} . Este dispositivo está calibrado para que el incremento de cada bit corresponda a un incremento de 1.9 mV en la salida. Está ajustado de tal forma que el voltaje máximo es de +500 mV. Para saber cuando debe terminar el incremento de la palabra binaria, hay un circuito que detecta cuando ocurre el cambio de signo (en éste caso de menos a más); en ese momento la palabra deja de crecer y se mantiene en el bloque CDA.

El tercer CDA entra entonces en operación restándole a la señal V_i un voltaje para que vuelva a cruzar por cero, pero en éste caso el CDA está ajustado para que su resolución sea de 0.195 mV por cada bit, permitiéndole proporcionar hasta -50 mV , cuando en la palabra hay puros unos.

En la figura 5 se muestra como se va acercando a cero la señal conforme pasa el tiempo. El voltaje V_{A1} que es igual a 11.32 V , indica el nivel de la señal cuando está en el restaurador, luego la señal se va acercando a cero hasta llegar al voltaje V_{A2} . En éste punto la señal ya salió del restaurador y está llegando a la etapa de ajuste fino de cero. El segundo convertidor comienza a trabajar y lleva a la señal hasta V_{A3} , aquí comienza la rutina del tercer convertidor que es capaz de dejar a la señal dentro de un rango que va desde 0 a -0.195 mV .

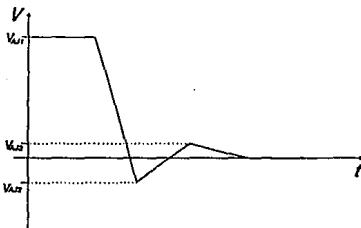


Figura 5.

En esta gráfica se muestra cuando opera cada bloque convertidor.

Con esto V_0 se encuentra ajustado a cero, ya no hay peligro que después del amplificador, la señal se pierda a causa del *offset* que se tenía. El bloque indicado como sumador (Σ) es el que se encarga de sumar o restar los voltajes proporcionados por los convertidores. En la figura 6, que se muestra a continuación, se observa con detalle el circuito que compone a éste bloque.

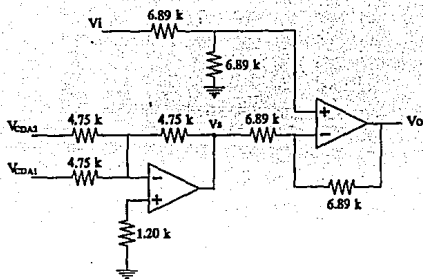


Figura 6.

Circuito sumador. El primer amplificador operacional funciona como sumador y el segundo como amplificador diferencial.

En el primer amplificador operacional, donde aparecen los voltajes V_{CDA2} y V_{CDA1} , conforma a un circuito sumador. A la salida de esta parte del circuito, el voltaje es igual a la suma de los dos voltajes de entrada.

$$V_S = -(V_{CDA1} + V_{CDA2})$$

La parte restante del circuito constituye a un amplificador diferencial, o bien un restador. El análisis de éste circuito se efectuó en el capítulo 4., por lo que podemos usar la ecuación (4. i. 7), escribiéndola de la siguiente manera,

$$V_0 = V_i - V_S \quad (5. ii. 1)$$

y si sustituimos el valor de V_S

$$V_0 = V_i + V_{CDA1} + V_{CDA2} \quad (5. ii. 2)$$

La ecuación (5. ii. 2) muestra como se suman las señales de los convertidores con la señal de interés, que es la que se desea ajustar. Se hace notar que V_{CDA1} será un voltaje positivo, mientras que V_{CDA2} será negativo.

i. Cruce por Cero.

El ajuste de cero se realiza con dos convertidores D/A, los cuales proporcionan un voltaje analógico proporcional a una palabra digital. El ajuste se lleva a cabo mediante el incremento o decremento de bits en la palabra binaria, con el fin de que los convertidores agreguen niveles de CD a la señal de interés. Hay un momento en el cual cada uno de los convertidores termina su parte del trabajo dando paso a la siguiente etapa.

El momento que determina cuando se debe parar la conversión, es cuando la señal que se pretende ajustar crusa por cero (hay un cambio de signo). Cuando esto ocurre, significa que la señal ya está muy cerca de 0V y es hora de parar la etapa de ajuste que se está llevando a cabo en ese momento.

Para ver cuando ocurre el cambio de signo, se utiliza un circuito que monitorea todo el tiempo a la señal, es un circuito detector de cruce por cero. Las señales que manda cuando ocurre un cruce por cero son: un uno lógico cuando la señal está arriba de cero y un cero cuando la señal está debajo de cero volts.

En la figura 7 se presenta el diagrama del circuito que detecta el cruce por cero. En la entrada cuenta con un circuito RC que es un filtro pasa-bajas, con frecuencia de corte en 338 Hz, cuya función es la de amortiguar las oscilaciones o frecuencias altas, haciendo a la señal más bien plana.

Después del filtro hay un amplificador inversor, que amplifica 213 veces la señal que tiene a la entrada. Como está polarizado con $\pm 15V$, siempre que llegue un voltaje mayor a 70 mV, hará que el amplificador operacional se sature, ocasionando que el voltaje de salida parezca una señal cuadrada.

Después hay un transistor NPN, el cual está polarizado en el colector con +5V. La base está conectada al amplificador y el emisor está a tierra. Cuando en la base hay -15V, el transistor entra en corte y es como si fuera un interruptor abierto, la corriente no pasa y en el punto donde está PC₁, el voltaje es igual a 5V.

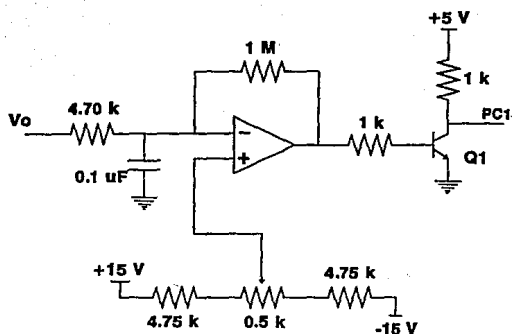


Figura 7.
Circuito que detecta cuando hay un cambio de signo en la señal que se está ajustando.

Por otro lado, cuando en la base hay +15V, el transistor se satura y funciona como un interruptor cerrado, permitiendo que la corriente circule hasta llegar al emisor y de ahí a tierra; en éste caso, el voltaje en PC_1 es de cero volts.

De esta forma opera el circuito detector de cruce por cero. En esta etapa hay presentes dos detectores de cruce por cero. PC_1 está a la salida del sumador, mientras que PC_2 está a la salida del amplificador. Todo el proceso de ajuste depende en gran medida del buen funcionamiento del sistema de control. Este está monitoreando constantemente cuando ocurren los cambios de signos y manda las palabras digitales que deben convertir los CDA.

6. ETAPA DE AMPLIFICACION.

Cuando se desean estudiar las características de las señales, se requieren diversos elementos que son útiles en el proceso de análisis. Uno de estos elementos comprende a los amplificadores de señales.

En ocasiones, las amplitudes de las señales eléctricas son muy pequeñas. Si se toman lecturas en éste reducido rango, se corre el riesgo de obtener poca información. Además, en muchos casos las señales son débiles y deben amplificarse antes de usarse en la siguiente etapa del proceso.

El amplificador que se diseñó para éste aparato acondicionador tiene varias características que son importantes. Una de ellas es que se encuentra después de la etapa de ajuste cero.

La razón de esto es muy sencilla. Como ya se ha mencionado en los capítulos anteriores, si la señal de interés es pequeña y se encuentra con un offset grande, se corre el riesgo de perder una parte de la señal al ser amplificada, e implícitamente se estaría perdiendo información.

Otra característica es que el amplificador funciona como un atenuador. La señal, a lo largo del circuito, es amplificada por un factor de mil o bien 60 dB. Esta ganancia se va atenuando (con divisores de voltaje y switches), hasta encontrar el valor adecuado.

En éste capítulo estudiaremos las características eléctricas del amplificador que se construyó.

i. Proceso de Amplificación.

El amplificador funciona también como atenuador, el conjunto está compuesto por varias etapas. La primera cuenta con dos arreglos de resistencias cuya función es la de

formar dos divisores de voltaje y además hay un amplificador operacional con ganancia de 10, figura 1.

Como se observa en la figura 1, del primer arreglo de resistencias (R_1 y R_2), se tiene que el voltaje entre las ellas es aproximadamente un décimo de la señal V_{in} , (6. i. 2). En el segundo arreglo, el voltaje que hay entre las dos resistencias (R_3 y R_4), es aproximadamente un centésimo de la señal V_{in} , (6. i. 3) y finalmente el amplificador operacional amplifica diez veces a la señal.

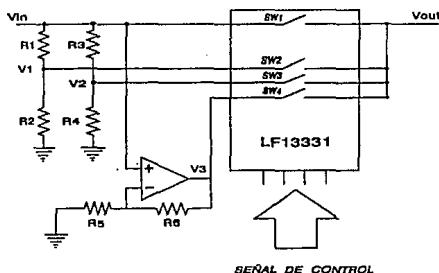


Figura 1.
Primer bloque del amplificador. En esta parte, la señal puede pasar sin atenuación o bien a través de tres divisores de voltaje.

Para calcular un divisor de voltaje, figura 2, se utiliza la siguiente ecuación:

$$V_{out} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} \quad (6. i. 1)$$

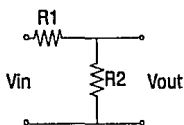


Figura 2.
Divisor de voltaje.

Sustituyendo valores en la ecuación (6. i. 1), obtenemos los resultados de los siguientes divisores de voltaje:

$$V_1 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} V_{in} = \frac{1.02}{9.09 + 1.02} V_{in} = 0.10089 V_{in} \approx \frac{V_{in}}{10} \quad (6. i. 2)$$

$$V_2 = \frac{R_4}{R_3 + R_4} V_{in} = \frac{0.332}{0.332 + 33.2} V_{in} = 0.0099 V_{in} \approx \frac{V_{in}}{100} \quad (6. i. 3)$$

Todos los valores de las resistencias se encuentran en [k Ω].

El voltaje V_1 se obtiene de un amplificador operacional (AO1 en el diagrama, ver Apéndice c.) en configuración no inversor, figura 3. La ganancia que proporciona éste dispositivo está calculada para que sea de diez. (6. i. 7).

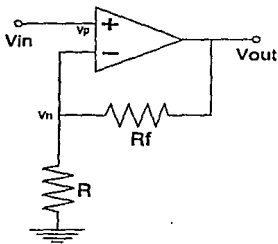


Figura 3
Amplificador no inversor.

La ganancia de un amplificador no inversor se calcula de la siguiente manera: En primer lugar, los voltajes V_p , V_n , y V_{in} son iguales.

$$V_{in} = V_p = V_n \quad (6. i. 4)$$

Aplicando la ecuación (6. i. 1) al diagrama de la figura 3, obtenemos el siguiente resultado:

$$V_n = \frac{R}{R+R_f} V_{out} \quad (6. i. 5)$$

Aplicando la ecuación (6. i. 4) en ésta, y si se desarrolla el resultado y luego se factoriza, se obtiene finalmente la siguiente ecuación que permite calcular la ganancia.

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_f}{R}\right) V_{in} \quad (6. i. 6)$$

Si se sustituyen los valores de las resistencias, en la ecuación anterior, se obtiene el siguiente resultado:

$$V_{out} = \left(1 + \frac{9.09}{1.0}\right) V_{in} = 10.09 V_{in} \quad (6. i. 7)$$

La segunda parte del amplificador es un circuito integrado (LF13331). Este circuito es un conjunto de switches analógicos que permiten, o impiden, el paso de las señales. Funcionan igual que un interruptor mecánico, aunque tienen la cualidad de que están hechos a base de semiconductores y tienen varias ventajas sobre los otros; una de ellas es el tamaño y otra es que generan un ruido despreciable en el momento de la conmutación, figura 1. Este factor es muy importante de considerar debido al tipo de aparato que se desea construir.

La forma de hacer conmutar a los interruptores es mediante una palabra digital, o bien una señal de control. Este voltaje se puede ver como una señal digital donde un nivel bajo implica que el switch está en circuito abierto (la señal no pasa) mientras que un nivel alto implica que el interruptor está en circuito cerrado (la señal pasa).

Todos los switches cuentan con una línea de control independiente que determina el estado de éste, además, cada uno tiene una línea para la señal de entrada y otra para la de salida. Todos los voltajes de las líneas de control funcionan con niveles TTL,

mientras que la señal analógica que pasa a través del interruptor puede estar en un rango de -15V a +15V.

Cada circuito integrado LF13331 recibe cuatro señales, donde cada una de ellas está conectada a la entrada de cada uno de los cuatro interruptores. Para la primera etapa, estas señales provienen de los dos divisores de voltaje y del amplificador operacional que se explicaron antes y hay una cuarta entrada que corresponde a la señal V_{in} que pasa sin ninguna atenuación, figura 1.

Las salidas de todos los switches se encuentran en circuito corto, de esta forma es posible que todas las señales lleguen a un solo punto, que es la siguiente etapa del circuito amplificador. Es importante hacer notar que por cada conjunto de switches, solo uno a la vez estará haciendo contacto, de esta forma las señales no se mezclan.

En la siguiente etapa, hay otro amplificador operacional AO2, no inversor con ganancia de diez, como el anterior. Después de éste amplificador hay tres divisores de voltaje, formados por (R_{12} y R_{11}) por (R_{10} y R_{11}) y por (R_{14} y R_{15}), donde la señal se atenúa un quinto, la mitad o bien mil veces el nivel de voltaje que reciben; (6. i. 8), (6. i. 9) y (6. i. 10) respectivamente. Ver diagrama completo en el Apéndice c..

$$V_4 = \frac{5.62}{5.62+22.1} V_{in} = 0.2027 V_{in} = \frac{V_{in}}{5} \quad (6. i. 8)$$

$$V_5 = \frac{4.75}{4.75+4.75} V_{in} = 0.5 V_{in} = \frac{V_{in}}{2} \quad (6. i. 9)$$

$$V_6 = \frac{0.036}{0.036+33.2} V_{in} = 0.001 V_{in} = \frac{V_{in}}{1000} \quad (6. i. 10)$$

En la siguiente parte del circuito hay otro LF13331 con cuatro interruptores analógicos. A cada uno de ellos le llega una señal. La primera proviene del amplificador operacional AO2 y luego una por cada uno de los tres divisores de voltaje (V_4 , V_5 y V_6).

Aquí también las salidas de los interruptores se encuentran unidas en un solo punto, de éste se llega a un tercer amplificador no inversor AO3, que al igual que los otros, tiene una ganancia de diez. Esta es la última etapa del amplificador atenuador.

Debido a diseño de éste circuito, es posible obtener hasta 16 niveles distintos de voltaje. La forma en que trabaja todo el circuito es mediante combinaciones de amplificaciones y atenuaciones.

El control se lleva a cabo con los interruptores, estos, dependiendo de cuales están en conducción, proporcionan una salida proporcional a V_{in} , que está ponderada por un factor K.

El valor de K está determinado por la ruta por donde pasa la señal desde el punto de entrada hasta la salida. A continuación se presenta una tabla con los posibles valores de K ponderando a V_{in} .

TABLA 1

$V_{in} * 100$ (40)	$V_{in} * 10$ (20)	$V_{in} * 1$ (0)	$V_{in} / 10$ (-20)
$V_{in} * 50$ (34)	$V_{in} * 5$ (14)	$V_{in} / 2$ (-6)	$V_{in} * 200$ (46)
$V_{in} * 20$ (26)	$V_{in} * 2$ (6)	$V_{in} / 5$ (-14)	$V_{in} * 500$ (54)
$V_{in} * 1000$ (60)	$V_{in} / 1000$ (-60)	$V_{in} / 100$ (-40)	$V_{in} * 1$ (0)

Valores de K que afectan a V_{in} . En paréntesis, magnitud en dB.

Para que éste sistema funcione adecuadamente, solo habrá un interruptor haciendo contacto por cada uno de los dos LF13331 que hay. Si no se hiciera así, las señales se mezclarían y no habría un control sobre el valor de la señal que se presenta a la salida del amplificador.

Las señales de control que determinan el estado de los interruptores provienen de un *latch* (74LS373), que a su vez las recibe de un puerto paralelo 8255 de Intel, el cual espera una palabra binaria del microcontrolador. La palabra es de ocho bits y se separa en dos grupos de cuatro bits, cada uno de estos, por separado, son los que accionan los interruptores de los dos LF13331. De esta forma es posible variar la ganancia del amplificador y como se ve, se hace a través de un sistema digital.

