



**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**

**FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA**

“Diseño y Construcción de un Circuito Activo  
Universal Para la Realización de Funciones de  
Transferencia Bicuadratica”

## **TESIS DE GRADO**

**Previo a la Obtención del Título de:  
INGENIERO EN ELECTRICIDAD**

**Especialización: ELECTRONICA**

**Presentado por:**

**CLERMONT MUÑOZ ORELLANA**

**Guayaquil, Ecuador**

**1989**

Al Ing. Carlos Villafuerte  
Director de tesis, por su  
ayuda y colaboración para  
la realización de este  
trabajo.

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas  
expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente;  
y, el patrimonio intelectual de la misma, a la ESCUELA  
SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL"



CLERMONT MUÑOZ ORELLANA

*Jorge Flores Heins*

Ing. Jorge Flores  
Presidente del Tribunal

*C. Villafuerte*

Ing. Carlos Villafuerte  
Director de Tesis

*Javier Urquiza C.*

Ing. Javier Urquiza  
Miembro Principal

*Sixto García*

Ing. Sixto García  
Miembro del Tribunal

LIBRARY

A MIS PADRES

## INDICE GENERAL

	Pág.
RESUMEN .....	VI
INDICE GENERAL .....	VII
INDICE DE FIGURAS .....	VIII
INDICE DE TABLAS .....	IX
INTRODUCCION .....	1
I. ESTUDIO Y DESCRIPCION GENERAL DEL SISTEMA .....	2
1.1. Filtros .....	2
1.1.1. Filtros activos .....	4
1.1.2. Clases de filtros activos según su banda de frecuencia .....	12
1.2 Amplificadores operacionales .....	16
1.3 Funciones de transferencia de circuito de segundo orden .....	22
II. DISEÑO DEL CIRCUITO ACTIVO UNIVERSAL .....	31
2.1. Circuitos de filtro bicuadrático .....	31
2.2. Derivación de la función de transferencia .....	34
2.3. Convertidores digital analógico .....	37
2.4. Cálculos de clases de filtros .....	43
2.5. Características de los elementos utilizados y su justificación técnica .....	48
2.6. Diagrama del circuito .....	55

III. CONSTRUCCION Y PRUEBAS .....	56
3.1. Construcción del circuito .....	56
3.2. Pruebas experimentales .....	58
3.3. Gráficos de curvas características .....	61
3.4. Diagrama en bloque del circuito para la medición y lista de aparatos de medición .....	72
IV. DESCRIPCION DEL APARATO .....	73
4.1. Manual de operación .....	73
4.2. Lista de los componentes electrónicos .....	75
4.3. Diagrama del circuito impreso .....	76
4.4. Ubicación de los componentes en el circuito .....	77
4.5. Diagrama final del circuito .....	78
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	79
APENDICES .....	81
BIBLIOGRAFIA .....	180

## INDICE DE FIGURAS

	Pág.
1.- Clases de filtros .....	3
2.- Diagrama de bloque del filtro activo .....	6
3.- Filtro pasa alto .....	7
4.- Respuesta de frecuencia de un filtro pasa bajo típico .....	9
5.- Respuesta de frecuencia normalizada .....	10
6.- Respuesta de fase de un filtro pasa bajo típico .....	10
7.- Ejemplo de la utilización de la transformada de La Place .....	11
8.- Filtro pasa bajo ideal .....	12
9.- Filtro pasa bajo real .....	13
10.- Filtro pasa alto real .....	14
11.- Filtro pasa banda .....	15
12.- Filtro notch .....	16
13.- Amplificador operacional .....	17
14.- Circuito amplificador inversor .....	19
15.- Circuito amplificador integrador .....	21
16.- Respuesta de frecuencia del filtro pasa bajo .....	23
17.- Circuito del filtro pasa bajo de segundo orden .....	23
18.- Respuesta de frecuencia del filtro pasa alto .....	25
19.- Circuito del filtro pasa alto de segundo orden .....	26
20.- Respuesta de frecuencia del filtro pasa banda .....	27
21.- Circuito del filtro pasa banda de segundo orden .....	29
22.- Respuesta de frecuencia del filtro notch .....	30
23.- Ejemplo de circuito de filtro universal .....	32
24.- Ejemplo de circuito de filtro universal .....	
25.- Circuito de filtro universal escogido .....	34



26.- Diagrama de bloque de un convertidor digital analógico	38
27.- Convertidor D/A con resistencias ponderadas	39
28.- Convertidor D/A con escalera R-2R	40
29.- Convertidor D/A reducido (teorema Thevenin)	41
30.- Amplificador operacional TBA 221 A	48
31.- Convertidor D/A AD7525	50
32.- Circuito inversor	50
33.- Circuito inversor utilizando RDA	51
34.- Circuito del AD7525	52
35.- Circuito probador de conductividad de RDA	54
36.- Circuito final del filtro universal	55
37.- Filtro pasa bajo (línea 1)	62
38.- Filtro pasa bajo (línea 2)	63
39.- Filtro pasa alto (línea 1)	65
40.- Filtro pasa alto (línea 2)	66
41.- Filtro pasa banda (línea 1)	68
42.- Filtro pasa banda (línea 2)	69
43.- Filtro pasa banda (línea 3)	70
44.- Filtro pasa banda (línea 4)	71
45.- Elementos utilizados en la medición	72
46.- Diagrama del circuito impreso	76
47.- Ubicación de los componentes en el circuito	77
48.- Diagrama final del circuito	78

## INDICE DE TABLAS

	Pág.
1.- Características del amplificador operacional .....	18
2.- Relación entre los filtros y sus coeficientes .....	37
3.- Coeficientes de compensación $a_1$ y $b_1$ .....	43
4.- Cálculos de RDA .....	54
5.- Resultados experimentales del filtro pasa bajo .....	61
6.- Resultados experimentales del filtro pasa alto .....	64
7.- Resultados experimentales del filtro pasa banda .....	67

## RESUMEN

Este trabajo consiste en principio en realizar un estudio sobre los diferentes tipos, clasificaciones y alternativas de circuiterías existentes para la realización de funciones de transferencia bicuadrática y concebir un circuito activo que sea universal, flexible, confiable y que compense las influencias de los amplificadores operacionales no ideales en los parámetros de transferencia. Para la concepción del mismo, tomaremos como punto primordial el hecho de que debe existir una relación unívoca entre los coeficientes de las funciones de transferencia y el valor de los distintos componentes del circuito, con esto aseguramos la universalidad del mismo, de manera tal que podemos escoger cualquier valor independiente de los otros sin necesidad de realizar ningún cambio de elementos en el circuito.

Mediante la utilización de convertidores digitales analógicos como instrumentos para la elección de los coeficientes, aseguramos la flexibilidad de este circuito porque de esta manera nos permite, por ejemplo, la elección de estos parámetros de transferencia mediante la utilización de un microprocesador. Construiremos un circuito que cumpla las características antes anotadas y analizaremos su confiabilidad, eficiencia, veracidad y propiedades para diversos valores de frecuencia de trabajo.

## INTRODUCCION

El objetivo de este proyecto consiste en realizar un estudio de las redes activas en general, para luego diseñar y construir un circuito activo universal para la realización de funciones de transferencia biquadráticas. La denominación función de transferencia biquadrática, nos da a entender, que tanto en el numerador como en el denominador de nuestra función de transferencia existe una ecuación con una forma matemática biquadrática.