7. FILTRO.

La aplicación de los filtros es muy variada y es común encontrarlos cuando se desea estudiar las características de las señales. Por lo general se utilizan para aislar una parte del espectro de frecuencias de una señal. Son circuitos que permiten el paso de una cierta banda de frecuencias específica, atenuando al resto de las frecuencias que no se encuentran dentro de la banda de paso.

Los filtros pueden dividirse en dos grupos, están los filtros pasivos por un lado y por otro se encuentran los filtros activos. La diferencia entre estos dos grupos está en que los filtros pasivos están constituidos por elementos pasivos, tales como resistencias, inductancias y capacitancias. Los filtros activos, a su vez, se caracterizan por tener elementos activos, como son los amplificadores operacionales o los transistores, además de resistencias, inductores o capacitores.

Cuando hablamos de elementos pasivos nos referimos a los dispositivos que no requieren de una fuente de energía externa para reaccionar ante un estímulo. Los elementos activos si la requieren para funcionar, además de que pueden proporcionar una ganancia a la señal mientras que los otros no.

Los filtros pasivos LRC son muy voluminosos y difíciles de reproducir, por lo que fueron gradualmente sustituidos por los filtros activos que en la actualidad están compuestos por transistores, amplificadores operacionales monolíticos y por elementos RC. Los inductores no son muy comunes en éste tipo de circuitos y la razón es por que son voluminosos, pueden llegar a ser caros y tienen una componente resistiva apreciable con respecto al valor de la inductancia. Algunas ventajas de los filtros activos sobre los otros es que son más económicos, más fáciles de fabricar y las dimensiones son mucho más reducidas.

Debido al progreso que se ha tenido en el área de la integración de circuitos electrónicos y a la competencia que existe entre las empresas por lograr dispositivos mejores y más rápidos; la tendencia de la tecnología ha sido la de integrar en un solo chip la mayor cantidad de elementos posibles. Pero la integración de filtros activos no es fácil¹, se han

¹Rolf Schaumann et al "Modern Active Filter Design", Part VI, paper 6-1. IEEE Press, New York. 1981.

tenido problemas en lograr un producto RC estable en un proceso monolítico. Los filtros que se han hecho funcionan bien sólo para altas frecuencias.

Como se explicó en la descripción de los objetivos, éste proyecto se diseña con el fin de que el aparato resultante trabaje con señales cuya frecuencia es baja (menor a 1000 Hz). Además, los filtros deben tener una característica fundamental, todos deben ser lo más parecido entre sí, en otras palabras, que la respuesta de todos los filtros, ante una señal igual para cada uno de ellos, sea la misma. Debido a esto se llega a la conclusión de que no es adecuado usar filtros activos monolíticos ya que estos no presentan las características adecuadas para lo que se requiere diseñar.

Una opción adecuada, que si ha sido posible integrar, es usar filtros con capacitor conmutado. Estos pueden trabajar con frecuencias pequeñas, los elementos externos que se requieren por lo general son resistencias, cuyos valores son fáciles de encontrar. Además, desde el punto de vista de un filtro activo RC, éste otro tipo de filtro tiene la propiedad de que la constante RC está determinada por la frecuencia del reloj que controla a los switches de los capacitores.

En éste capítulo se da una descripción de los tipos de filtros que existen, resaltando sus características. También se explica el método de diseño para los filtros Butterworth y se explica porque se usó éste método. En la parte final del capítulo se estudian las características de los circuitos con capacitor conmutado, se da una explicación sobre el muestreo y el efecto alias que se presentan en éste tipo de circuitos. Finalmente se dan las características del filtro que se construyó.

a. Tipos de Filtros.

Para entender bien cuales son las características de los filtros, es necesario empezar explicando algunos conceptos básicos. Los filtros son circuitos selectivos que permiten el paso de señales con una cierta gama de frecuencias, estas se ubican en un rango que se conocen como banda de paso. Por otro lado, atenúan señales que se encuentran dentro de otro rango, al cual se le conoce como banda de rechazo.

La descripción formal de un filtro debe hacerse a partir de los filtros ideales. Un filtro ideal es aquel que en la banda de paso no tiene atenuación, manteniéndose constante la magnitud y siendo el cambio de fase lineal. Por otro lado, en la banda de rechazo hay una atenuación infinita.

Los filtros pueden clasificarse dentro de cuatro grupos: los pasa-bajas, los pasa-altas, los pasa-banda y el supresor de banda. Hay un quinto tipo que se conoce como pasa-todas; éste permite el paso de todas las frecuencias del espectro y por lo general se usa para provocar un retardo en la señal o un cambio de fase.

Un *filtro pasa-bajas ideal* permite el paso de todas las frecuencias menores a la frecuencia de corte, f_c , manteniendo un voltaje constante a la salida. Si la frecuencia de la señal es mayor a la de paso, entonces el voltaje de salida se atenúa en su totalidad. Figura 1a.

El *filtro pasa-altas ideal* desaparece todas las frecuencias que se encuentran debajo de la frecuencia de corte; arriba de esta, la magnitud del voltaje no se atenúa. La figuras 1b es la gráfica del filtro ideal pasa-altas.

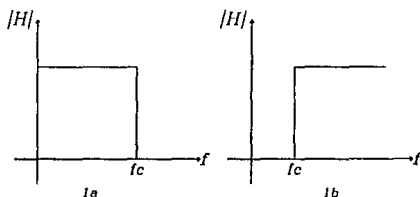


Figura 1

Respuesta en magnitud. 1a) Pasa-bajas, 2b) Pasa-altas.

El *filtro pasa-banda ideal* permite el paso de una cierta banda de frecuencias, como se observa en la figura 2a. La banda de paso se establece a partir de dos frecuencias de corte (f_1 y f_2). Todas las frecuencias que se encuentran fuera de éste rango son totalmente atenuadas.

El *filtro supresor de banda ideal* tiene una respuesta en magnitud como la que se muestra en la figura 2b. Se caracteriza por atenuar completamente a todas las frecuencias que se encuentran dentro del rango comprendido por f_1 y f_2 . Todas las demás frecuencias que están fuera de esta banda no son atenuadas.

En la práctica, la realización física de los filtros ideales no es posible ya que son sistemas no causales. Los filtros reales que se diseñan son sólo una aproximación a los ideales. Hay muchas formas y métodos para llevar a cabo la aproximación y cada una de ellas presenta características distintas, la técnica de diseño que se usó en éste filtro es la de los filtros Butterworth.

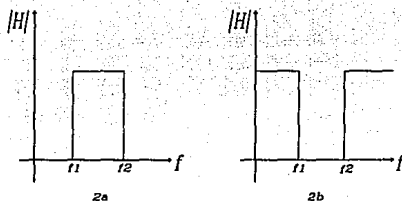


Figura 2
 Respuesta en magnitud, 2a) Pasa-banda, 2b) Supresor de banda.

Los filtros Butterworth, se caracterizan principalmente por que su curva de función de transferencia en magnitud es plana y tiene un valor máximo en el origen. Se escogió esta técnica debido a que el usuario así lo requería.

Si bien existen otras aproximaciones, la Butterworth tiene la gran ventaja de que en la banda de paso no atenúa ni da ganancia a la señal, es como ya decíamos, una respuesta plana. Una posible desventaja de éste tipo de filtros es que la pendiente después de la frecuencia de corte no es muy pronunciada, por lo que para obtener buenos resultados es necesario incrementar el orden del filtro. Para el filtro que se diseñó, la respuesta del filtro se mejoró usando un filtro de octavo orden.

b. Realización del Filtro.

En la práctica, cuando se usan señales eléctricas en el estudio de los fenómenos, es común encontrar que están contaminadas con ruido y con señales parásitas que no son adecuadas y que en dado caso pueden alterar de forma considerable los resultados. Es siempre deseable que las señales de interés aparezcan solas, sin ningún tipo de interferencia; para que esto sea posible se debe utilizar un filtro que se encargue de eliminar lo que no sirve y dejar pasar lo que es de utilidad.

Uno de los bloques que constituyen al acondicionador que se diseña, es el que contiene al filtro. Este es de octavo orden y está basado en la técnica del capacitor conmutado.

A continuación se da una descripción de las características que tienen y deben considerarse en éste tipo de circuitos.

i. Los Capacitores como Resistencias.

La técnica del capacitor conmutado se utiliza como una alternativa en el uso de resistencias. Una forma sencilla de explicar esto es simulando las funciones de una resistencia con un capacitor y un switch, tal como se muestra en la figura 3.

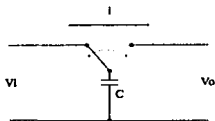


Figura 3
Ejemplo de un capacitor conmutado.

De esta figura se observa que la carga del capacitor es igual a:

$$Q = C(V_i - V_0) \quad (7. i. 1)$$

Por lo tanto, siendo la corriente igual a la carga por unidad de tiempo, obtenemos:

$$I = C(V_i - V_0)F_{CK} \quad (7. i. 2)$$

y finalmente,

$$R = \frac{1}{C * F_{CK}} \quad (7. i. 3)$$

De la última ecuación², se observa que la resistencia equivalente R es inversamente proporcional a la frecuencia de switcheo F_{CK} , ponderada por una constante C que es el valor de la capacitancia.

Si la frecuencia de switcheo es mucho mayor a la frecuencia de la señal de interés, entonces el período de muestreo de la señal puede ser ignorado en un análisis de primer orden. Así, el capacitor conmutado puede considerarse como el reemplazo de una resistencia.

De esta forma es posible sustituir resistencias, esto es importante para los procesos monolíticos, donde integrar resistencias no es fácil. Cuando se diseñan filtros monolíticos, lo que se hace es sustituir los elementos resistivos por capacitores con switches. Un ejemplo de esto se observa en la figura 4.

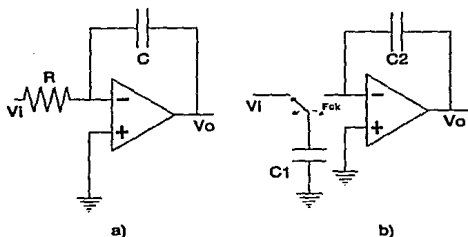


Figura 4. Diagrama de dos circuitos integradores. a) Con resistencia, b) con capacitor conmutado.

En éste diagrama se muestran dos circuitos que realizan la misma función, los dos son integradores. La diferencia entre ellos es que el circuito del diagrama a) utiliza una resistencia, mientras que el del diagrama b) la sustituye por un capacitor y un switch. Si hacemos un análisis matemático de ambos circuitos, obtenemos, para empezar, los siguientes resultados:

²Electronics World, MAY 93. Switched Capacitor Resistor.

$$i_R = \frac{V_i}{R} = i_C = -C \frac{dV_o}{dt}$$

Para el circuito a):

$$V_o = -\frac{1}{RC} \int V_i dt \quad (7. i. 4)$$

Para el circuito b) aplicando la ecuación (7. ii. 3), obtenemos:

$$V_o = -\frac{C_1 F_{CK}}{C_2} \int V_i dt \quad (7. i. 5)$$

Las expresiones (7. ii. 4) y (7. ii. 5) son iguales tanto dimensionalmente como operativamente, la diferencia está en que el voltaje de salida, V_o , de la segunda depende de la frecuencia del reloj que controla al interruptor, junto con la relación que hay entre los capacitores C_1 y C_2 .

Aplicando éste procedimiento es posible transformar a los filtros activos tradicionales en filtros con capacitor conmutado. En éste proceso es importante considerar el valor de la frecuencia del reloj en relación con la frecuencia máxima de la señal que pasará por el filtro. A continuación se explican las razones de esto.

ii. Muestreo y el Efecto ALIAS.

Como se puede observar en la ecuación (7. ii. 3), el valor de la resistencia resultante en un circuito con capacitor conmutado depende únicamente del valor de la frecuencia del reloj que hace conmutar a los interruptores. Esta frecuencia puede llegar a causar problemas si no se considera la relación que tiene con la frecuencia de la señal que pasa a través del filtro.

El efecto de una señal a través de un circuito como el de la figura 3, es equivalente al muestreo, ya que la señal pasa a través de un switch y sufre el efecto que se observa en la figura 5. En éste caso, la función y el propósito de los interruptores es la de dejar pasar una parte de la señal. Cuando el interruptor está del lado de V_i , el capacitor C se carga. Cuando el interruptor conmuta a lado de V_o , el capacitor se descarga. Este proceso ocasiona que la señal aparezca mordida a intervalos regulares, de la misma forma que una señal muestreada.

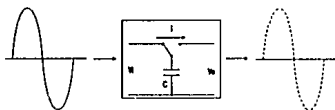


Figura 5.
Ejemplo de muestreo de una señal.

Cuando una señal es muestreada se deben considerar sus efectos, los cuales, de alguna manera están relacionados con el teorema de muestreo de Nyquist, el cual dice³ que la frecuencia de muestreo, f_s , debe ser al menos el doble de la frecuencia máxima, f_m , de la señal muestreada. En éste caso, la señal de reloj y la de muestreo es la misma.

Un efecto que puede presentarse cuando una señal es muestreada se conoce como *alias*. Este fenómeno ocurre cuando dos senoides continuas, de distinta frecuencia, aparecen con la misma frecuencia después de ser muestreadas. Esto significa que no es posible distinguirlas basándose en las señales muestreadas y es posible que se pierda información. El fenómeno de alias se presenta cuando no se cumple el teorema de Nyquist. Así que su efecto se puede reducir o eliminar, si hacemos que se cumpla la relación entre frecuencias que se establece en el teorema de muestreo, $f_s \geq 2f_m$.

Si aplicamos los conceptos explicados hasta ahora en el proyecto que se desarrolla, en particular a lo que está relacionado con la etapa del filtro, debemos hacer notar los siguientes aspectos que permiten obtener mejores resultados.

En algunos casos, cuando se usan filtros que trabajan como un sistema que muestrea datos, se recomienda que se utilice un filtro que limite el ancho de banda de la señal, antes del filtro. El propósito es reducir la frecuencia máxima de la señal antes de que entre al sistema y sea muestreada. Sin embargo, en éste caso, la frecuencia de muestreo del filtro es mucho mayor a la de la señal, por lo que no es necesario utilizarlo.

³Gene F. Franklin, et al. "Digital Control of Dynamic Systems", Addison-Wesley, Second edition.

En la figura 5 aparece una señal muestreada o mordida. Esto ocurre gracias al interruptor que se encuentra en el circuito. Cuando se realizan pruebas o experimentos, por lo general, resulta incómodo trabajar con señales como ésta o incluso, no es adecuado usarlas así. De ser necesario, la señal puede corregirse usando un filtro RC, pasa-bajas, a la salida del filtro; de esta forma se aplana la señal y aparece como continua, ya que el filtro RC impide el paso de las señales de alta frecuencia que hacen que la señal aparezca escalonada.

Esto son los efectos importantes que están relacionados con las señales muestreadas. En el caso que nos ocupa, no son aspectos críticos. Las características de las señales que pasan a través del filtro no se ven afectadas por estos. Para terminar, a continuación se da una descripción del filtro utilizado en el acondicionador, así como del circuito que proporciona la señal de reloj que hace conmutar a los interruptores.

iii. Filtro de Octavo Orden.

Como uno de los objetivos de éste proyecto, el dispositivo resultante debía contar con un filtro cuya frecuencia de corte pudiera ser baja, hasta 2 Hz, y variable. Que fuera preciso y exacto, además, que se pudiera fabricar de manera sencilla y rápida y que se pudieran hacer tantos como se quisieran con las mismas características.

En los subcapítulos que preceden a éste, se dio una descripción de los tipos de filtros que existen, así como una técnica para la aproximación al filtro ideal; los filtros Butterworth. Con estos datos, se estudiaron algunas opciones para lograr alcanzar, de manera eficiente, los objetivos que se plantearon.

Se llegó a la conclusión de que lo adecuado sería usar un filtro monolítico basado en la técnica del capacitor conmutado. Este tipo de filtros tiene la cualidad de que la frecuencia de corte está en función de una señal de reloj, además de ser sistemas bastante lineales y estables.

El dispositivo que se eligió fue un MF10CN. Este es un chip que contiene integrado dos filtros de segundo orden, basados en la técnica del capacitor conmutados. Hay varios modos de alambrado y cada uno de ellos representa un tipo de funcionamiento distinto

a los otros. Se escogió el modo 1⁴. Este presentó más ventajas tanto de diseño como operativas.

Se plantearon varias consideraciones operativas, las cuales se referían al tipo de filtro que se iba a construir. Se requería que éste trabajara como pasa-bajas y la relación entre la frecuencia de corte y la frecuencia de reloj debía ser lo más lineal posible, ya que de esta forma se reduciría la complejidad del circuito, aspecto muy importante si se consideran los objetivos.

En cuanto al aspecto relacionado con la fabricación, se vio que entre menos resistencias externas estuvieran involucradas, el nivel de complejidad también disminuiría. Se escogió un modo de alambrado que tiene tres resistencias externas por cada filtro de segundo orden.

El filtro que se pensó hacer debía ser de octavo orden. Para tomar ésta decisión se tomaron como referencia los filtros comerciales que se estaban usando en las pruebas. Además, entre mayor es el orden de un filtro, es más fácil que se vuelva inestable y como un filtro de octavo orden ya es bastante parecido a uno ideal y no presenta problemas serios de inestabilidad, se determinó que éste sería el orden adecuado para el filtro que se usaría en el acondicionador.

Para implementar un filtro con las características antes descritas, se conectaron en cascada cuatro filtros pasa-bajas, de segundo orden, dos por cada MF10CN. Para que un filtro funcione como se desea, debe considerarse el valor de la ganancia y el factor de calidad que va a tener.

Los filtros MF10CN, a pesar de estar diseñados con la técnica del capacitor conmutado y de lo que esto implica, siguen siendo filtros activos, con amplificadores operacionales; como se sabe, estos son elementos que permiten proporcionar una ganancia al sistema. Debido a esto, para poder hacer el diseño, es necesario determinar que ganancia va a proporcionar el filtro. Partiendo de aquí y considerando que en el acondicionador se ha planeado tener un amplificador, se vio que no era necesario darle ganancia a la señal en ésta etapa, por lo que se determinó que el factor de amplificación debía ser unitario o bien $H_0=1$.

⁴National Semiconductor, General Purpose. "MF10 Universal Monolithic Dual Switched Capacitor Filter". 1989.

Por otro lado se tiene al factor de calidad Q . La forma o características de las curvas, obtenidas a partir de la función de transferencia del filtro (magnitud y fase), están determinadas tanto por el orden del filtro como por el factor de calidad que tiene éste. El factor de calidad es un parámetro que determina que tan selectivo es un filtro y varía dependiendo del tipo de aproximación que se utiliza.

Partiendo del orden del filtro, de la frecuencia de corte y del tipo de aproximación, se pueden encontrar distintos valores para el factor de calidad. Existen tablas que tabulan al factor de calidad para un número distinto de polos, con la frecuencia de corte normalizada en 1 Rad/seg. A continuación se presenta una tabla con los valores de Q para un filtro Butterworth, de octavo orden.

Número de polos	Estado	α	Q
8	1	1.961571	0.50979
	2	1.662939	0.601344
	3	1.11114	0.8999
	4	0.390181	2.562913

El número de polos indica el orden del filtro. En éste caso el filtro tiene 8 polos o bien hay cuatro estados de segundo orden. El parámetro α es el que determina al factor de calidad ya que $Q=1/\alpha$.

El filtro que se usa trabaja como un sistema de muestreo. Para determinar su función de transferencia se puede considerar como apropiada una aproximación en el dominio del tiempo continuo. Dado que el filtro está compuesto por cuatro etapas de segundo orden conectadas en cascada, es posible describir las ecuaciones características de todo el bloque si describimos las de una sola de estas etapas.

En la figura 6 se puede apreciar un diagrama esquemático de un bloque de segundo orden. Cada una de las etapas tiene ésta configuración y puede proporcionar tres tipos de salidas. La salida pasa-bajas fue la que indicaban los requerimientos de diseño establecidos por el usuario, así que esta fue la que se conectó en cascada.

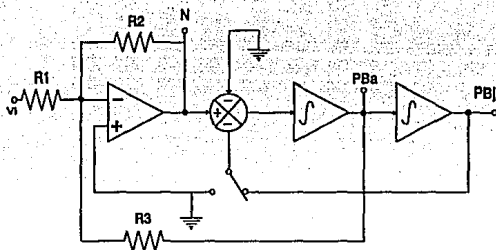


Figura 6

Diagrama esquemático de una etapa de segundo orden. El punto N significa supresor de banda, el PBa es pasa-banda y el PBj es pasa-bajas.

Los valores de las resistencias se pueden determinar aplicando las siguientes ecuaciones:

$$H_o = -\frac{R_2}{R_1} \quad \text{y} \quad Q = \frac{R_3}{R_2}$$

Para encontrar cuanto valen las resistencias, sólo se sustituye el valor de la ganancia y los valores del factor de calidad. Como la ganancia es igual a la unidad, entonces R_2 es igual a R_1 . Para determinar R_3 , deben sustituirse los cuatro valores de Q que se muestran en la tabla 1, un por cada etapa del filtro. Por facilidad de diseño, las resistencias R_1 y R_2 son del mismo valor en todos los filtros de segundo orden. Se determinó que fueran de $10\text{k}\Omega$ por la razón de que éste valor es comercial y fácil de encontrar. Para R_3 , los valores, comenzando por la primera etapa y terminando por la última, son: $5.09\text{ k}\Omega$, $6.01\text{ k}\Omega$, $8.99\text{ k}\Omega$ y $25.62\text{ k}\Omega$.

De esta forma, conociendo los valores de las resistencias, se puede armar el filtro. Para polarizarlo, se requiere de una fuente que proporcione $\pm 5\text{V}$. También falta hablar sobre como se genera la señal de reloj que hace funcionar al filtro. A continuación se da una explicación sobre el dispositivo que genera la señal cuadrada que hace funcionar al filtro.

c. Generador de la Señal de Reloj. Contador Programable.

Cuando se diseñan y fabrican aparatos de instrumentación, siempre se considera su estabilidad. En éste caso, hablando de los filtros, se requiere usar una señal cuyas características no deben cambiar. Los filtros son de capacitor conmutado y necesitan que la señal de reloj que reciben sea cuadrada, con un ciclo de trabajo del 50%. Además, como ésta es la que determina la frecuencia de corte, debe moverse sólo cuando uno se lo indique.

Una característica importante de estos filtros es la capacidad que tienen para modificar su frecuencia de corte sin necesidad de alterar el valor de los elementos que lo conforman. Entonces la frecuencia central es variable y puede operar en un rango que va desde los 2 Hz hasta 1000 Hz.

La relación que existe entre la frecuencia de corte y la frecuencia de la señal de reloj es:

$$f_c = \frac{f_{CLK}}{100} \quad (7. iii. 1)$$

Como se observa, la señal de reloj debe ser por lo menos de 100kHz. Para generarla se utiliza un dispositivo especial, cuya única función es la de proporcionar señales con frecuencias controladas. Es un contador programable, el 8254 de intel. Este circuito tiene la cualidad de poder escalar una frecuencia fija, proporcionada por un cristal u oscilador externo, a otra menor dependiendo de una palabra binaria de 16 bits.

Se decidió usar éste dispositivo debido a que tiene varias características útiles para el manejo del filtro; es de aplicación sencilla y se puede controlar digitalmente; la frecuencia puede ser variable y como oscilador externo puede usarse un cristal.

El 8254 es un circuito integrado que cuenta con tres contadores independientes de 16-bits cada uno. Maneja frecuencias de entrada a partir de niveles de CD a 10 MHz. Tiene 5 líneas de control que permiten manejarlo como a uno mejor le convenga y tiene un bus que puede servir para datos o palabras de control.

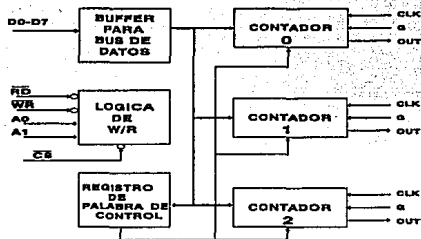


Figura 7.
Diagrama de bloques del contador 8254.

En la figura 7 se presenta un diagrama del 8254; incluye los bloques internos más importantes. A través de las líneas D_0 - D_7 se transmiten los datos para establecer la cuenta inicial de cada contador y la palabra de control que determina el modo de operación. Están conectadas al bus de datos del sistema. La línea RD se usa para indicarle al contador que el CPU está leyendo el registro interno de alguno de los contadores. La línea WR le dice al 8254 que el sistema de control está escribiendo una palabra, ya sea la de control o la cuenta inicial. Las líneas A_0 y A_1 pertenecen al bus de direcciones del sistema y se usan para seleccionar a cualquiera de los tres contadores o bien al *registro de palabra de control*. Las operaciones de las líneas de control se encuentran condicionadas por la línea CS , ésta es la que habilita al 8254; si está en cero, el dispositivo puede ser controlado. La señal CLK es la frecuencia del oscilador externo, mientras que OUT es la señal de salida proporcionada por el contador. Cuando G está en cero, habilita al contador.

La frecuencia que recibe la terminal CLK proviene de la terminal $4XOUT$ del microcontrolador. Ver capítulo 9.. Como el 8254 está polarizado con +5 V y tierra, la frecuencia de salida está también en éste rango, pero el filtro requiere que esté entre ± 5 V, por lo cual se hace pasar a la señal por un circuito adicional que la ubica en el rango establecido. Ver figura 8.

En la figura 8 se puede apreciar que la señal de salida pasa a través de dos resistencias y de una compuerta NAND Schmitt Trigger. La función de las resistencias es hacer que la señal se desplace -2.5 V, de tal forma que al llegar a la NAND, los niveles de la señal están entre ± 2.5 V.

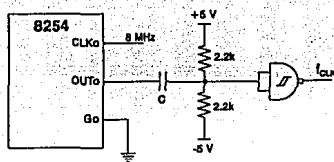


Figura 8.
Circuito que cambia el nivel de la señal de reloj.

Las compuertas tipo Schmitt Trigger son aquellas con histéresis. Las señales que no tienen muy estables sus niveles, que presentan oscilaciones o no alcanzan los niveles estándar, salen de estas compuertas con los niveles reestablecidos. Después de la NAND, la señal es cuadrada y está entre ± 5 V. Esta señal es la que usan los filtros para sus capacitores conmutados.

El contador 8254 tiene 6 modos de operación. El modo que se utilizó fue el número 3. Este genera una señal cuya frecuencia es constante, el ciclo de trabajo es del 50% y está en función de una palabra de 16-bits o cuenta inicial que llega a través del bus de datos.

En el modo de operación 3, uno establece una la cuenta inicial en alguno de los tres contadores, después el contador elegido la empieza a decrementar de dos en dos; en éste momento *OUT* se encuentra en alto, al terminarse la cuenta, *OUT* cambia a un nivel bajo y la cuenta inicial se vuelve a restablecer, comenzando nuevamente el decremento de dos en dos. Al finalizar, *OUT* cabía a alto nuevamente. Este es un proceso continuo, por lo que la señal es periódica y tiene un ciclo de trabajo del 50%.

De esta forma, cuando uno desea que el filtro corte a cierta frecuencia en particular, basta con saber que la frecuencia de la señal en *OUT* es,

$$F_{OUT} = \frac{8 \text{ MHz}}{N}$$

entonces es fácil ver que para calcular *N* (cuenta inicial), se sustituye la ecuación anterior en la ecuación (7. ii. 1) y se obtiene,

$$f_c = \frac{80,000}{N} \quad (7. iii. 2)$$

Aplicando la ecuación (7. ii. 2) podemos saber cuanto debe valer la cuenta inicial para una cierta frecuencia, entonces es sencillo manipular al filtro, basta con tener un sistema que se encargue de mandar las señales de control y la palabra de 16-bits, para que el 8254 trabaje como uno necesita. De esta forma es posible hacer que el filtro opere con una frecuencia de corte variable. El sistema digital de control es el encargado de manejar al contador 8254 y se estudia en el capítulo 9..

8. ENLACE CON EL SISTEMA DE CONTROL.

Cuando se comenzó el diseño del acondicionador, se pensó en la posibilidad de que todos los ajustes y procesos que intervienen en el acondicionamiento de señales se realizaran automáticamente. Partiendo de esta idea, cada bloque funcional del acondicionador se diseñó para que fuera controlado con un sistema digital, el cual se encargaría de operar al equipo de manera rápida, eficiente y tal como el usuario lo desee. Por esto, se integraron dispositivos digitales (*latches*) y líneas de control, de tal forma que pudiese haber una comunicación con el sistema de control, que en este caso es un microcontrolador.

Para que la etapa de control pueda monitorear todas las actividades del acondicionador, además de las actividades relacionadas con la interfaz con el usuario, es necesario separar las líneas digitales que van del microcontrolador al acondicionador con un dispositivo que tenga la función de interfaz. La razón por la cual es necesaria la separación se debe a que el acondicionador, desde el punto de vista del microcontrolador, es un periférico más, así como una memoria ROM o una RAM, por lo que todo el acondicionador se vuelve un solo bloque que se controla como cualquier otro dispositivo digital, a través de un bus de datos, de direcciones y líneas de control

Considerando lo anterior, se pensó en la posibilidad de usar un dispositivo que funcionara como puerto paralelo, que tuviera la capacidad de manejar el número de bits que se estaban usando y que fuera capaz de leer y escribir datos. Un dispositivo viable de ser usado, que entre otras funciones, presenta las que ya se mencionaron, es el puerto programable 8255 de intel. A continuación se da una descripción de éste circuito y de su utilidad para ser usado como enlace entre el sistema digital de control y el acondicionador.

a. Puerto Paralelo.

El puerto 8255 puede describirse como un dispositivo periférico programable. Cuenta con tres puertos paralelos, los cuales presentan varias utilidades para el manejo del

acondicionador, entre ellas está la posibilidad que tienen para trabajar de manera independiente.

Este dispositivo está especialmente diseñado para trabajar con microprocesadores, por lo que su aplicación no representa ningún problema en la conexión con el sistema digital de control.

El 8255 está conectado al bus de datos del sistema digital y a través de este es como se transmiten todas las señales que requiere el acondicionador para operar. A continuación se muestra un diagrama de bloques de las partes que componen al 8255.

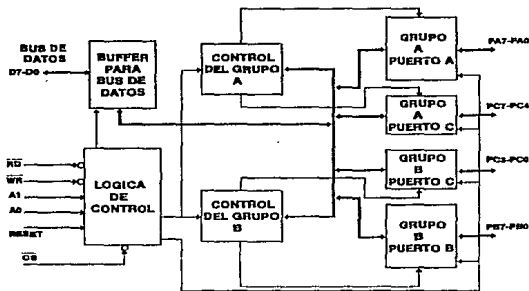


Figura 1.
Diagrama de bloques del 8255.

En la figura 1 se aprecian los bloques que conforman a un 8255. Las señales de control que llegan al bloque de *lógica de control* son las que manipulan el funcionamiento de este circuito, y pueden venir ya sea del bus de direcciones o del bus de control. La línea CS es la que habilita la comunicación entre el microcontrolador y el 8255; RD indica cuando puede leerse el bus de datos del 8255, mientras que WR permite que se escriba una palabra en el bus de datos del 8255.

Las líneas de direcciones A₀ y A₁ son las que permiten seleccionar alguno de los puertos del 8255 o bien, el registro de control (también conocido como *puerto D*). El RESET sirve para limpiar el registro de control e inicializar a los puertos A, B y C, en modo de entrada de datos.

El 8255 tiene tres puertos que pueden configurarse de manera independiente. Los tres son bidireccionales, esto es, que pueden mandar o recibir señales. Los puertos A y B son de 8-bits cada uno, mientras que el puerto C está constituido por dos bloques de 4-bits.

Hay tres modos básicos de operación, el modo 0 establece que el puerto sea de entrada-salida, el modo 1 es parecido al 0, sólo que en forma de habilitación (para funcionar deben ser habilitados). Finalmente, el modo 2 indica que el bus es bidireccional y se utiliza un protocolo de comunicación.

La conexión que existe entre el 8255 y el acondicionador se hace a través de los tres puertos. El puerto A se utiliza como bus de datos y es por donde pasan las palabras digitales que llegan a los Convertidores D/A y al amplificador para establecer la ganancia. Por otro lado, el puerto B se utiliza para habilitar todos los *latches* que hay en el acondicionador. La terminal PB_0 está conectada al habilitador del *latch* que se usa en el ajuste de cero del restaurar; PB_1 está conectada al relevador que abre la malla de realimentación del servoacelerómetro, también en el restaurador; PB_2 llega a la terminal que prende o apaga la fuente de voltaje programable, ver Apéndice a., que polariza al transductor; PB_3 habilita al *latch* que está en el amplificador; PB_4 y PB_5 habilitan a los *latches* que están conectados a los convertidores del bloque de ajuste fino de cero.

El puerto C se usa para mandar datos desde el acondicionador al sistema de control, en particular, el puerto recibe las señales de cruce por cero que ocurren en el acondicionador. PC_0 monitorea el cruce por cero que ocurre en el restaurador. PC_1 por otro lado, se encarga del cruce por cero que ocurre en el bloque de ajuste fino de cero. PC_2 está conectado a la última etapa del amplificador y así detecta cuando la señal cruza por cero en este punto.