Esta red o circuito universal, puede ser considerada también como un filtro universal regulable, en el cual se debe manejar cada uno de los coeficientes de la función de transferencia de segundo orden de una forma variada e independiente. Es así como, el diseño del circuito debe tener características especiales tales como la universalidad, flexibilidad, independencia mutua, fácil elección y reglaje de los parámetros o coeficientes de transferencia, de tal manera que el ajuste de cada variable dependa de un solo componente electrónico. El reglaje de los parámetros de transferencia, en este caso los coeficientes, tiene que ser confiable y reproducible, de tal manera que nos permita escoger un mismo tipo de filtro y analizar su rendimiento con diferentes señales de alimentación, frecuencias, etc.

## **I.- ESTUDIO Y DESCRIPCION DEL SISTEMA**

En este capítulo realizaremos un breve estudio de las principales características de los elementos fundamentales que componen nuestro sistema a desarrollar.

### **1.1.- FILTROS**

Los filtros eléctricos son utilizados prácticamente en todos los circuitos que requieren de una diferenciación o selección de señales de acuerdo a sus respectivas frecuencias. Sus aplicaciones incluyen funciones tales como la eliminación del ruido y separación de señales en circuitos industriales y de medición, control de la retroalimentación de fase y amplitud en circuitos servo, regulación de señales análogas generadas digitalmente, formación de señales de audio y realce del sonido , separación de canales, y realce de señales en los circuitos de

comunicación. Podemos definirlo también como subsistemas con la propiedad de transmitir señales sinusoidales en una o más bandas de frecuencia y cancelarlas en las bandas no deseadas, dando lugar a varios tipos de filtros como son paso bajo, paso alto, pasa banda y notch; cuyas gráficas ideales mostramos a continuación y de los cuales más adelante hablaremos en detalle.

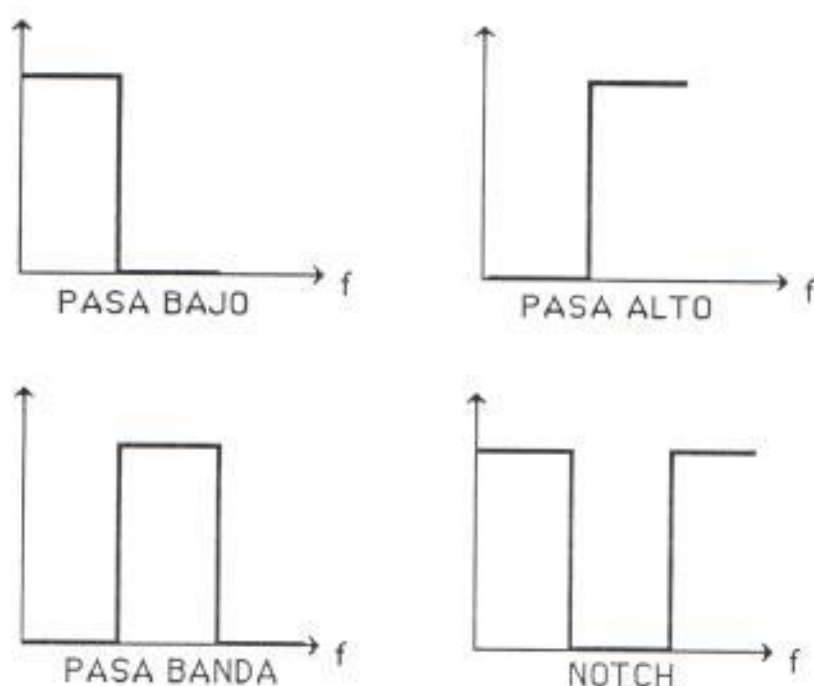


FIG. N° 1.- Clases de filtros

Los filtros pueden ser construidos con elementos RLC pasivos, dispositivos electromecánicos, cristales, ó con resistencias, capacitores y amplificadores operacionales (filtros activos).

Para nuestro sistema trabajaremos con filtros activos pues éstos son aplicables sobre un amplio rango de frecuencia, son económicos, ofrecen una alta impedancia de entrada, una impedancia baja a la salida y una amplia variedad de respuestas de frecuencia.

### 1.1.1.- FILTROS ACTIVOS

Como mencionamos anteriormente los filtros pueden ser contruidos con componentes pasivos. Así tenemos los filtros RC, compuestos únicamente de resistencias y capacitores, lográndose una mejor selección de frecuencias utilizando el filtro RLC, el cual para trabajar con parámetros de frecuencias bajas no es recomendado puesto que se necesitarían valores muy altos de inductancia, lo cual se traduce en inconvenientes de costo y espacio. Los filtros pasivos trabajan aceptablemente en un buen rango de frecuencias sin embargo presentan problemas al operar con frecuencias bajas. Otros inconvenientes se presentan con las impedancias tanto de entrada como de salida, ya que trabaja con una baja impedancia de entrada, lo cual repercute en la fuente y varía con la frecuencia; y la impedancia de salida es alta lo que limita la carga que el filtro puede manejar. Además no existe un total aislamiento entre la impedancia de carga y el filtro pasivo en sí, esto significa que la carga debe ser

considerada como un componente del filtro y debe ser tomada en cuenta al determinar su respuesta de frecuencia al realizar su diseño. Es más, cualquier cambio en la impedancia de carga puede alterar significativamente una o más características de la respuesta del filtro. Por estas razones existe la tendencia a reemplazar éstos y otros filtros pasivos, por filtros construidos con elementos electrónicos modernos.

Los circuitos integrados han sepultado a los sistemas convencionales y a los criterios de capacidades que la antigua electrónica había desarrollado imponiéndose en todas las áreas de la electrónica y por eso también en lo que a filtros se refiere.

La diferencia que existe entre un filtro activo y uno pasivo radica simplemente en la elección de los componentes a usarse en la construcción del mismo. Los filtros activos originalmente fueron construidos con tubos(bulbos) luego se usaron transistores, y en la actualidad su diseño se basa en la utilización de los amplificadores operacionales, mediante los cuales se eliminan muchos inconvenientes. Con un capacitor en un lazo de retroalimentación la inductancia y sus problemas en bajas frecuencias pueden ser eliminadas; adecuadamente diseñado la impedancia de entrada se incrementa y la carga es manejada por la salida del op-amp, permitiendo tener una impedancia de salida tan baja como unos pocos ohmios. Y no solo incrementa la



capacidad de manejo de carga sino que, independiza a la misma de la frecuencia del circuito, con lo cual la variación de la carga no influye en las características del filtro. El amplificador nos permite también, gracias a su alta impedancia de entrada, utilizar altos valores de resistencias, permitiéndonos disminuir la magnitud de los capacitores y por consiguiente reducir costos.

Los filtros que utilizan elementos activos a diferencia de los pasivos necesitan de una fuente de energía auxiliar para el desarrollo de sus funciones ya que en ellos, la energía para el inicio ó creación de la señal de salida no viene de la señal de entrada sino de la batería auxiliar en mención.