En la figura 2 se muestra con más detalle como es la conexión entre el acondicionador y el 8255. Las líneas del puerto A son para el bus de datos y están marcadas con líneas gruesas. Las líneas de habilitación de *latches*, puerto B, están marcadas con líneas delgadas, mientras que para el puerto C, las líneas se encuentran punteadas. Como se puede ver, cada puerto tiene sus funciones específicas.

Todos los puertos están configurados en el modo de operación 0, el cual implica que los puertos son de entrada y salida de datos. A través del 8255 se mantiene la comunicación entre el sistema de control y el acondicionador.

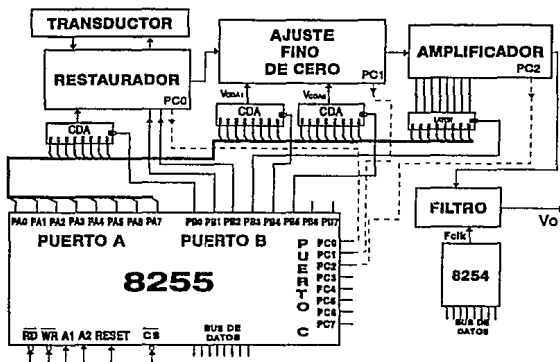


Figura 2.

Líneas que comunican al puerto 8255 con el acondicionador.

Toda la información que pasa por el 8255 se lleva por el bus de datos del sistema de control. Una vez que el sistema de control comienza a operar, lo primero que hace es inicializar la frecuencia de corte del filtro en 1000 Hz y establece la ganancia del amplificador en +20 dB. Estos procesos y todos los demás que requieren la presencia de sistema de control se explican en el siguiente capítulo.

9. SISTEMA DIGITAL DE CONTROL.

Uno de los objetivos que se tenían para realizar el acondicionador, era incluir una etapa de control que permitiera que todos los ajustes y opciones de operación, se realizasen de manera automática, rápida y eficiente; además de tener la capacidad de manejar por lo menos dos canales simultáneamente.

Se consideraron varias alternativas para lograr un sistema de control que fuera adecuado, práctico y viable. Se pensó que el circuito de control debía ser digital, ya que para esta aplicación son más versátiles. Algunas de las opciones que se consideraron fueron diseñar un control a través de un circuito combinacional, o bien, con un circuito secuencial. Se desecharon estas ideas por varias razones, la primera debido a la gran complejidad que exigía el diseño de circuitos de éste tipo; la segunda, por que éste tipo de circuitos requieren que se les dedique mucho tiempo para que funcionen como se desea. Además, en caso de querer modificar algún proceso o añadirlo, se tendría que diseñar otro circuito de control.

Una opción adecuada, que resolvía todas nuestras necesidades era usar un microprocesador, el cual se encargaría de monitorear todas las actividades del equipo. Este sistema no tiene los inconvenientes de los otros circuitos digitales, pero a diferencia de los otros, tiene la característica de ser un dispositivo programable.

Hasta ahora hemos estudiado las características del acondicionador de señales para servoacelerómetros. Se dieron las bases para saber cuales son los procesos que se llevan a cabo a lo largo de éste sistema para obtener en la salida, una señal ajustada, amplificada y filtrada.

Como hemos visto a lo largo del capítulo anterior, las etapas que componen al acondicionador se diseñaron para que, a través del sistema de control, trabajaran de acuerdo con las necesidades del usuario. Como cada etapa se hizo con circuitos analógicos, tienen acoplados dispositivos digitales que les permiten establecer una comunicación con el sistema de control, que es digital.

La función de éste capítulo es describir las características fundamentales del sistema digital de control. Se explica como se seleccionó al microprocesador y que funciones

realiza. También se habla sobre el proceso lógico de control que interviene en el trabajo de acondicionamiento, además de una explicación de como se opera el equipo.

a. Descripción del Sistema.

El sistema digital de control tiene la función de dirigir todos los procesos que realiza el acondicionador. Para empezar, tiene que llevar a cabo procesos relacionados con el restaurador, como son el abrir la malla de realimentación y controlar la fuente de encendido programable; con la etapa de ajuste de cero, el sistema de control debe manejar a todos los convertidores que hay en a sistema, así como verificar los cruces por cero; en cuanto al amplificador, debe establecer la ganancia que va a proporcionar; finalmente, para controlar la frecuencia de corte del filtro, se debe manipular al contador programable. Además de esto, controla el teclado y la pantalla de despliegue de datos, que sirven de conexión con el usuario.

Esto hace ver que el sistema de control se encarga de todas las funciones del sistema de acondicionamiento, pero además, las tareas que realiza, deben hacerse rápidamente. Para lograr esto, se usó como unidad de control del sistema a un microcontrolador. Se tuvo que escoger uno que cumpliera con ciertos requisitos y con alguno de los objetivos del proyecto. Para esto, a continuación se da una explicación de porqué se utilizó un microcontrolador en vez de un microprocesador, se habla sobre como se escogió el microcontrolador y de cuales son sus característica.

i. Características Básicas del Microcontrolador.

La primera parte del proyecto se basó en la construcción del acondicionador propiamente, de sus bloques funcionales, todos aquellos que se describen en el capítulo 2., por lo que antes de implementar la etapa de control, para poder hacer pruebas y mediciones en los diversos bloque del acondicionador, se utilizaba como sustituto o simulador, una computadora PC-XT. Para éste fin, se hizo un programa en lenguaje *BASIC* que realizaba todas las funciones que debía realizar el sistema de control y así se comenzó a probar el sistema.

El uso de la PC dio la idea de crear un sistema de control parecido ésta; las rutinas en *BASIC* funcionaban bien y era posible adaptarlas para que operaran en el sistema de control. Por otro lado, el bus de comunicación entre la PC y el acondicionador ya se tenía hecho y se había usado con muy buenos resultados. Lo único que faltaba era crear una arquitectura que permitiera una operación parecida o con características similares a la computadora personal, para que de esta forma se pudieran usar las herramientas que ya se habían desarrollado.

Con ésta idea, el diseño de la etapa de control comenzó con la elección de una unidad de control que permitiera crear un sistema como el que se deseaba. Dadas las características de los productos que hay en el mercado, se vio que un camino adecuado y práctico, sería escoger un microcontrolador en vez de un microprocesador. La diferencia entre ambos está en que los microprocesadores son sólo la unidad central de proceso (CPU), con un bus de datos y uno de direcciones, por lo que requieren de elementos externos, como una memoria, para poder funcionar. En cambio, los microcontroladores tienen integrados circuitos adicionales, como memoria RAM o EEPROM y otros dispositivo que permiten usarlo sin necesidad de elementos externos, lo que facilita su manejo y les da una mayor flexibilidad en su uso y en las aplicaciones.

Sabiendo esto, el problema se reducía a la elección del microcontrolador adecuado. Como los procesos de control que se requerían no eran muy elaborados y complicados, relativamente hablando, el problema de selección se reducía entonces a sistemas más bien pequeños.

El microcontrolador que se decidió usar es fabricado por Motorola, el MC68HC11F1. Hay varias razones por las cuales se escogió éste dispositivo en lugar de otros con características similares. Para empezar, cuenta con memoria RAM, EEPROM y ROM integrada. Tiene diversos puertos paralelos y dos puertos serie, los cuales permiten la comunicación con otros sistemas digitales. Tiene un bus de datos de 8-bits y un bus de direcciones de 16-bits. Por otra parte, éste dispositivo no es caro y además, el Laboratorio de Instrumentación cuenta con algunos de ellos, por lo que el diseño de la etapa de control se comenzó a realizar usando un MC68HC11F1.

Viendo que el microcontrolador funcionaba adecuadamente con la aplicación que se deseaba, se planteó una arquitectura que pudiese operar dispositivos intel, que pudiese ser de propósito general, con el fin de poder usarla en otras aplicaciones sin tener que hacer muchas modificaciones al diseño original.

El MC68HC11F1 tiene muchos elementos internos y muchas características que lo hacen un dispositivo muy versátil y con gran número de aplicaciones. En éste trabajo sólo nos concentraremos en aquellas cualidades que nos son útiles y que se utilizan como parte del control del acondicionador. Si se tiene interés por conocer más acerca de éste dispositivo, se sugiere ver el manual de operación¹ donde se describen detalladamente sus características.

La memoria interna de éste dispositivo se divide en tres partes, una de ellas es la memoria tipo RAM, de 1 kbyte; otra parte se designa a la memoria EEPROM que es de 512 bytes y finalmente una memoria ROM que está grabada con un programa especial para cuando el dispositivo trabaja en modo de *Bootstrap*. Las direcciones de éstas se pueden ubicar en diferentes partes del mapa de memoria del sistema, esto significa que la memoria del dispositivo es remapeable.

ii. Modo de Operación.

Sólo hay dos modos fundamentales de operación para el HC11, uno de ellos se conoce como *modo independiente* y el otro como *modo expandido*. Cada uno de estos modos tiene una variante, dando como resultado final, cuatro modos de operación. La selección del modo bajo el cual operará el HC11 se determina en el período del *RESET* del sistema, a través de los pines *MODA* y *MODB*. En la tabla que se muestra a continuación se ve como deben ser los niveles de *MODA* y *MODB*, dependiendo del caso.

TABLA 1

NIVELES		MODO DE OPERACION
MODB	MODA	
1	0	Modo Independiente
1	1	Modo Expandido
0	0	Modo Bootstrap
0	1	Modo de Prueba

¹MOTOROLA: "HC11, MC68HC11 Reference Manual". Motorola Inc. 1990.

Cuando el HC11 está configurado en modo independiente, entonces sólo se usan los recursos internos del microcontrolador. Como su nombre lo dice, el dispositivo se vuelve independiente y puede trabajar por sí mismo, sin la ayuda de nada ni nadie.

El modo expandido implica que el sistema tendrá o puede tener una interacción con dispositivos externos, tales como memorias o periféricos. En éste modo de operación, el HC11 tiene un bus de datos de 8-bits, a través del puerto C. El bus de direcciones es de 16-bits y se hace con los puertos B y F. Además, la parte alta del puerto G se puede usar como decodificador programable.

El modo *bootstrap* se usa para establecer comunicación con algún otro sistema digital. La transmisión de datos se hace a través del puerto serie. Este modo tiene como objeto el probar programas, para grabar la memoria EEPROM interna y entre otras cosas, para indicarle al HC11, cual es la dirección de inicio del programa. No se usa en una aplicación final, sólo para pruebas.

El modo de prueba lo utiliza principalmente el fabricante, y está destinado para probar que el dispositivo funcione adecuadamente antes de sacarlo a la venta.

En éste proyecto, el sistema está diseñado para que trabaje en modo expandido, debido a que se requiere del uso de periféricos y a que los programas de control están grabados en una memoria EPROM externa, ya que la magnitud de los programas fue mayor a la capacidad de la memoria EEPROM interna del microcontrolador.

El modo *bootstrap* se uso para probar el sistema y programar los registros internos, así como la dirección de inicio del programa principal.

Otra característica útil del HC11F1, es que tiene un pin (4XOUT), que proporciona una señal cuya frecuencia es igual a la del oscilador o cristal. Internamente, el microcontrolador no trabaja a la misma frecuencia que el oscilador externo, su frecuencia de operación está dividida entre cuatro, por lo que tener un pin con una señal con la frecuencia del oscilador es muy práctico, sobre todo cuando se tiene un contador (8254) que requiere una señal de alta frecuencia. Así que, a través del pin 4XOUT es como se le proporciona la señal de 8 MHz al contador programable 8254.

iii. Arquitectura y Mapa de Memoria.

La arquitectura que se propuso para el sistema de control está compuesta principalmente por una memoria RAM, una memoria EPROM, una pantalla para el despliegado de mensajes, un teclado matricial de 5x4 y dos dispositivos periféricos, el 8255 y el 8254, que si bien se considera que son parte del acondicionador, su operación depende directamente del microcontrolador y son parte del mapa de memoria. En la siguiente figura se aprecia un diagrama a bloques del sistema de control.

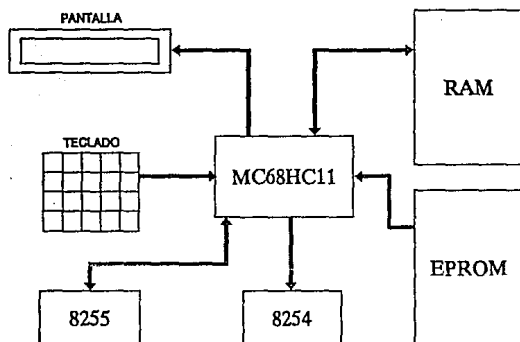


Figura 1
Diagrama de bloques de la arquitectura del sistema de control.

En la figura 1 aparecen los elementos fundamentales que componen al sistema de control. La pantalla (AND-491) se utiliza para mostrar mensajes que indican ya sea, la condición de operación del acondicionador, o bien, las instrucciones que da el usuario. Con el teclado, el HC11 recibe los comandos que proporciona el usuario. Para monitorear éste, se usa un controlador, un 74923, el cual proporciona un número en binario equivalente al número de la tecla que se presionó. A través de estos dos dispositivos, es posible establecer las condiciones de trabajo del acondicionador.

La memoria RAM, de 8 kbytes, se utiliza como archivo de variables, mientras que la memoria EPROM, también de 8 kbytes, se usa para almacenar los programas que controlan el funcionamiento del acondicionador.

En la TABLA 2 que se presenta a continuación, se esquematiza el mapa de memoria. Aquí se indican las localidades de memoria que utiliza cada dispositivo.

TABLA 2

DIRECCION	ASIGNACION
0000-03FFh	RAM INTERNA
1060-1061h	PANTALLA
1800-1801h	TECLADO
8000-9FFFh	ACONDICIONADOR
A000-BFFFh	ZONA LIBRE
C000-DFFFh	RAM EXTERNA
E000-FDFFh	EPROM EXTERNA
FE00-FFFFh	EEPROM INTERNA

En la asignación que aparece como acondicionador, se refiere a los dispositivos 8255 y 8254. Estos a su vez, ocupan localidades de memoria definidas. En la TABLA 3 se muestra la asignación que tiene cada uno de ellos para cada canal.

La conexión que hay entre el microcontrolador y los demás elementos externos, se hace a través del bus de datos y del bus de direcciones. Como ya se mencionó antes, la parte alta del puerto G se puede configurar como decodificador de memoria. Aquí se utiliza para habilitar a la pantalla, y al controlador del teclado.

La habilitación de las memorias se hace a través del bus de direcciones y de líneas de control, como son R/W y E.

Como complemento a todas las características ya mencionadas, es importante hacer notar el bajo consumo energético del Sistema Digital de Control. La polarización de

todos los dispositivos es con 5 V y tierra. La cantidad de corriente que requiere es mínima, es del orden de 100 mA cuando todos los dispositivos están operando.

Con todos estos elementos el sistema de control puede funcionar, pero para que opere como uno desea, es necesario programar al microcontrolador con las rutinas que debe realizar. Los programas que se usaron, se diseñaron para que el equipo pudiera operar como el usuario lo desea. Más adelante se da una explicación de estos puntos.

TABLA 3

Canal	Puerto	Dispositivo	Dirección
0	A	8255	8220
	B		8221
	C		8222
	D		8223
	A	8254	8224
	B		8225
	C		8226
	D		8227
1	A	8255	8228
	B		8229
	C		822A
	D		822B
	A	8254	822C
	B		822D
	C		822E
	D		822F

b. Proceso Lógico de Control.

Una vez diseñado el sistema de control, como está basado en un microcontrolador, debe programarse para que realice las funciones y procesos necesarios para que el acondicionador opere como el usuario desea.

Con éste propósito, se desarrollaron diversos programas o rutinas que llevan a cabo el control del equipo. Cada proceso se programó en una rutina independiente, de tal forma que es posible agregar más rutinas y procesos, tanto en el acondicionador como en el sistema de control, sin tener que modificar otras partes ya desarrolladas. A continuación se explica el principio bajo el cual opera cada rutina.

i. Programa Principal.

Este programa tiene la función de presentar en la pantalla, a través de un menú, las diversas actividades que puede realizar el acondicionador. El usuario elige una y éste programa se encarga de seleccionar la rutina que efectúa y controla ese proceso en particular.

En *DIAGRAMA 1* se muestra el diagrama de flujo que esquematiza a éste programa. Como se puede ver, hay además, una subrutina que selecciona el canal sobre el cual se van a realizar los procesos.

ii. Rutina de Ajuste de Cero.

Esta rutina aparece en el diagrama de flujo número 2. Aquí se controlan las actividades que se llevan a cabo en el restaurador; se abre la malla para que el servoacelerómetro se estabilice y se desconecta la fuente de voltaje.

Una vez terminado esto, se comienza el proceso de ajuste de cero, se mandan la palabras binarias al primer CDA y se espera el cruce por cero antes de seguir con el segundo y luego con el tercer CDA.

En el momento que termina el proceso de ajuste, se regresa al programa principal, para que el usuario pueda pedirle al sistema de control que realice otras actividades.

iii. Rutina de Ganancia.

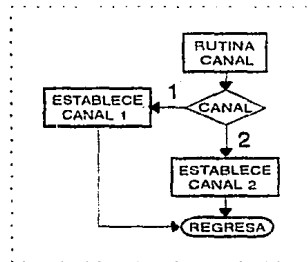
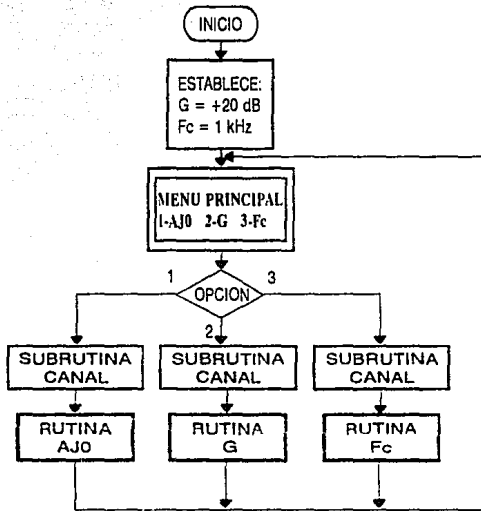
Esta rutina aparece en el *DIAGRAMA 3*. Con éste programa se manipulan las ganancias que tiene el amplificador. El programa espera a que el usuario dé su opción de ganancia, y luego, se le manda al amplificador la palabra digital que corresponde a esa ganancia.

Una vez que se ha establecido la ganancia, la rutina se regresa al programa principal, y de esta forma seguir con algún otro proceso.

iv. Rutina para la Frecuencia de Corte.

En esta rutina, descrita en el *DIAGRAMA 4*, se realiza el cálculo de la palabra digital que recibe el contador 8254, para que el filtro corte en la frecuencia que el usuario desea.

Antes de mandar la palabra que representa la frecuencia de corte, se le dice al contador en que modo de operación debe trabajar. El 36h significa que el 8254 usará el contador cero, que los primeros ocho bits son la parte baja y que los segundos son la parte alta de la palabra de 16-bits, que representa la cuenta inicial. El modo de operación es el cero. Después de esto, se le manda la palabra de 16-bits que representa a la frecuencia de corte.



SUBROUTINA CANAL

DIAGRAMA 1

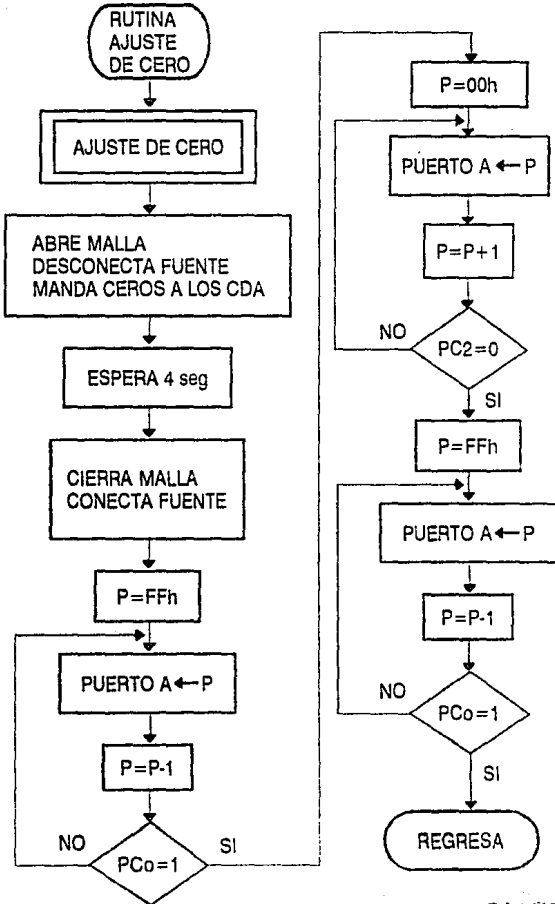


DIAGRAMA 2

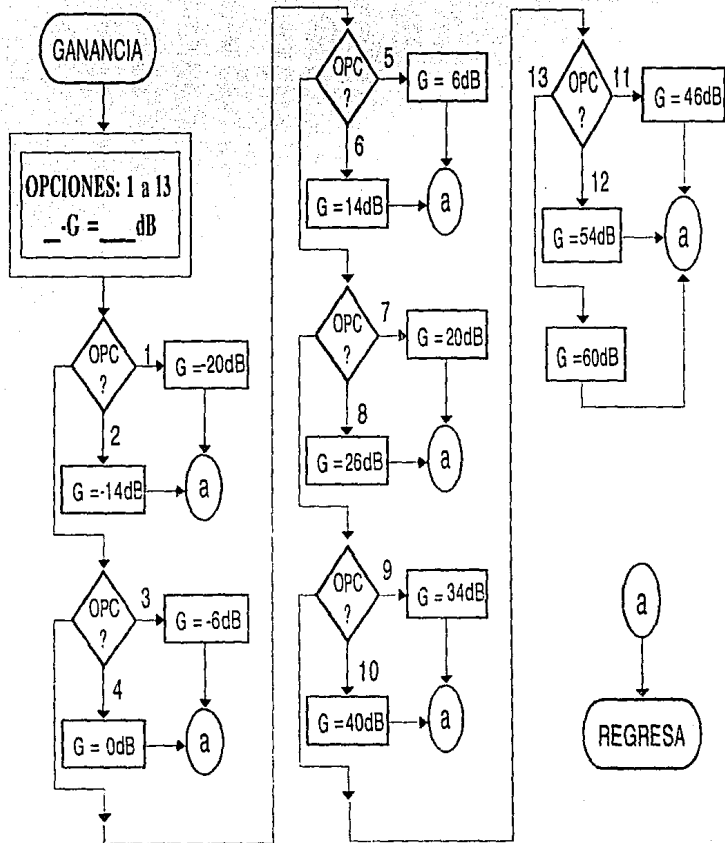


DIAGRAMA 3

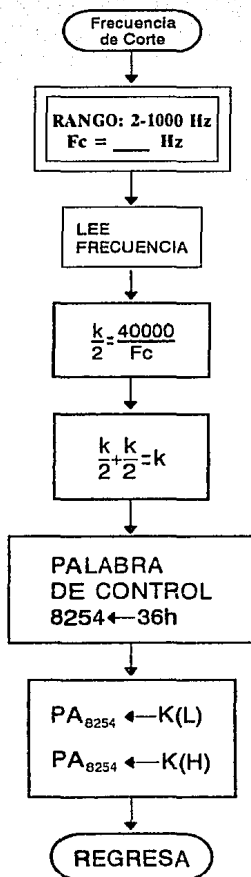


DIAGRAMA 4

10. OPERACION DEL EQUIPO

Este aparato está diseñado para que el usuario pueda establecer las condiciones de trabajo que desea y las puede modificar en cualquier momento. Estas condiciones, cuando se enciende el acondicionador, son por defecto: la ganancia de 20 dB y la frecuencia de corte de 1000 Hz.

Para facilitar su uso, el acondicionador cuenta, como medio de comunicación con el usuario, con una pantalla de LCD y con un teclado matricial. A través del teclado, el usuario puede elegir alguna de las funciones disponibles y modificar su condición de trabajo, además de seleccionar el canal cuyas condiciones serán cambiadas. La pantalla se usa para mostrar mensajes. En ésta se despliega el menú principal, el cual presenta las diversas opciones programadas, así como, el menú para la selección del canal.

El control del acondicionador está dividido en tres partes, por lo que se puede considerar que hay tres funciones básicas de operación. Estas funciones son las que aparecen en el menú principal y se presentan de la siguiente manera: "1→AJO 2→G 3→Fc". La primera (1), es la función de *Ajuste de Cero*, la siguiente (2), se refiere a el modo de control de *Ganancia* y finalmente (3), la función de selección de *Frecuencia de Corte*.

Para que el sistema de control ejecute la primera opción, se debe presionar la tecla que tiene el número 1. Después de esto, aparece un nuevo menú que pide se indique que canal será ajustado. Una vez hecho esto, el sistema de control, automáticamente, ejecuta la rutina de ajuste de cero. Cuando el proceso termina y la señal ya está ajustada a cero, entonces en la pantalla aparece un mensaje indicando que la señal ya está ajustada y nuevamente se regresa al menú principal.

Cuando se desea alterar el valor de la ganancia que proporciona el amplificador, se selecciona el número 2 del teclado. Luego, se debe seleccionar el canal sobre el cual se va a hacer el cambio de ganancia. En este momento es posible ver en la pantalla un mensaje que indica que hay 13 opciones de ganancia, por lo que, el usuario debe escribir, usando el teclado, el número que corresponde a la ganancia que desea, como se muestra en la tabla 1.

Una vez que la ganancia ha sido seleccionada, automáticamente el sistema de control se encarga de hacer que el canal seleccionado opere con ese factor de amplificación. Cuando éste proceso termina, en la pantalla aparece nuevamente el menú principal.

Cuando se desea modificar la frecuencia de corte, se selecciona el número 3 del menú principal. Aquí también se debe seleccionar el canal que se va a operar. El rango bajo el cual es posible seleccionar la frecuencia de corte está entre los 2 y los 1000 Hz.

TABLA 1

OPCION	GANANCIA
1	-20 dB
2	-14 dB
3	-6 dB
4	0 dB
5	6 dB
6	14 dB
7	20 dB

OPCION	GANANCIA
8	26 dB
9	34 dB
10	40 dB
11	46 dB
12	54 dB
13	60 dB

En esta rutina, el usuario debe escribir el valor de la frecuencia de corte que desea, dentro del rango establecido, en la pantalla aparece el valor ingresado y automáticamente el filtro del acondicionador comienza a cortar en esa frecuencia. Es importante aclarar que el valor de la frecuencia de corte sólo puede ser un número entero, los valores fraccionarios no son reconocidos.

El usuario puede ver en todo momento cualquiera de las condiciones de trabajo, ganancia o frecuencia de corte, de cada uno de los canales del acondicionador. Para esto, debe seleccionar la función que desea ver y el canal, inmediatamente en la pantalla aparecerá el dato que desea conocer. Si se trata de la ganancia, la pantalla mostrará el último dato ingresado, viéndose entonces la ganancia del amplificador. Para regresar al menú principal sin tener que alterar o ingresar datos, basta con presionar la tecla de escape, ESC. Inmediatamente aparecerá el menú principal.

Para el caso de la frecuencia de corte, se selecciona esta opción en el menú, luego se elige el canal y en la pantalla aparecerá el valor de la frecuencia en que está cortando el filtro. Aquí también, para regresar al menú principal se presiona la tecla de escape.

Para conectar los transductores, en el gabinete se instalaron dos conectores especiales para los acelerómetros, uno por cada canal. Para ver la señal de salida ya acondicionada, se usan conectores BNC. Para mayor facilidad en las conexiones, por cada canal se instaló un BNC al frente y otro en la parte trasera del equipo.

11. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Para el desarrollo de este trabajo se consideraron varios puntos que debían cumplirse como parte de los objetivos. A continuación se presentan las conclusiones y recomendaciones a las que se llegó con la culminación de este proyecto.

Uno de los objetivos era reducir los problemas y tiempos requeridos en las conexiones previas a las pruebas. Esto es, las conexiones intermedias entre el transductor y el sistema de adquisición de datos. En lo relativo a este punto podemos concluir que con el uso del acondicionador que aquí se presenta, el número de conexiones se ve reducido, así como la probabilidad de errores que había a causa de éstas, ya que sólo se requiere conectar el transductor a la entrada del acondicionador y a su salida se tiene una señal acondicionada y lista para pasar a la siguiente etapa de la prueba, que en éste caso es un sistema de adquisición de datos. Esto a su vez, implica que el tiempo requerido para hacer conexiones se ve notablemente reducido, permitiendo dedicarle más atención a otras tareas. Además, la aplicación de este acondicionador no requiere de capacitación especializada, por lo que es fácil de usar e indirectamente facilita el desarrollo de las pruebas.

Se fabricaron dos acondicionadores con el propósito de mostrar la factibilidad de construir varios aparatos de modo que puedan ser intercambiables, o sea, que tengan características repetibles. Para esto, la principal preocupación era lograr un buen funcionamiento de los filtros, debido a que normalmente es difícil igualar las características de estos.

Se logró que los acondicionadores, con sus filtros, funcionaran de manera prácticamente idéntica. Esto permite implementar filtros adicionales y construir más acondicionadores, con la garantía de que todos tendrán las mismas características.

Una conclusión importante es que, con la elaboración de este proyecto, se ha demostrado que es factible desarrollar en el Instituto de Ingeniería de la UNAM, acondicionadores de señales con una calidad equivalente a la de los equipos comerciales, sin necesidad de recurrir a grandes gastos. Con el desarrollo de este equipo, se demostró que el costo de los materiales requeridos no representa una inversión excesiva.

Se pudo desarrollar un equipo que cumple con las necesidades del usuario y se logró algo muy importante, la adecuación de la tecnología existente para fines propios, sin la necesidad de depender de equipos comerciales.

Como recomendaciones para mejorar la calidad y desempeño del aparato, se sugiere hacer un gabinete especial para que puedan colocarse las diversas tarjetas de manera fácil y práctica, facilitando de esta forma el mantenimiento y el acceso a los diversos módulos, así como la posibilidad de aumentar el número de canales por aparato.

También se recomienda que los próximos aparatos se fabriquen de manera más robusta, debido a que su aplicación no será en laboratorios, sino en pruebas de campo, donde se requiere que los equipos sean resistentes a diversas condiciones de trabajo, tales como vibraciones, variaciones de temperatura, golpes, polvo, y otras condiciones adversas.

Se encontró que la calidad de la etapa de amplificación se puede mejorar usando amplificadores con mejores características. De esta forma se evitarán ligeras distorsiones en el espectro de magnitud.

APENDICE A.

FUENTE DE VOLTAJE DE ENCENDIDO PROGRAMABLE.

La fuente de voltaje de ± 15 V que polariza al servoacelerómetro, está implementada con un regulador de voltaje y con un amplificador operacional. El regulador de voltaje es un circuito integrado¹ (LM723). Este tiene la cualidad de poder fijar el voltaje de salida y de limitar la corriente que suministra utilizando transistores externos.

La fuente está dividida en dos partes, la que suministra +15 V, y por otro lado, la de -15 V. En la figura 1 se muestra el diagrama para la polarización positiva.

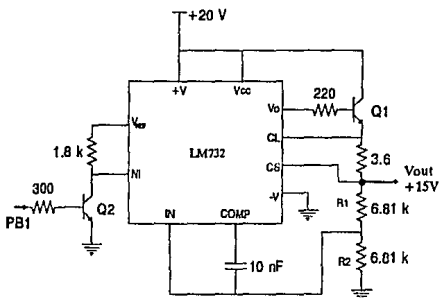


Figura 1
Diagrama de la fuente positiva, usando el dispositivo LM723.

Con las conexiones mostradas, a la salida se tiene un voltaje regulado a +15 V. Para calcular éste voltaje, se usa la siguiente expresión:

¹National Semiconductor. General Purpose, LM723/LM723C Voltage Regulator. 1989

$$V_{OUT} = (V_{REF} * \frac{R_1 + R_2}{R_2}) \tag{A. 1}$$

Las resistencias R_1 y R_2 son del mismo valor, por lo que $V_{OUT} = V_{REF} * 2$. El voltaje de referencia es fijo, el valor típico que proporciona el fabricante es de 7.15 V, por lo que V_{OUT} será igual a 14.30 V.

En la figura 1 aparecen dos transistores, Q_1 y Q_2 . La función del primero es la de regular el voltaje que hay a la salida. La corriente máxima será de 300 mA. El segundo transistor es el que se usa para programar el encendido o apagado de la fuente. Como se puede apreciar, está conectado entre las terminales NI y V_{REF} . Cuando por PB₁ llega un uno lógico, se programa el apagado. El transistor se satura, dejando pasar a la corriente hacia tierra, lo que hace que el voltaje de referencia sea cero. Cuando esto ocurre, usando la ecuación (A. 1), podemos ver que V_{OUT} es cero y consideramos que la fuente se apagó. Cuando se desea que la fuente esté encendida, por PB₁ debe haber un cero lógico, de esta forma, el transistor Q_2 está en corte, la corriente ya no se va hacia tierra y en V_{REF} hay 7.15 V.