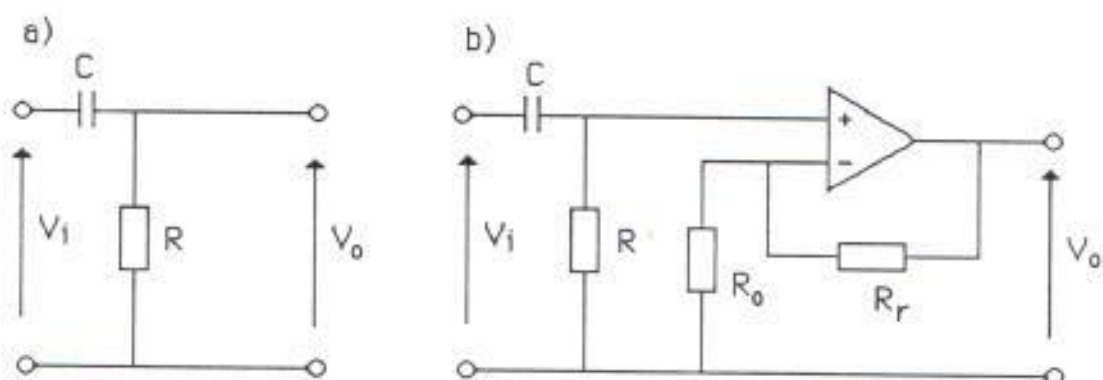
I

FUENTE DE ALIMENTACION

FIG. N° 2.- Diagrama de bloque del filtro activo

Revisemos brevemente la constitución de los filtros, su funcionamiento y características importantes.

Al utilizar el amplificador operacional en un filtro se compensan las pérdidas y sobrecargas que pueden producirse en los demás filtros.



a) Filtro Pasivo Pasa alto

b) Filtro Activo Pasa alto

FIG. N° 3.- Circuitos de filtro pasa alto

El funcionamiento de un filtro se traduce en términos de su respuesta de frecuencia, y se lo describe con gráficos tanto de la ganancia como la fase versus la frecuencia, ya que estos parámetros varían a medida que cambia la frecuencia. Debido a que trabajamos con grandes rangos de frecuencia, para graficar dichas respuestas utilizamos papel logarítmico, el cual nos permite cubrir un mayor rango de frecuencia en menos área de papel, en el eje vertical graficamos la ganancia normalmente expresada en decibeles [dB], o la fase expresada en grados[°]. Para calcular la ganancia del circuito en decibeles, utilizamos la siguiente ecuación:

$$\text{dB} = 10 \log \frac{P_{\text{out}}}{P_{\text{in}}}$$

$$\text{dB} = 10 \log \frac{V_o^2 / R_o}{V_{\text{in}}^2 / R_{\text{in}}}$$

Si asumimos que  $R_o = R_{\text{in}}$

$$\text{dB} = 10 \log \left( \frac{V_o}{V_{\text{in}}} \right)^2$$

$$\boxed{\text{dB} = 20 \log \frac{V_o}{V_{\text{in}}}}$$

Un parámetro de gran importancia es la frecuencia crítica o de corte  $f_o$ ; en el punto donde dicha frecuencia tiene lugar la potencia entregada a la carga ha sido "cortada" a la mitad, y el voltaje sufre un cambio o reducción a 0.707 del valor inicial.

$$P = \frac{V^2}{R}$$

$$V = \sqrt{P R}$$

En  $f_o$  :

$$V_{f_o} = \sqrt{\frac{P}{2} R}$$

$$V_{f_o} = \frac{\sqrt{P R}}{\sqrt{2}}$$

$$V_{f_o} = \frac{1}{\sqrt{2}} V$$

$$\boxed{V_{f_o} = 0.707 V}$$

Consecuentemente el voltaje en la frecuencia crítica disminuye en un factor de 0,707 esto es, traduciéndolos a decibelios, una caída de 3 db.

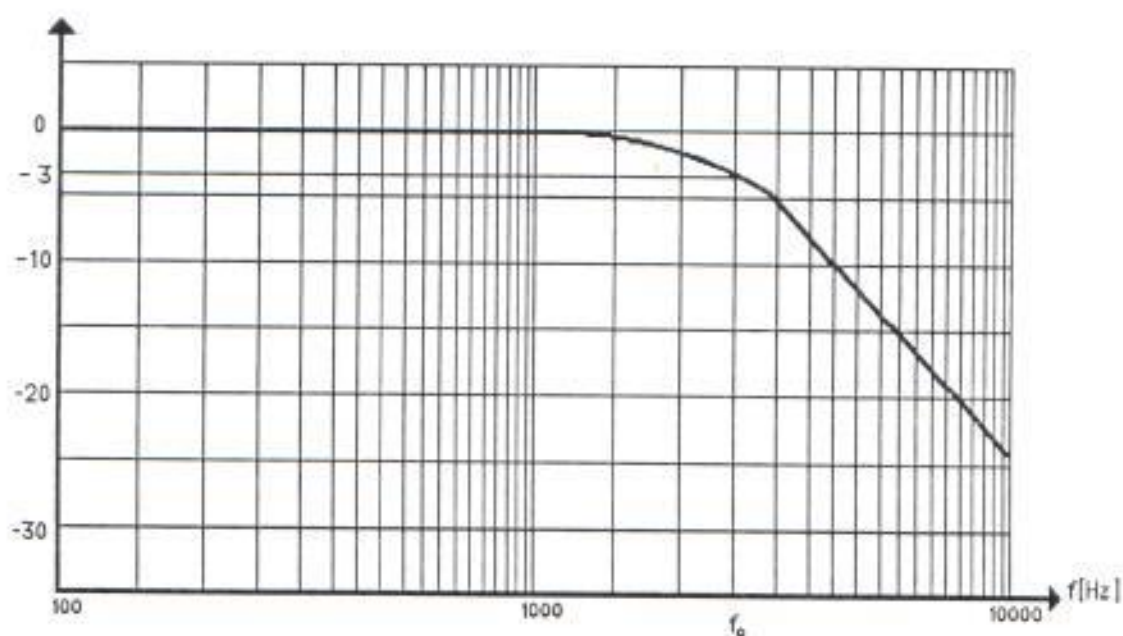


FIG. N°4.- Respuesta de frecuencia de un filtro pasa bajo típico

Cada filtro produce su propia respuesta de frecuencia, es por esto que para poder analizarlos, es conveniente normalizarlos dividiendo todos los puntos del eje horizontal para  $f_0$  en cada filtro, por lo tanto la frecuencia crítica de un gráfico normalizado es 1. Realizando esta división y graficando nuevamente la misma respuesta de frecuencia obtenemos la siguiente gráfica:

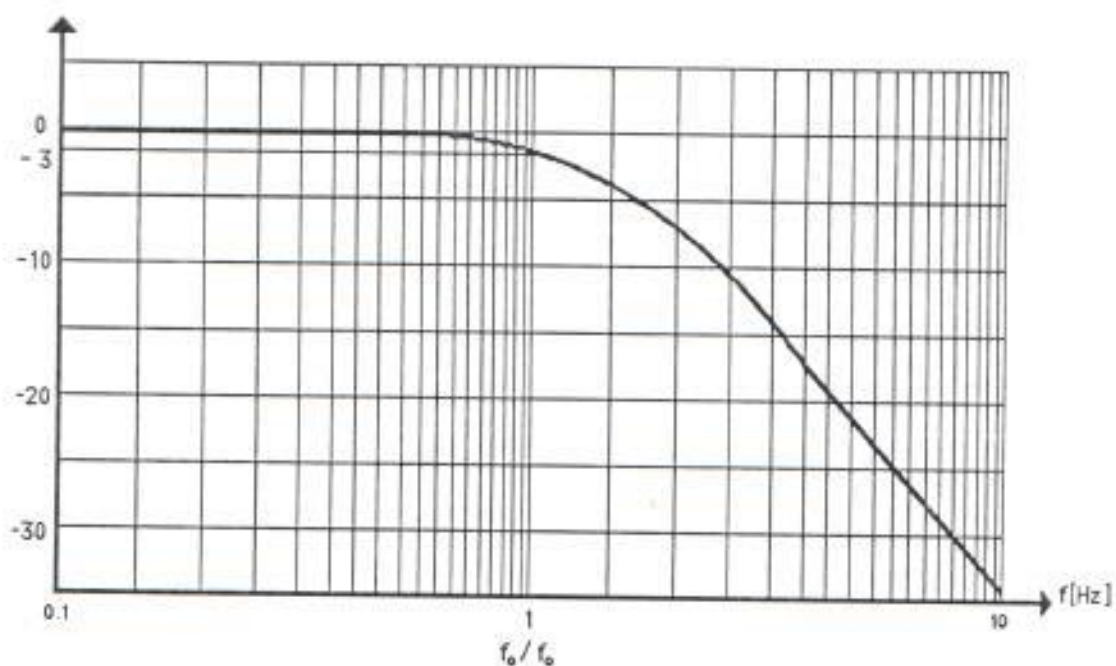


FIG. N° 5.- Respuesta de frecuencia normalizada

Con respecto a la fase , en un gráfico normalizado, en la frecuencia crítica  $f_0$ , tendrá un valor de un múltiplo de  $45^\circ$ , dependiendo del orden del filtro.

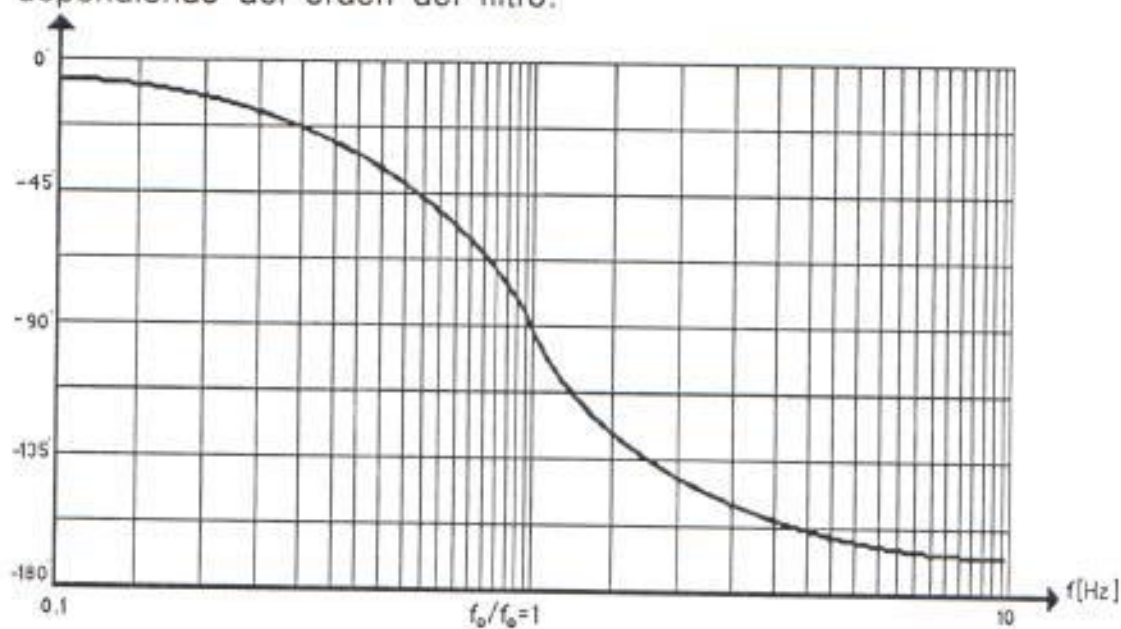


FIG. N° 6.- Respuesta de fase de un filtro pasa bajo típico

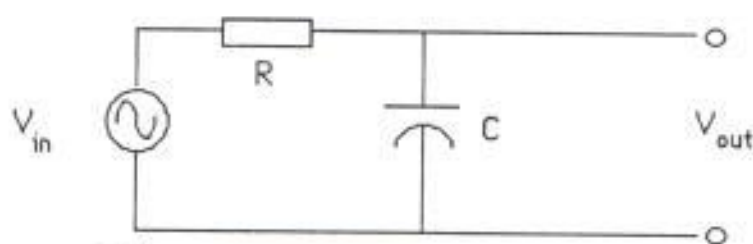
El hecho de tener graficadas ambas características en un mismo eje es conveniente además para permitirnos analizar si el diseño del filtro o de otro sistema es o no estable. El análisis de los circuitos que contienen varios componentes es mucho más sencillo si utilizamos la transformada de La Place, pues simplifica las ecuaciones que contienen integrales y derivadas, permitiéndonos así determinar rápidamente la función de transferencia de los circuitos, de tal manera que logramos obtener finalmente:

Función de transferencia = Real + j imaginaria

donde :  $|G|$  = magnitud =  $\sqrt{(\text{real})^2 + (\text{imaginaria})^2}$

$\phi$  = ángulo de fase =  $\text{arc tan}\left(\frac{\text{imaginaria}}{\text{real}}\right)$

Ejemplo :



$$i_c = C \frac{dV}{dt} \rightarrow I = CSV \rightarrow Z = V = \frac{1}{CS}$$

$$V_{out} = \frac{\frac{1}{SC}}{R + \frac{1}{SC}} V \rightarrow \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 + RCS}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{1}{1 + jwRC} \times \frac{1 - jwRC}{1 - jwRC} = \frac{1}{1 + w^2R^2C^2} - j \frac{wRC}{1 + w^2R^2C^2}$$

$$|G| = \frac{1}{\sqrt{1 + w^2R^2C^2}}$$

$$\phi = - \text{arc tan}(wRC)$$

FIG. N° 7.- Ejemplo de la utilización de la transf. de La Place

### 1.1.2.- CLASES DE FILTROS ACTIVOS SEGUN SU BANDA DE FRECUENCIA

Como habíamos anotado anteriormente existen cuatro clases bien diferenciadas de filtros, el filtro pasa bajo, pasa alto, pasa banda y el notch, los cuales los explicaremos poco a poco.

Filtro pasa bajo.- El propósito del filtro pasa bajo es permitir el paso de señales de baja frecuencia mientras detiene las señales de frecuencias altas. Idealmente su respuesta de frecuencia sería la siguiente:

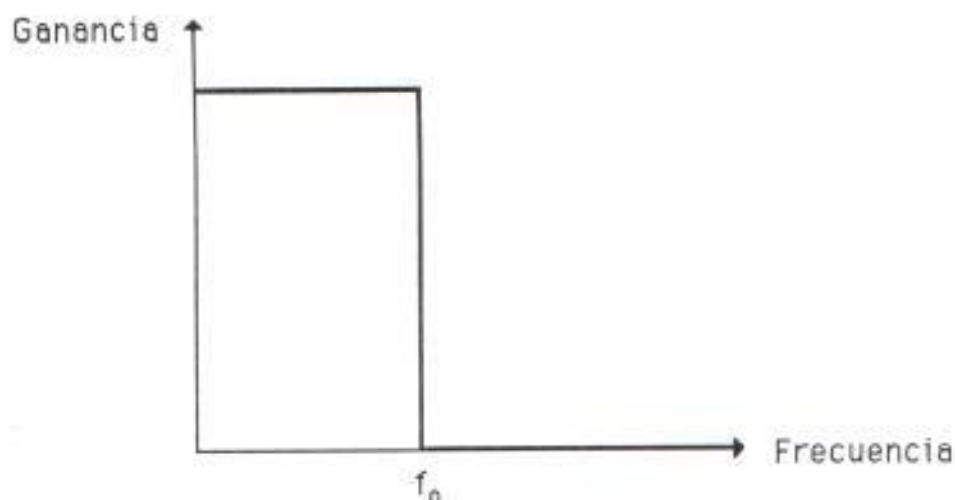


FIG. N° 8.- Filtro pasa bajo ideal

Todas las frecuencias menores a  $f_0$  pasarán por el filtro y las superiores a  $f_0$  serán detenidas. Por supuesto que un filtro de esas características ideales no puede ser construido, a continuación una gráfica más real de un filtro pasa bajo práctico.