Para limitar la corriente que suministra la fuente, se aprovecha el circuito que para éste propósito tiene el LM723. En la figura 2 se esquematiza una parte de éste circuito que es interno.

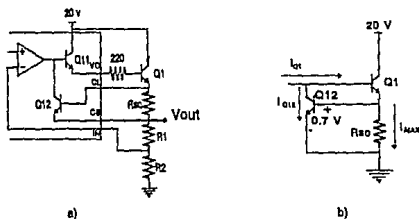


Figura 2.
Diagrama esquemático del circuito limitador de corriente.

En el circuito de la figura 2a. se ve que con los transistores Q_{11} y Q_1 se forma una configuración Darlington y con Q_{12} y R_{SC} se limita la corriente que va hacia la salida.

Para realizar el análisis y los cálculos que nos permitan conocer el valor de R_{SC} , debemos considerar una condición de operación extrema. En éste caso, la peor situación se tendría cuando la terminal que proporciona la salida de 15 V es aterrizada. Aquí, como R_1 y R_2 son grandes, la corriente se va hacia tierra y su valor es máximo. Esto se muestra en la figura 2b.

El propósito es limitar el valor de ésta corriente a 300 mA. Para esto, debemos calcular el valor de la resistencia R_{SC} . Para calcular su valor, comenzamos viendo que Q_{12} entra en operación cuando entre sus terminales Base-Emisor hay una diferencia de potencial de 0.65 V. Si esto sucede, entonces el voltaje que hay en R_{SC} será del mismo valor. Como la corriente máxima (I_{MAX}) debe ser de 0.3 A, por la ley de Ohm podemos encontrar el valor de la resistencia que puede limitar la corriente.

$$R_S = \frac{V_{R_{SC}}}{I_{MAX}} = \frac{0.65}{0.3} = 2.16\Omega$$

El funcionamiento básico del circuito limitador de corriente está basado en el siguiente razonamiento: si por R_{SC} pasa más corriente que la calculada (300 mA), ocurre que Q_{12} se pone en amplificación ya que $V_{BE} \cong 0.65$ V. Si esto pasa, Q_{12} empieza a jalar corriente a través de su colector y como consecuencia, la que llega a la base de Q_1 disminuye, por lo que también disminuye la corriente que pasa por la resistencia R_{SC} , reduciendo de esta forma el voltaje Base-Emisor de Q_{12} y así, éste deja de estar en amplificación y lo más importante, la corriente se mantiene estable en 300 mA, hasta que baje la demanda de la carga.

El circuito para la fuente negativa se hizo con un amplificador operacional. Aquí se aprovecha el voltaje que suministra el regulador LM723.

El circuito de la figura 3 tiene la configuración básica de un amplificador inversor de ganancia unitaria. Como sabemos, en ésta configuración, el voltaje de salida se calcula con la siguiente expresión:

$$V_{OUT} = -\frac{R_2}{R_1} * V_{in} \tag{A. 2}$$

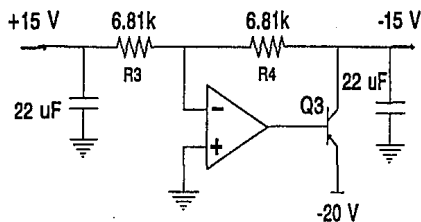


Figura 3
Fuente negativa de -15 V.

Como las dos resistencias son del mismo valor, entonces $V_{OUT} = -V_{in}$. De ésta forma, se obtiene un voltaje con el mismo valor que el positivo. Para que la fuente negativa pueda manejar 300 mA, se incluyó un transistor como fuente de corriente, Q_3 . Al ser R_4 y R_3 iguales, y como están conectadas entre +15 V y -15 V, encontramos que en el punto medio donde se unen, el voltaje es cero, por lo que se considera como tierra virtual.

APENDICE B

COSTOS DE PRODUCCION DEL EQUIPO

El equipo que se desarrolló y se presenta ahora, está compuesto por dos acondicionadores y una etapa de control para ambos, pero como ya se mencionó en la Introducción, una vez que se comience la fabricación, por cada etapa de control podrá haber más canales.

El tiempo de desarrollo fue de 6 meses y a lo largo de éste período se realizaron varias actividades. La primera de ellas fue la investigación y búsqueda de información relacionada con el proyecto. La segunda etapa, fue la elaboración del diseño y pruebas de cada bloque del acondicionador y la tercera parte fue la implementación final y prueba del equipo.

Este proyecto es un prototipo y se diseñó, entre otras razones, con la intención de probar y justificar que la fabricación de equipo como éste se puede realizar en el mismo Instituto, que su desempeño es tan bueno como los equipos comerciales y que no es necesario invertir grandes cantidades de dinero en la compra de productos comerciales.

El diseño de éste acondicionador ya está terminado, por lo que no es necesario invertir más dinero en investigación y se puede aprovechar para construir más equipos como éste, ya no a nivel prototipo, sino como instrumentos de aplicación y porqué no, como equipos comerciales de fabricación en serie.

Para la fabricación de los dos canales y la etapa de control, y considerando solamente las partes electrónicas y materiales necesarios para la implementación, se invirtió la cantidad de N\$ 1,356.90. En la tabla 1 y 2 se muestra un lista del número y partes usadas y su precio correspondiente. La primera tabla se refiere a las partes requeridas por un sólo canal, el costo de los materiales necesarios para dos canales es de N\$ 839.40. En la segunda tabla se ven las partes que se necesitan para implementar la etapa de control, así como la fuente de alimentación, además del gabinete y los conectores. Todo esto asciende a la cantidad de N\$ 517.50.

Comparando el costo del aparato fabricado en el Instituto de Ingeniería con un equipo comercial equivalente, como lo sería un filtro Rockland 2000, que cuesta

aproximadamente \$ 4,000.00 dólares o N\$ 12,000.00, se ve que la diferencia de precio es bastante grande y las diferencias operativas son mínimas, además de que cada equipo comercial sólo cuenta con dos canales, mientras que el equipo que se hizo, una vez que se manden a fabricar más, puede tener un número mucho mayor a éste.

Si no se tiene equipo de acondicionamiento de señales y se necesita hacer una prueba que requiere el uso de 10 canales, una opción sería hacerla con equipo comercial, por lo que hay que comprarlo y esperar que lo entreguen. Para esto y sólo considerando a los filtros Rockland, se necesitarían \$ 40,000.00 dólares o N\$ 120,000.00 para instrumentar la prueba. Por otro lado, se puede usar el acondicionador que se presenta en éste trabajo, lo que implicaría un costo de N\$ 7,310.00, como se muestra más adelante, donde se evalúa la construcción de 10 canales y una etapa de control.

Considerando que el costo de construcción de 10 acondicionadores y un sistema de control, está en función de los siguientes parámetros:

- Tarjetas con el circuito impreso: N\$ 2,200.00.
- Materiales y partes: N\$ 4,750.00.
- Salario para personal que suelde, ensamble y pruebe: 40 hrs a N\$ 9 por hora¹= N\$ 360.00.
- Total: N\$ 7,310.00.

Los costos relacionados con el uso de equipo e instalaciones, no se consideraron debido a que ya existen. Aun así, la diferencia en costo sobresale a primera vista. Está claro que el uso de equipos comerciales puede ser justificado cuando no es posible o no es factible que uno mismo haga esos equipos, pero cuando la institución si puede fabricarlos, entonces conviene hacer un estudio y analizar cuales son las mejores opciones.

¹Esta cantidad se consideró como el monto que se le paga a un becario (N\$ 700.00 al mes).

TABLA 1

CANTIDAD	DESCRIPCION	PRECIO (N\$)
5	74373	6
4	DAC08	36
4	TL084	15
6	TL081	7.2
1	LM723	18
10	BC337	4
70	RESISTENCIAS AL 1%	35
26	RESISTENCIAS AL 5%	3
1	CAPACITORES VARIOS	30
7	POTENCIOMETROS	25
1	8255	35
1	8254	30
4	REGULADORES DE VOLTAJE	10
2	MF10CN	40
2	74138	3.5
1	4001	7
2	LF13331	20
1	BASES DE VARIOS TAMAÑOS	35
2	CONECTORES	10
1	CABLES Y ALAMBRES	50
	TOTAL	419.7

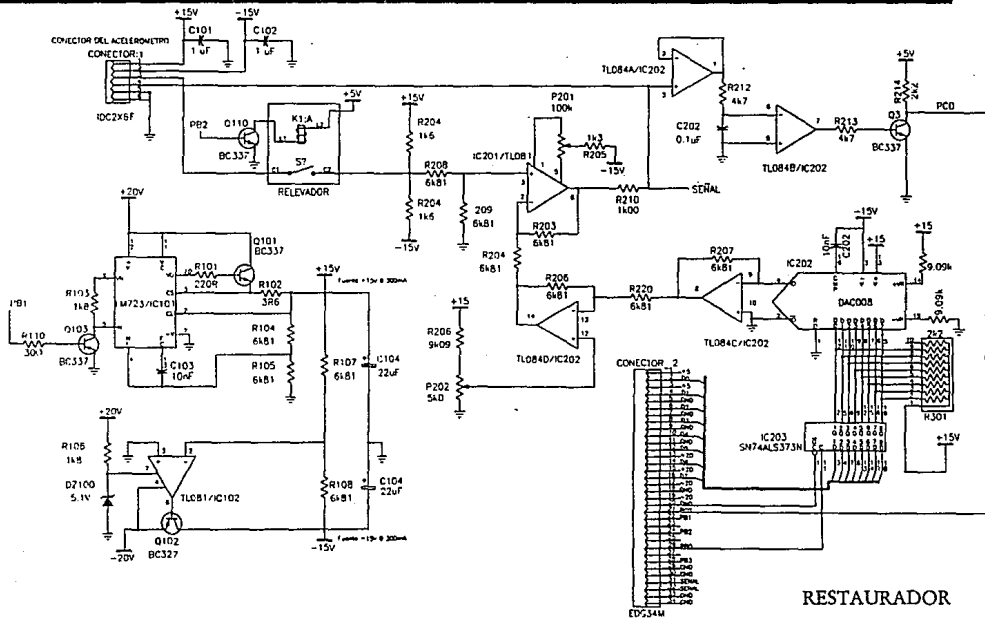
PARTES Y DISPOSITIVOS PARA UN SOLO CANAL

TABLA 2

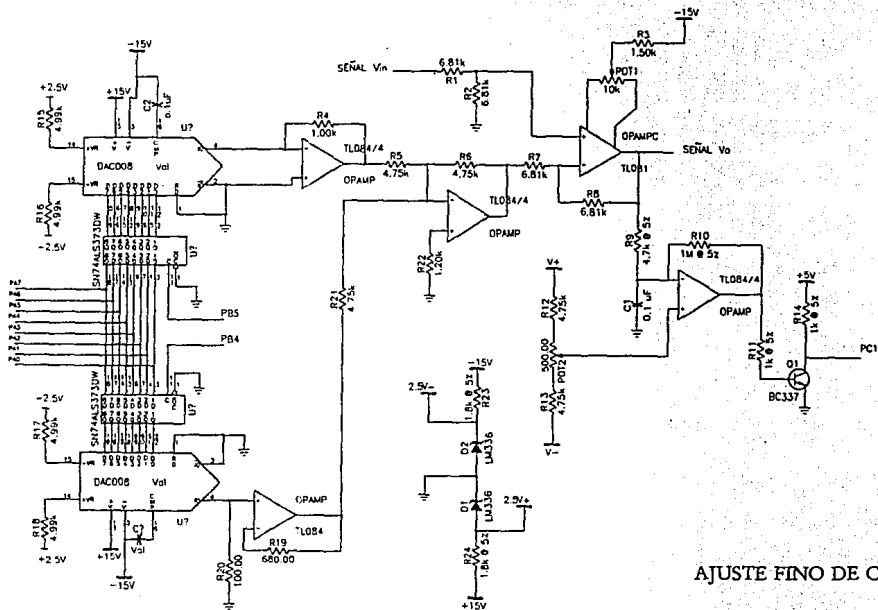
CANTIDAD	DESCRIPCION	PRECIO (N\$)
1	MC68HC11	90
1	2764	16
1	6264	12
1	74923	34
1	74138	1.5
1	7414	1
1	TC232	16
1	CRISTAL 8 MHz	8
1	PANTALLA LCD	105
15	RESISTENCIAS 5%	2
1	CAPACITORES VARIOS	30
1	BASER VARIOS TAMAÑOS	30
4	CONECTORES CABLE PLANO	10
1	TRANSFORMADOR	32
2	PUENTE RECTIFICADOR	4
2	TABLETA PERFORADA	40
1	CONECTORES VARIOS	50
1	GABINETE	36
	TOTAL	517.5