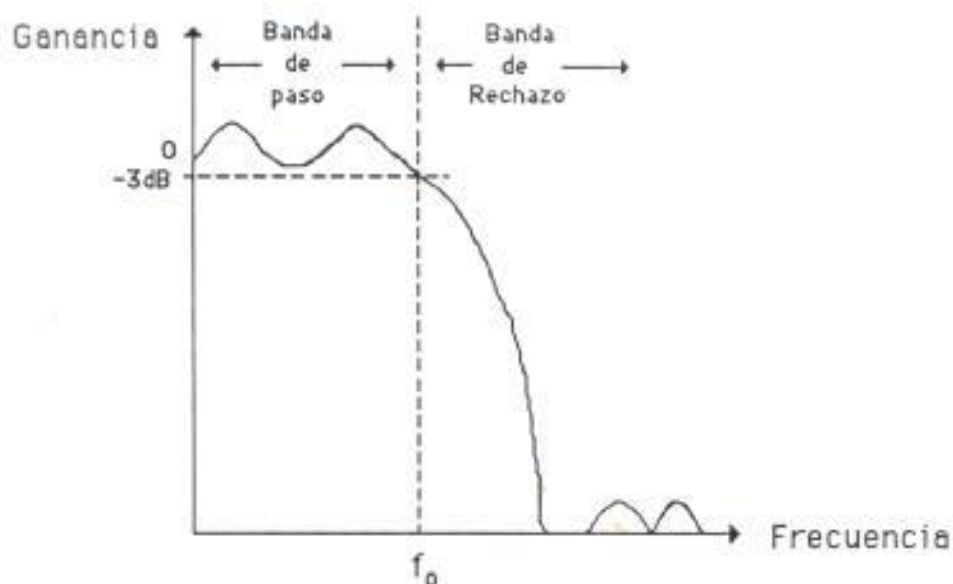


FIG. N° 9.- Filtro pasa bajo real

Como apreciamos la frecuencia crítica  $f_0$ , es la frontera entre la banda de paso y la banda de rechazo; para algunos filtros en la banda de paso la ganancia sufre pequeñas variaciones; la cantidad o tamaño de las variaciones (ripple) permitida es un parámetro muy importante que debe ser tomado en cuenta al diseñar un filtro. Cuan rápido la ganancia decrece al pasar de la banda de paso hacia la otra se conoce como roll off (pendiente), este parámetro determina el orden del filtro (1,2,3,.....), cada incremento es de 20 db/década. En el ejemplo en que trabajamos con la transformada de La Place, pudimos apreciar que el orden del circuito viene relacionado con el número de pares de resistencias y capacitores que existan en el circuito. Así que incrementando la complejidad del circuito incrementamos el orden de la ecuación de transferencia y la pendiente.



Filtro pasa alto.- Lo opuesto del filtro pasa bajo es el filtro pasa alto, es decir que las señales de bajas frecuencias y continuas DC (0 Hz) son bloqueadas y solo pasan las señales de frecuencias altas. La características y parámetros de importancia son los mismos que para el filtro pasa bajo.

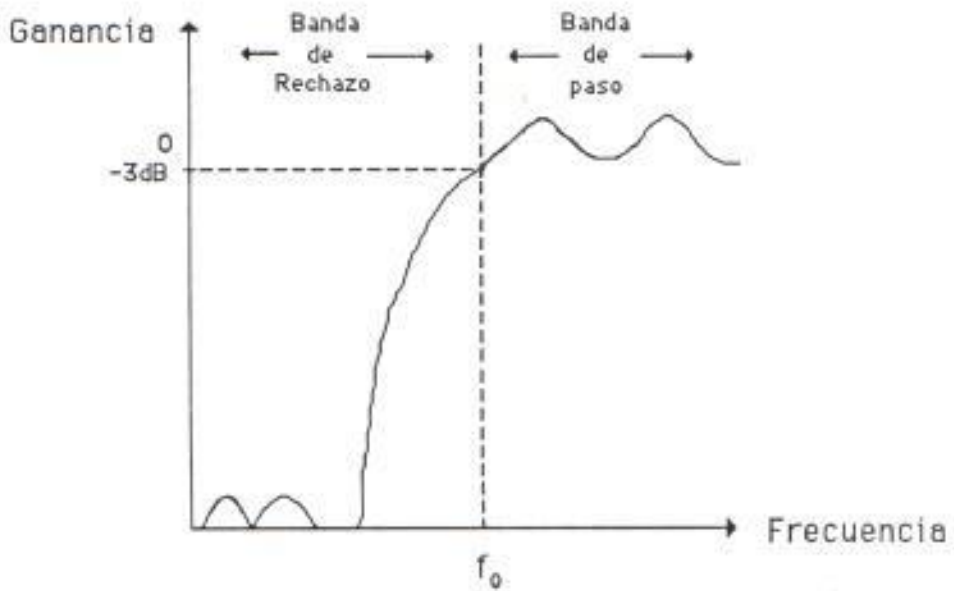


FIG. N<sup>o</sup> 10.- Filtro pasa alto real

Filtro pasa banda.- En este filtro solo pasan las señales de un rango de banda determinado. Las señales fuera de ese rango, ya sea de frecuencias mayores o menores al mismo son rechazadas o bloqueadas. Existen tres parámetros de frecuencia importantes; la frecuencia central ( $f_c$ ) y las frecuencias de corte o críticas  $f_L$  y  $f_H$  las cuales ocurren la ganancia disminuye en 3 dB del valor de la ganancia en la frecuencia central  $f_c$ .

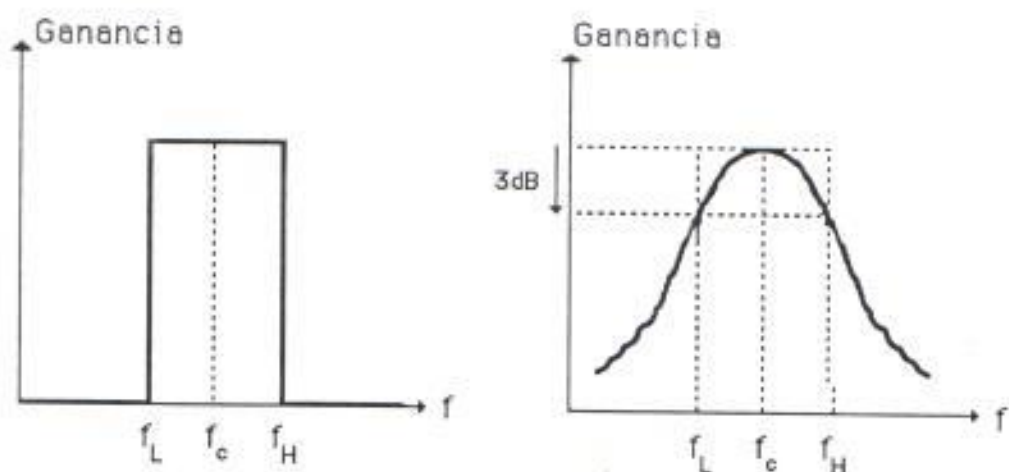


FIG. N° 11.- Filtro pasa banda

Otros factores de importancia son el ancho de banda, que es la distancia entre las frecuencias críticas de baja y alta frecuencia.

$$\Delta f = f_H - f_L$$

$$B = W_H - W_L$$

Y el factor Q, que es la razón entre la frecuencia central  $f_c$  y el ancho de banda.

$$Q = \frac{f_c}{\Delta f} = \frac{W_c}{B}$$

Esto nos da información acerca de cuan ancho o angosto es un filtro pasa banda o sea que a mayor Q, mayor selectividad en el filtro. Estos filtros son muy utilizados en circuitos de audio, comunicaciones, etc. Los equalizadores, los filtros de voz y sintonizadores de radio y televisión son filtros pasabanda.