PARTES PARA LA ETAPA DE CONTROL

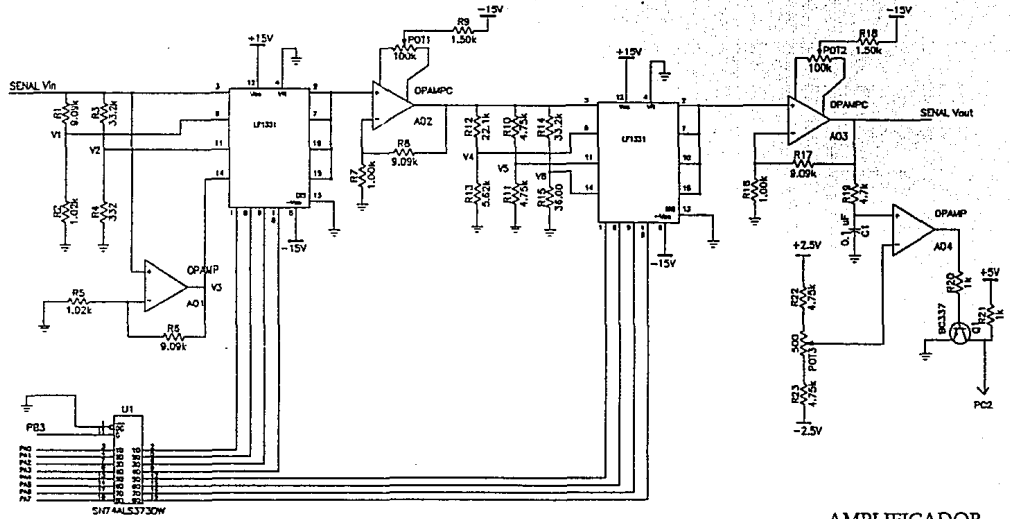
APENDICE C



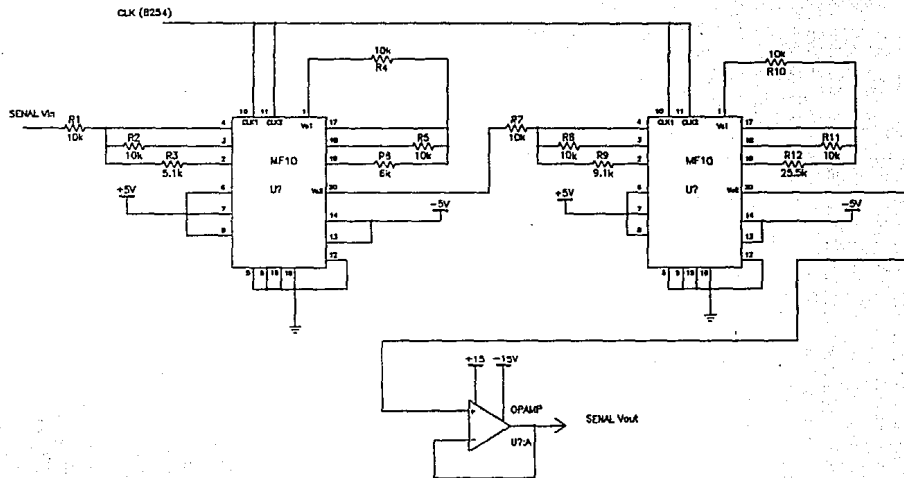
RESTAURADOR



AJUSTE FINO DE CERO

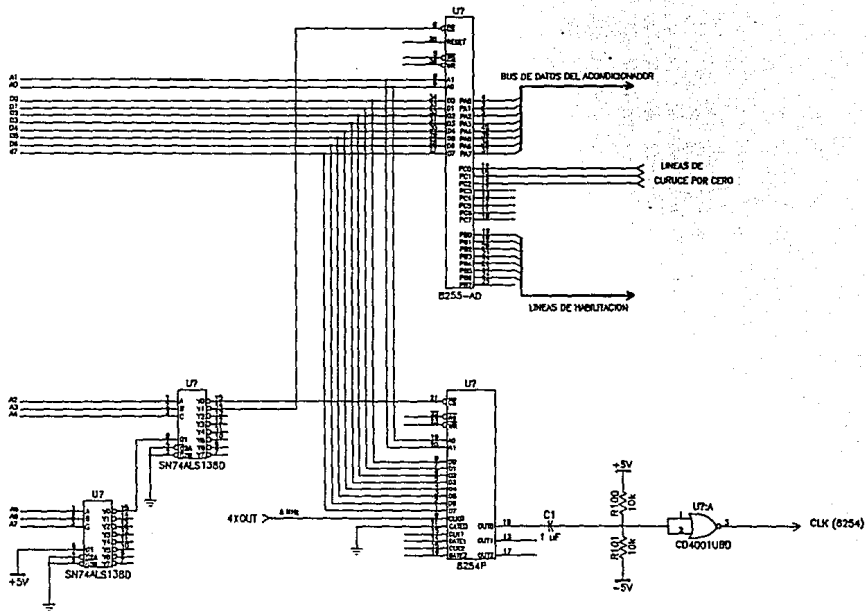


AMPLIFICADOR

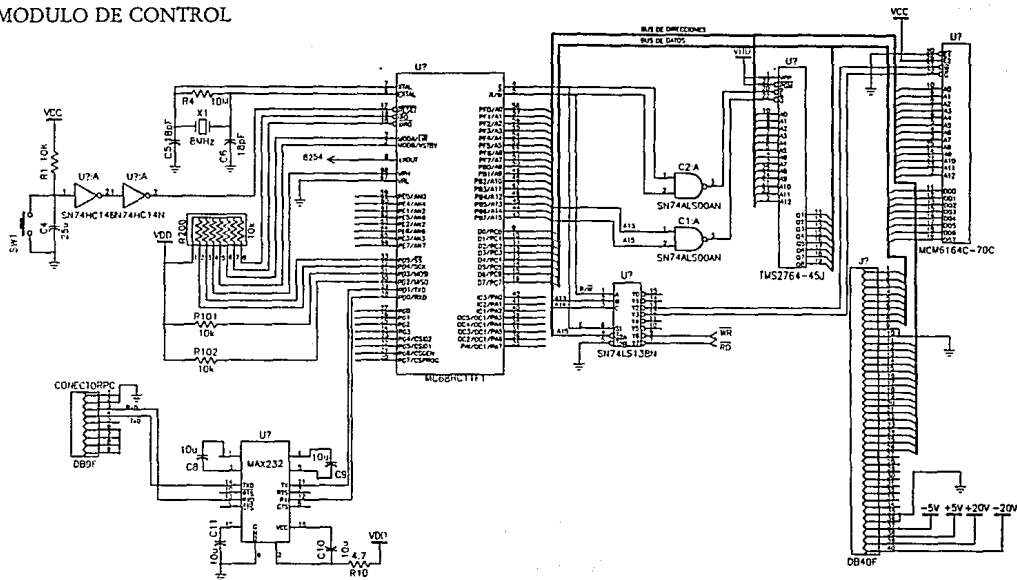


FILTRO

PERIFERICOS



MODULO DE CONTROL



APENDICE D

COMPORTAMIENTO DEL ACONDICIONADOR.

Una vez que se terminó la implementación de los dos acondicionadores y se comprobó el buen funcionamiento de los bloques que los constituyen, se realizaron distintas pruebas con el fin de verificar y caracterizar su comportamiento eléctrico, así como para compararlos entre sí y con un equipo comercial, un filtro *Rockland 2000*.

Para realizar las pruebas, se utilizó un analizador de espectros, el cual tiene la capacidad de conectarse a un sistema de adquisición de datos. De esta forma se pudieron obtener las gráficas que se muestran más adelante. Debe aclararse que la magnitud de las gráficas es lineal y no en dB, mientras que la fase está en grados. Además, la frecuencia de corte y la ganancia fueron establecidas por el usuario en 30 Hz y en un factor por 10, respectivamente.

A continuación se describen las principales pruebas que se realizaron, así como una explicación de cada una de las gráficas obtenidas.

Prueba 1.

Aplicando ruido blanco¹ a cada acondicionador y al filtro comercial, se sacaron sus curvas de función de transferencia, en magnitud y fase. Las curvas se obtuvieron graficando la relación señal de salida entre señal de entrada contra la frecuencia.

Descripción de las gráficas:

A: Canal A. Esta muestra la función de transferencia del canal A del acondicionador, tanto en magnitud como en fase.

A: Canal B. Aquí aparece la función de transferencia del canal B del acondicionador, en magnitud y en fase.

¹El ruido blanco se caracteriza por tener señales que para cierto ancho de banda, abarcan todo el espectro de frecuencias.

R: Canal B. Gráfica correspondiente a la función de transferencia del canal B del filtro comercial, en magnitud y fase.

Rockland y Acondicionador. Esta gráfica es para comparar las diferencias que hay entre un canal y un equipo comercial. Por esto, sólo se presenta la función en magnitud.

Prueba 2.

Esta prueba se realizó aplicando ruido blanco a un filtro Rockland y a los dos acondicionadores. Las curvas que se obtuvieron son una comparación entre todos los canales, siendo los resultados que se muestran la diferencia que existe entre ellos.

Descripción de las gráficas:

A: Relación Canal A Vs Canal B. En esta gráfica se muestra la diferencia que hay entre los dos canales del equipo que se hizo en el Instituto. Como se puede ver, la magnitud está en uno y la fase en cero, lo cual indica que los dos canales son prácticamente idénticos. Se anexa otra gráfica que muestra la coherencia que hay entre ambos canales.

R: Canal A Vs B. Esta gráfica muestra lo mismo que la anterior, sólo que para el filtro comercial. Aquí también se aprecia que ambos canales son muy parecidos.

RA: Relación Canales A. En ésta gráfica se muestra la relación entre el canal A del Rockland y el acondicionador A. Como se ve, la respuesta, en magnitud y en fase, es bastante plana, lo que indica que entre estos dos canales, las diferencias son mínimas.

A: Canal B Vs R: Canal A. Esta gráfica presenta la relación que hay entre el acondicionador B y el canal A del filtro comercial. De la misma forma que en los casos anteriores, las diferencias entre ambos canales son despreciables.

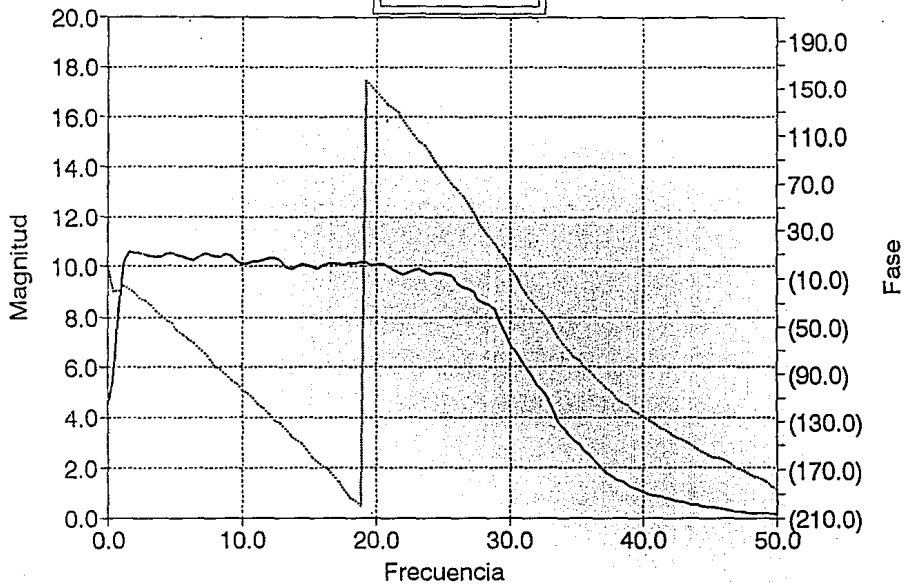
Prueba 3.

Esta prueba se hizo para observar el comportamiento de los dos acondicionadores bajo variaciones de temperatura. El equipo se dejó calentar hasta una temperatura promedio de 50° Celcius. Trabajaron en esta condición durante 2 horas y se midió el corrimiento de *offset* de cada canal. Para el acondicionador A, se detectó un corrimiento de +5 mV, y en el canal B, un desplazamiento de -3 mV. Después se dejó enfriar hasta la temperatura de operación, 30° Celcius. No se detectó ningún corrimiento CD.

Prueba 4.

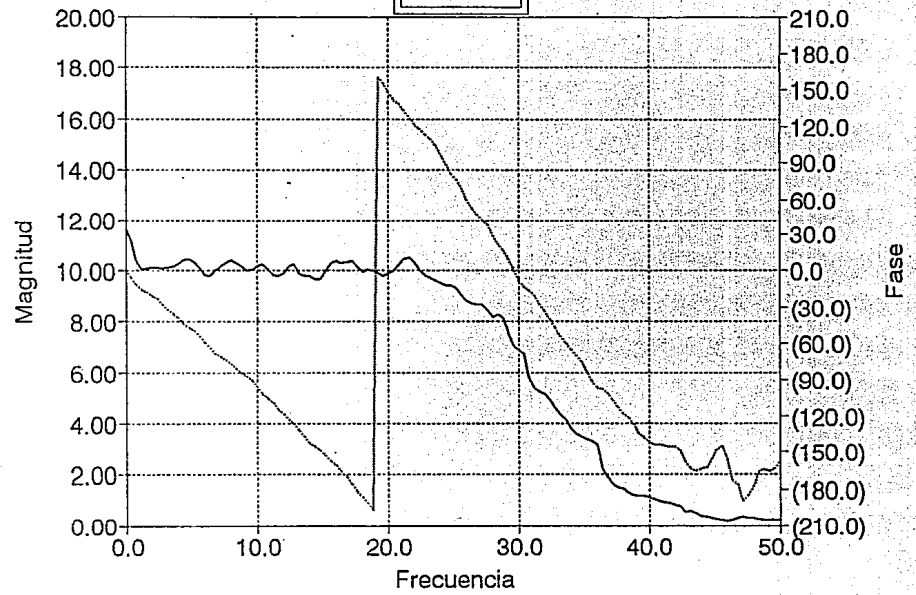
Esta prueba se hizo para detectar posibles corrimientos de CD después de tiempos prolongados de operación. El acondicionador se dejó encendido durante 24 horas y las lecturas que se tomaron muestran que el corrimiento máximo para el canal A fue de 236 mV y para el canal B fue de 178 mV.