Filtro notch.- Este es un complemento del filtro pasa banda. Este rechaza todas las señales en una banda de frecuencia determinada y deja pasar todo lo demás.

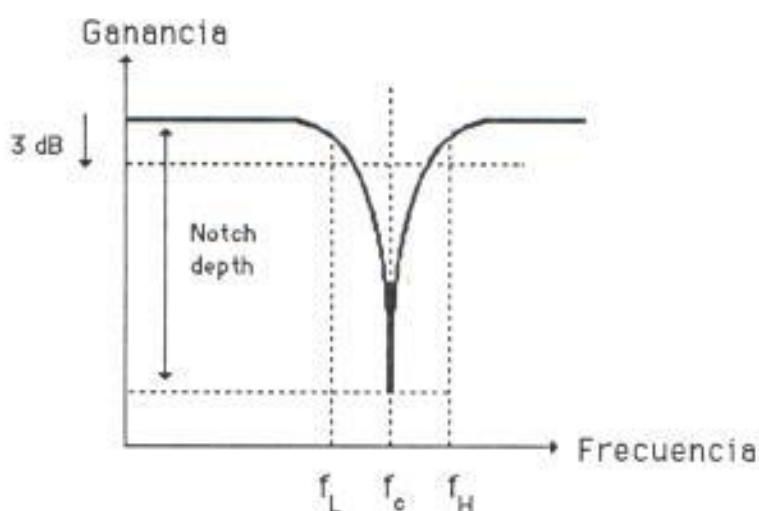


FIG. Nº 12.- Filtro notch

Aquí aparece otro parámetro que es el notch depth, el cual indica como será rechazada una señal en el frecuencia central. Estos filtros son utilizados para eliminar señales en frecuencias determinadas como en instrumentos sensitivos para eliminar el ruido en determinada frecuencia.

## 1.2.- AMPLIFICADORES OPERACIONALES

El amplificador operacional es un circuito electrónico que contiene dispositivos BJT y FET, usualmente empaquetados en circuitos integrados que proporcionan ganancia de corriente o

voltaje; también puede proporcionar ganancia de potencia o permitir la transformación de impedancias.

El amplificador operacional se ha convertido en una parte básica y esencial de prácticamente toda aplicación electrónica debido a su bajo costo y versatilidad.

En la actualidad es muy usado en varios campos como control de procesos, comunicaciones, computadores, fuentes de energía y de señales, sistemas de medición, monitoreo y pruebas, etc.

El amplificador operacional tiene cinco terminales básicos; dos para la fuente de alimentación, dos para las señales de entrada y uno para la señal de salida.

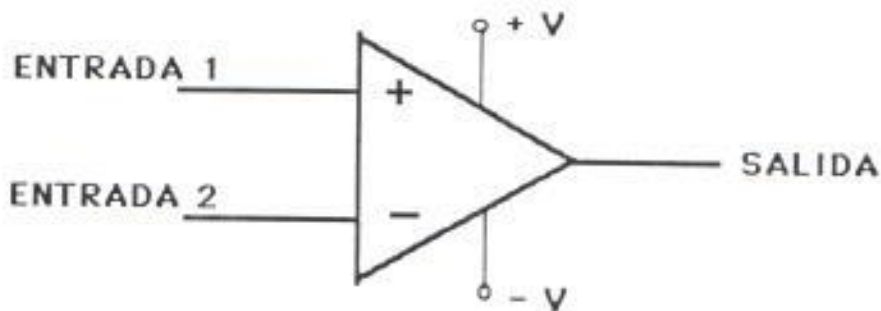


FIG. N° 13.- Amplificador operacional

Un amplificador operacional es un amplificador diferencial de alta ganancia que utiliza realimentación de voltaje para proporcionar una ganancia de voltaje estabilizada. El amplificador básico utilizado es esencialmente un amplificador diferencial que tiene una ganancia de bucla abierta muy alta (condición sin realimentación de señal) como también una alta impedancia de entrada y una baja impedancia de salida, factores importantísimos que deben ser considerados al momento de diseñar un filtro.

Siempre hablamos de condiciones ideales que en la práctica no se pueden lograr a la perfección, a continuación presentamos una tabla comparativa al respecto:

	<u>IDEAL</u>	<u>REAL</u>
Señal de salida sin carga	$V_o \rightarrow \infty$	$V_o \leq 3 \times 10^6$
Resistencia de entrada	$R_e \rightarrow \infty$	$R_e \leq 1 \text{ M}\Omega$
Resistencia de salida	$R_o \rightarrow 0$	$R_o \geq 10 \Omega$
Banda de frecuencia	$0 \dots \dots \infty$	$0 \dots \dots 100 \text{ MHz}$
Ganancia	$G \rightarrow \infty$	$G < 1 \times 10^6$

**TABLA N° 1.-** Características del amplificador operacional

Hay que tomar en cuenta que los valores límites para el caso real, solo son válidos en condiciones en las que el voltaje de entrada, la temperatura y las características propias del amplificador se mantengan fijas y dentro de los rangos de tolerancia permitidos.

Al realizar un diseño se debe tomar en cuenta la tabla de características del dispositivo que se va a utilizar, la cual es proporcionada por el proveedor.

Las entradas del amplificador se han marcado con más (+) y menos (-) para indicar las entradas que no invierten y que invierten respectivamente. Una señal aplicada a la entrada más (+) aparecerá con la misma polaridad y amplificada en la salida, mientras que una entrada aplicada al terminal menos (-) aparecerá amplificada pero invertida a la salida.

El amplificador inversor es uno de los más utilizados, revisemos el mismo a manera de ejemplo. Una señal de entrada  $V_i$  se aplica por medio de una resistencia  $R_1$  al terminal de entrada menos(-). El voltaje de salida es realimentado por medio de la resistencia  $R_f$  al mismo terminal de entrada y el terminal de entrada más (+) es conectado a tierra.