A: Canal A

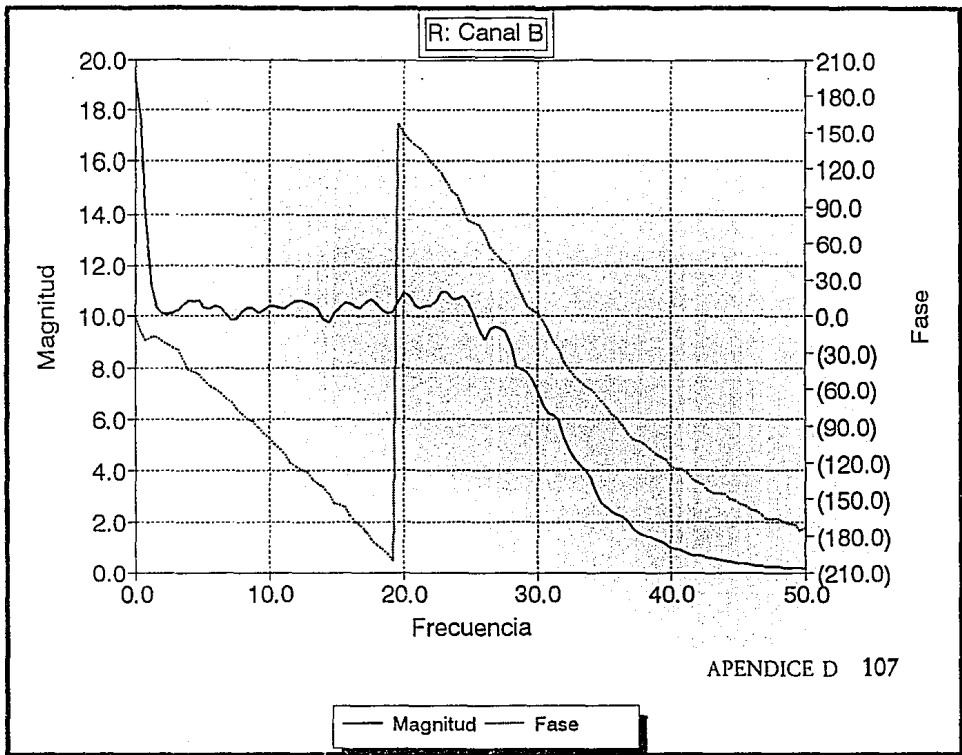


— Magnitud — Fase

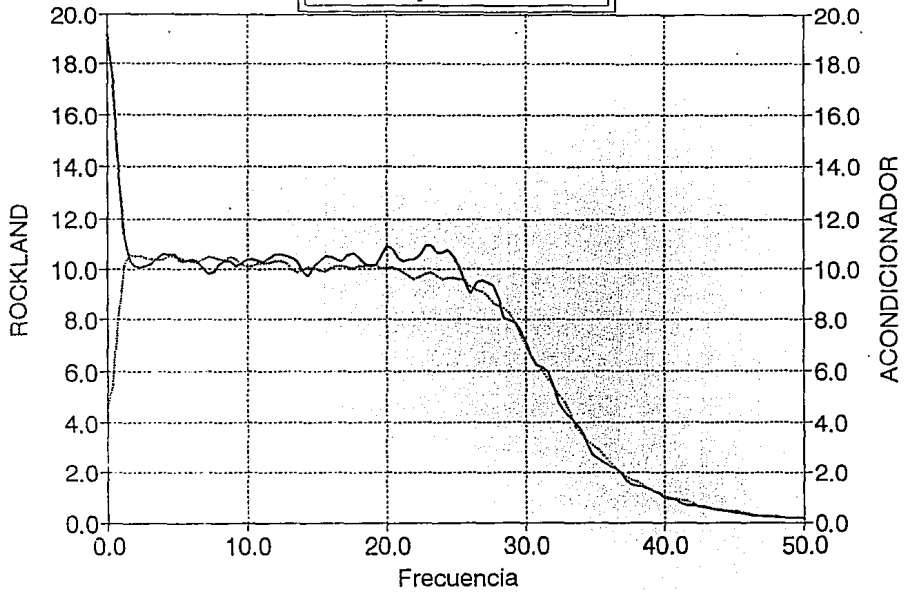
A: Canal B



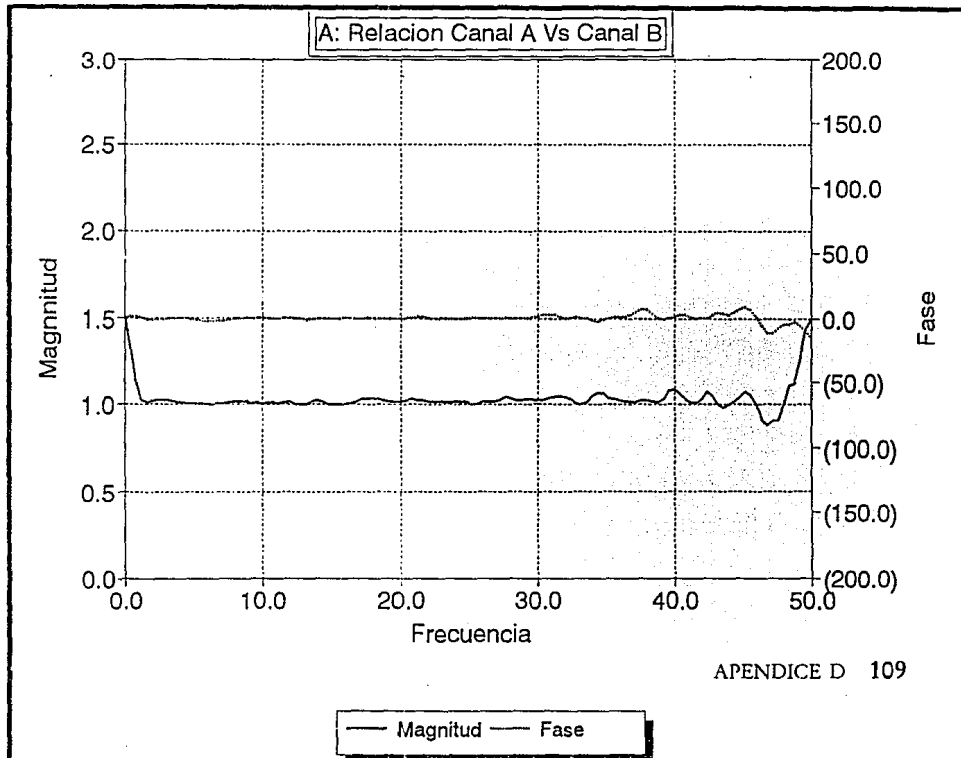
— Magnitud — Fase



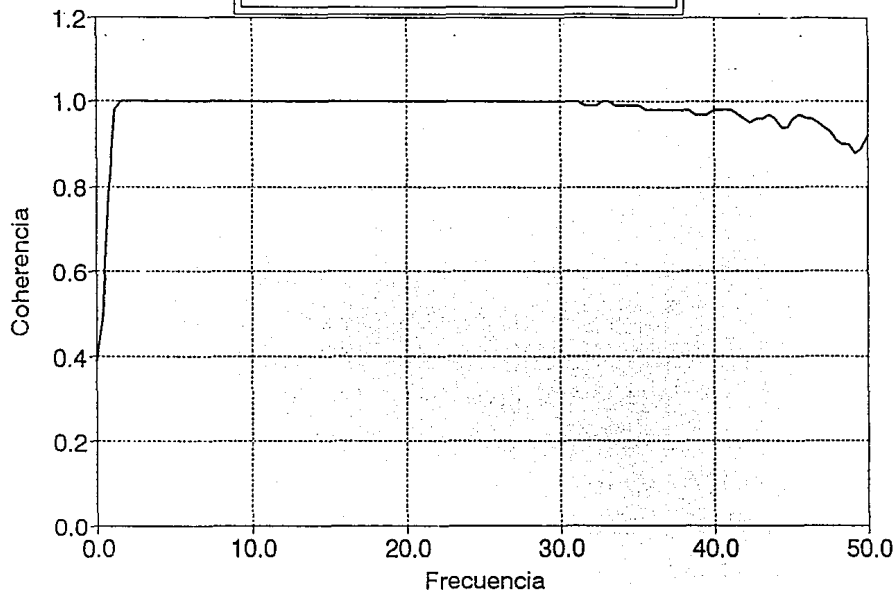
Rockland y Acondicionador



— Rockland — Acondicionador

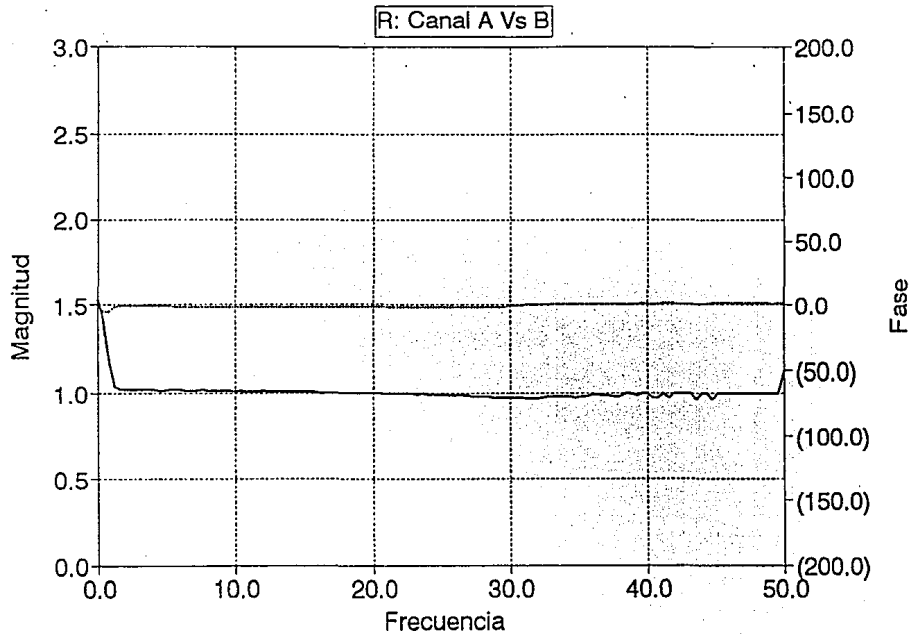


RELACION ENTRE EL CANAL A Y EL B

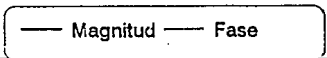


APENDICE D 110

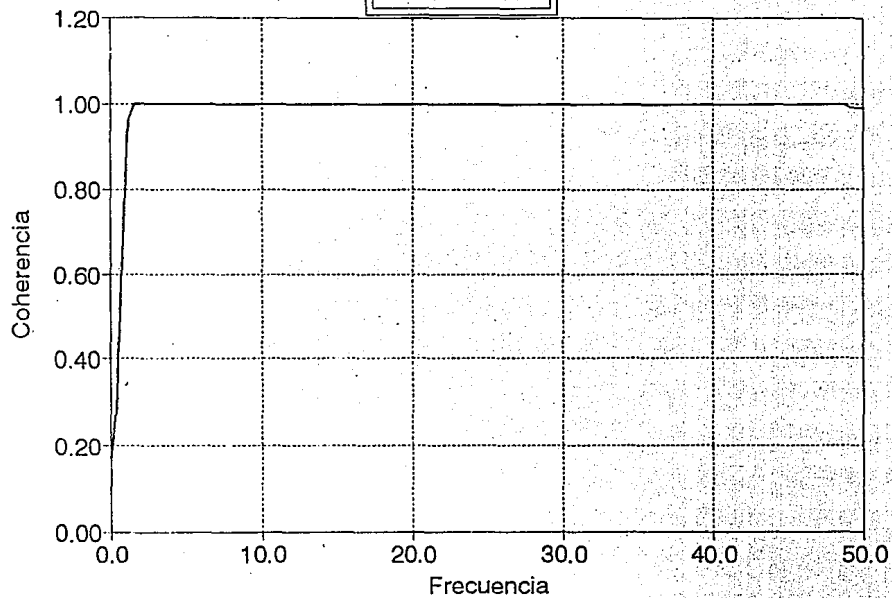
— Coherencia



APENDICE D 111

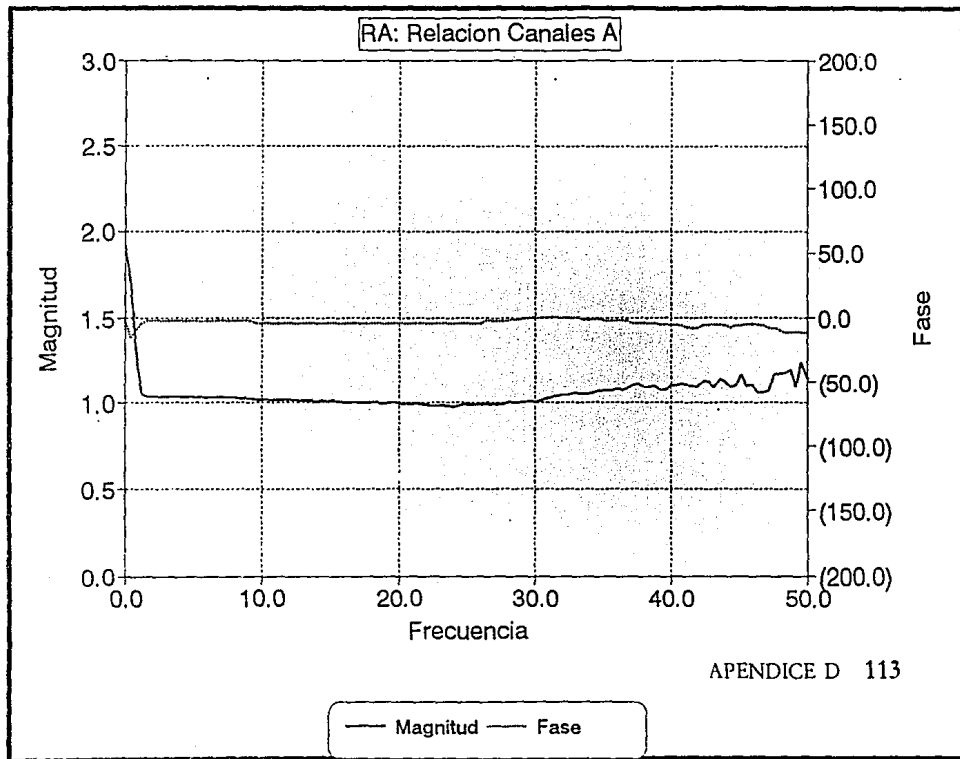


R: Canal A Vs B

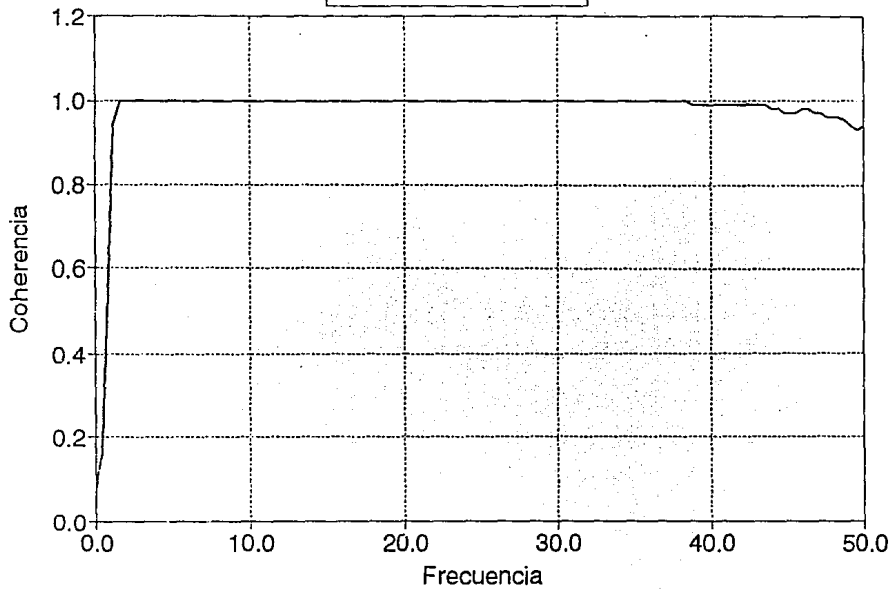


APENDICE D 112

— Coherencia

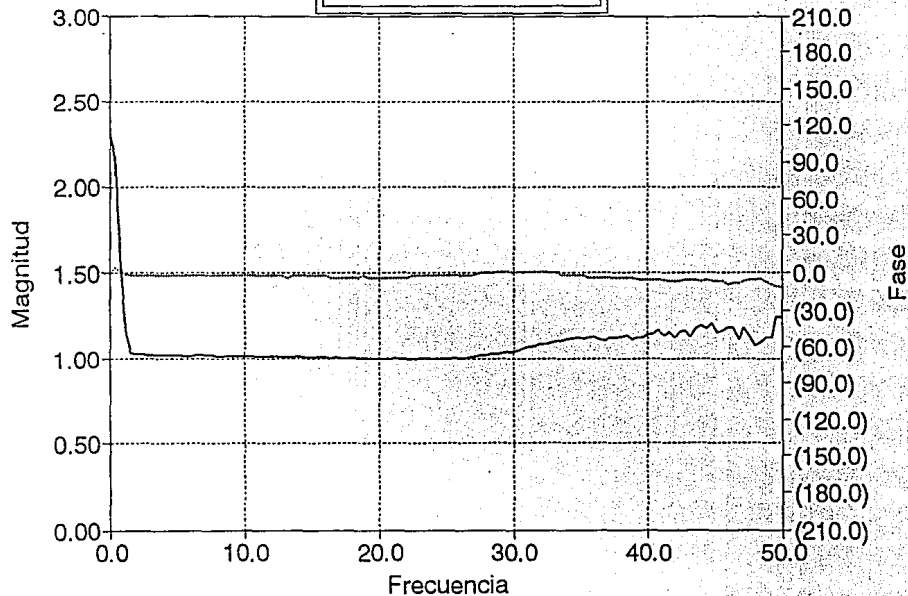


RA: Relacion Canales A



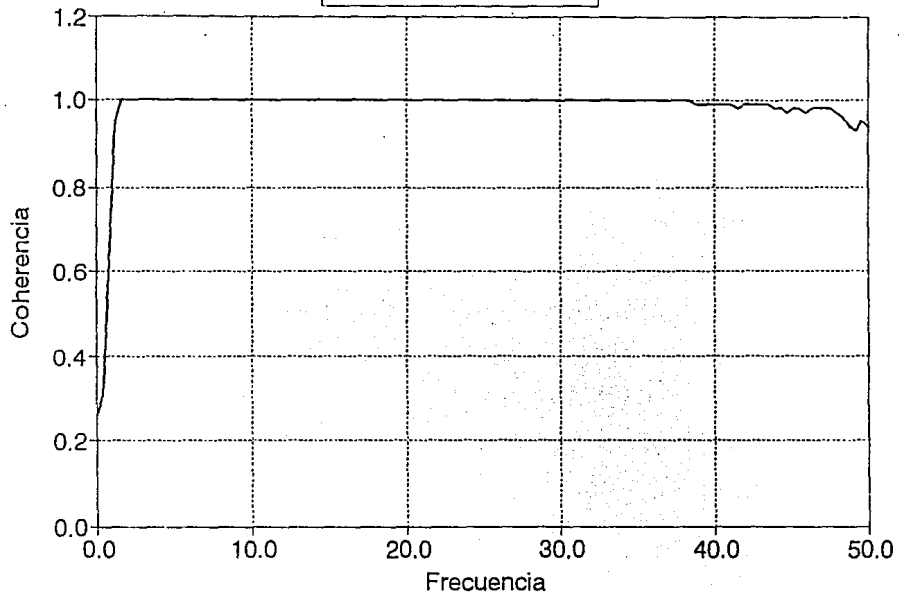
— Coherencia

A: Canal B Vs R: Canal A



— Magnitud — Fase

A: Canal B Vs R: Canal A



— Coherencia

BIBLIOGRAFIA

1. Franklin, Gene F., et al. *Digital Control of Dynamic Systems*, 2- Edition. Addison- Wesley, 1992.
2. Ogata, Katsuhiko. *Ingeniería de Control Moderna*, Primera Edición. Prentice-Hall, 1990.
3. Tobey, E. Gene, et al. *Operational Amplifiers, Design and Aplications*, 21-Reimpresión. McGraw-Hill, 1989.
4. Coughlin, Robert F., et al. *Amplificadores Operacionales y Circuitos Integrados Lineales*, 4-Edición. Prentice-Hall, 1993.
5. Hubert, I. Charles. *Circuitos Eléctricos, AC/DC*, Primera Impresión. McGraw-Hill, 1990.
6. Shaumann, Rolf, et al. *Modern Active Filter Design*, IEEE Press. NY, 1981.
7. Beckwith, et al. *Mecanical Measurments*, 5- Edición, Addison-Wesley, 1993
8. Rao, Singiresu S. *Mecanical Vibrations*, 2- Edition. Addison-Wesley, 1990.
9. Meikzin, Z. H. *Complete Guide to Active Filter Design, OP-AMPS & Passive Components*, Prentice-Hall, 1990.
10. van Potten, Anton F. P. *Electronic Measurments Systems*, Prentice-Hall, 1988.
11. Doebelin, E. *Measurments Systems: Application and Desing*, Addison-Wesley, 1989.
12. Electronics World. *Switched Capacitor Resistors*, MAY 1993.
13. Norton, Harry N. *Sensores y Analisadores*, Colección Electrónica/Informática. Gustavo Gili, España, 1984.

14. Holman, Jack. *Métodos experimentales para Ingenieros*, 4- Edición. McGraw-Hill, 1992.
15. Sánchez E. Manuel, et al. *Filtros Activos: Análisis y Diseño*, Facultad de Ingeniería, 1992.
16. Sears, W. Francis y Zemansky, Mark W. *Física General*, Quinta reimpresión. Aguilar, España, 1962.
17. Sears, W. Francis. *Electricidad y Magnetismo*, Tercera edición. Aguilar, España, 1961.
18. Hibbeler, R. C. *Mecánica para Ingenieros, Dinámica*, Segunda edición. CECSA, México, 1989.
19. Schilling, Donald L. & Belove, Charles. *Electronic Circuits, Discrete and Integrated*, Tercera edición. McGraw-Hill, Singapore, 1989.
20. National Semiconductor. *General Purpose, Linear Devices Databook*, National Semiconductor, 1989.
21. National Semiconductor. *Special Purpose, Linear Devices Databook*, National Semiconductor, 1989.
22. Motorola. *HC11, MC68HC11 Reference Manual*, Motorola Inc, 1990.