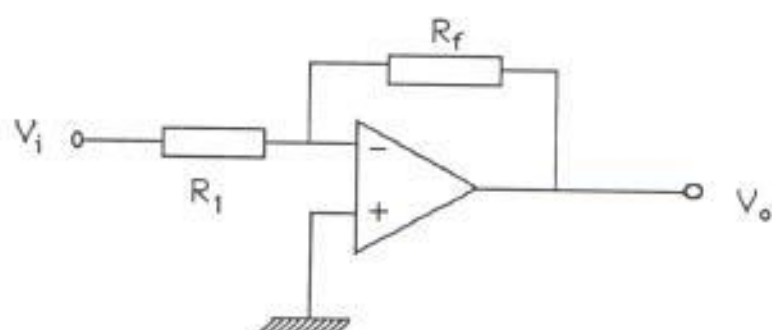


FIG. N° 14.- Circuito amplificador inversor

Para calcular la ganancia total del circuito ( $V_o/V_i$ ) tomamos en consideración que el terminal menos(-) y el terminal más(+) son un mismo punto y que por ellos no ingresa corriente al amplificador. Entonces tenemos que:

$$V_i - (R_i + R_f) I - V_o = 0$$

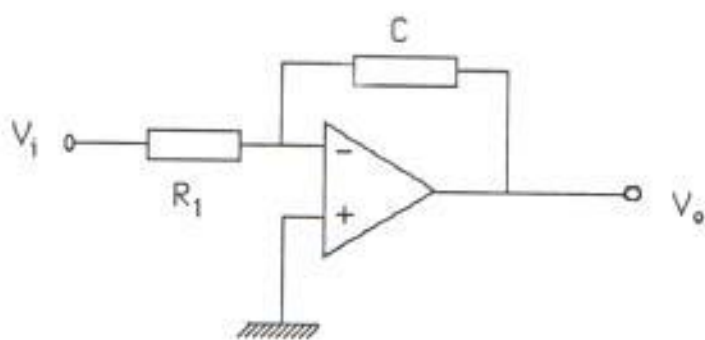
Donde  $I = \frac{V_i}{R_i}$

$$V_i - \frac{R_i V_i}{R_f} - \frac{R_f}{R_i} V_i - V_o = 0$$

$$\boxed{\frac{V_o}{V_i} = - \frac{R_f}{R_i}}$$

Los resultados muestran que la razón de voltaje de salida total al voltaje de entrada es dependiente solamente de los valores de resistencias  $R_1$  y  $R_f$ , así podemos obtener un amplio rango de ganancias tan precisas como lo sean las resistencias utilizadas y solamente la afectarán ligeramente la temperatura y otros factores circuitales.

Si utilizamos como componente de la realimentación un condensador en lugar de la resistencia, el circuito resultante es un amplificador integrador.



$$V_o = \int_0^t V_i dt$$

$$V_i - \left( R + \frac{1}{sC} \right) I - V_o = 0$$

$$\frac{V_o}{V_i} = \frac{-1}{sRC} = -\frac{1}{j\omega RC}$$

FIG. N° 15.- Circuito amplificador integrador

Reescribiéndolo en el dominio del tiempo tenemos:

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

Esta ecuación muestra que la salida es la integral de la entrada con una inversión y un multiplicador de escala de  $1/RC$ .

La habilidad para integrar una señal dada proporciona al computador análogo la posibilidad de resolver ecuaciones diferenciales y por consiguiente permitir simular una amplia variedad de circuitos eléctricos análogos a los sistemas físicos en su operación.



### 1.3.- FUNCIONES DE TRANSFERENCIA DE CIRCUITOS DE SEGUNDO ORDEN

La función de transferencia de un filtro de segundo orden tiene la siguiente forma general:

$$H(S) = \frac{MS^2 + CS + D}{S^2 + AS + B} \quad \text{donde } A, B > 0 \text{ siempre}$$

También conocida como función bicuadrática, la podemos reescribir de la siguiente forma:

$$H(S) = A_0 \frac{S^2 + \alpha \omega_0 S + \omega_0^2}{S^2 + \alpha \omega_0 S + \omega_0^2} ; \quad \alpha = \frac{A}{\sqrt{B}} \quad \text{y} \quad \omega_0 = \sqrt{B}$$

donde  $A_0$  = amplificación básica  
 $\alpha$  = coeficiente (damping)  
 $\omega_0$  = frecuencia de polo  
 $\omega_g$  = frecuencia de polo en filtros pasa bajo y pasa alto

a) Para un circuito de filtro pasa bajo la función de transferencia sería:

$$H(S) = \frac{D}{S^2 + AS + B}$$

$$H(S) = \frac{A_0 \omega_g^2}{S^2 + \frac{\omega_g}{Q} S + \omega_g^2} = \frac{A_0 \omega_g^2}{S^2 + \alpha \omega_g S + \omega_g^2}$$

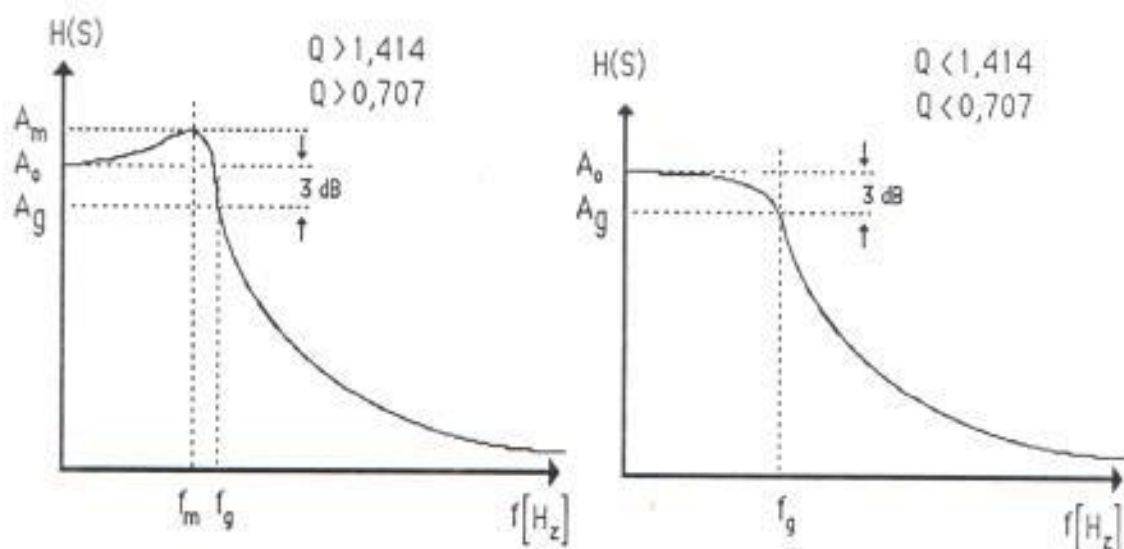


FIG. N° 16.- Respuesta de frecuencia del filtro pasa bajo

Veámoslo más claramente con un ejemplo. Un filtro pasa bajo de segundo orden consiste en dos pares de combinaciones RC y tiene una pendiente de 40 dB/década. En la frecuencia crítica  $f_0$  la fase es de 90 grados.

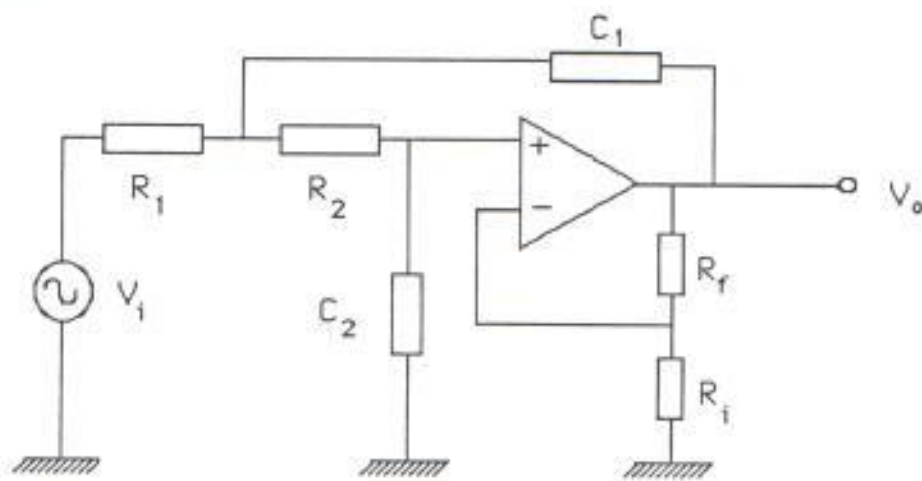


FIG. N° 17.- Circuito de filtro pasa bajo de segundo orden

Después del análisis respectivo obtendremos la siguiente ecuación:

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{\frac{A_o}{C_1 S \cdot C_2 S}}{R_1 R_2 + \frac{R_2}{C_1 S} + \frac{1}{C_1 S \cdot C_2 S} + \frac{R_1}{C_1 S} + \frac{R_1}{C_2 S} (1 - A_o)}$$

Resolviendo y agrupando coeficientes tenemos :

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{\frac{A_o}{C_1 C_2 S^2}}{\frac{R_1 R_2 C_1 C_2 S^2 + R_2 C_2 S + 1 + R_1 C_2 S + R_1 C_1 S (1 - A_o)}{C_1 C_2 S^2}}$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{A_o}{R_1 R_2 C_1 C_2 S^2 + [R_2 C_2 + R_1 C_2 + R_1 C_1 (1 - A_o)] S + 1}$$

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{\frac{A_o}{R_1 R_2 C_1 C_2}}{S^2 + \left[ \frac{R_2 C_2 + R_1 C_2 + R_1 C_1 (1 - A_o)}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right] S + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

Obteniendo una ecuación del tipo anotado :

$$H(S) = \frac{A_o / \omega_g^2}{S^2 + \frac{\omega_g}{Q} S + \omega_g^2}$$

de donde la ganancia es :

$$|G| = \frac{A_o}{\sqrt{(1 - \omega^2)^2 + \omega^2 / Q^2}}$$

y la relación de fase :

$$\phi = - \arctan \frac{\omega / Q}{1 - \omega^2}$$

El filtro de segundo orden depende tanto de la frecuencia de polo  $\omega_g$  como del coeficiente o factor  $Q$ , los cuales nos indican lo estable que es el circuito. Como apreciamos en el gráfico anterior para un factor  $Q > 0.707$  existe un rizado u ondulación en la respuesta de frecuencia, el cual desaparece cuando  $Q < 0.707$ .

b) Para un circuito pasa alto la función de transferencia será la siguiente:

$$H(S) = \frac{MS^2}{S^2 + AS + B}$$

$$H(S) = A_0 \frac{S^2}{S^2 + \frac{\omega_g}{Q} S + \omega_g^2}$$

y su gráfica, la que se muestra a continuación:

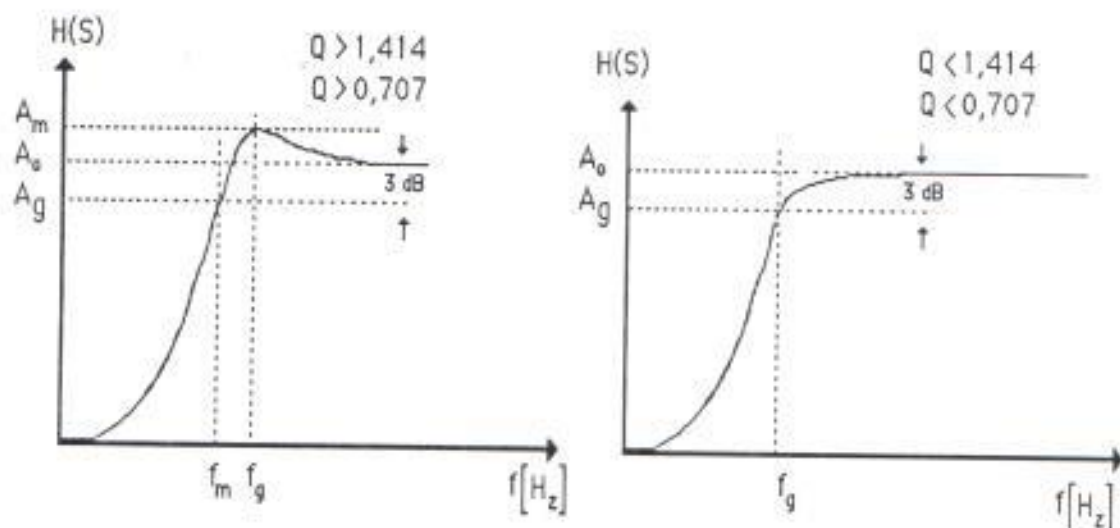


FIG. N° 18.- Respuesta de frecuencia del filtro pasa alto

Como ejemplo tenemos :

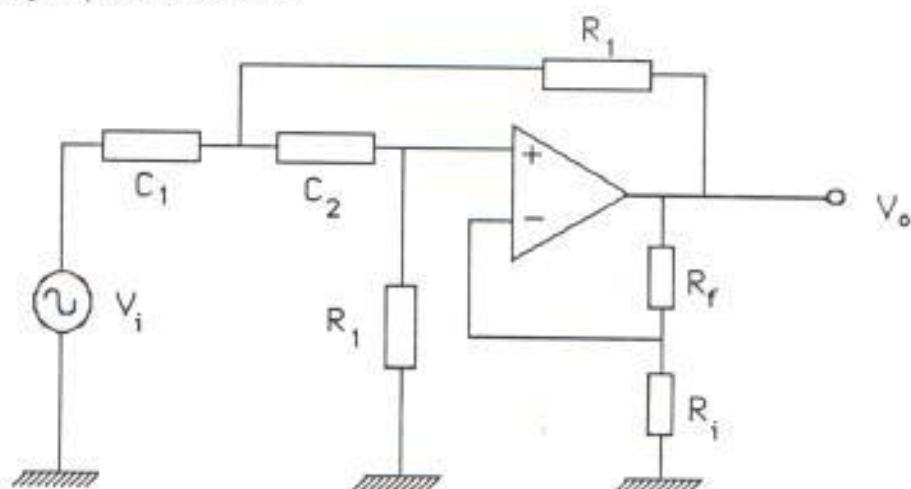


FIG. N° 19.- Circuito de filtro pasa alto de segundo orden

Luego de realizar la deducción correspondiente tenemos que

$$\frac{V_o}{V_{in}} = \frac{A_o S^2}{S^2 + \left[ \frac{R_1 C_1 + R_1 C_2 + R_2 C_2 (1 - A_o)}{R_1 R_2 C_1 C_2} \right] S + \frac{1}{R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

Como podemos apreciar la frecuencia crítica  $\omega_g$  es la misma que la del circuito de filtro pasa bajo, no sucediendo lo mismo con el factor Q. Así tenemos que para:

$$H(S) = \frac{A_o S^2}{S^2 + \frac{\omega_g}{Q} S + \omega_g^2}$$

de donde la ganancia es :

$$|G| = \frac{A_o \omega_g^2}{\sqrt{(1 - \omega_g^2)^2 + \omega_g^2 / Q^2}}$$

como vemos la ganancia es directamente proporcional al cuadrado de la frecuencia y la fase es igual que en el circuito del filtro pasa bajo.

$$\phi = - \text{arc tan } \frac{\omega_0/Q}{1 - \omega_0^2}$$

c) Para el filtro pasa banda tenemos que :

$$H(S) = \frac{-CS}{S^2 + AS + B}$$

$$H(S) = A_0 \frac{-\frac{\omega_c}{Q}S}{S^2 + \frac{\omega_c}{Q}S + \omega_0^2}$$

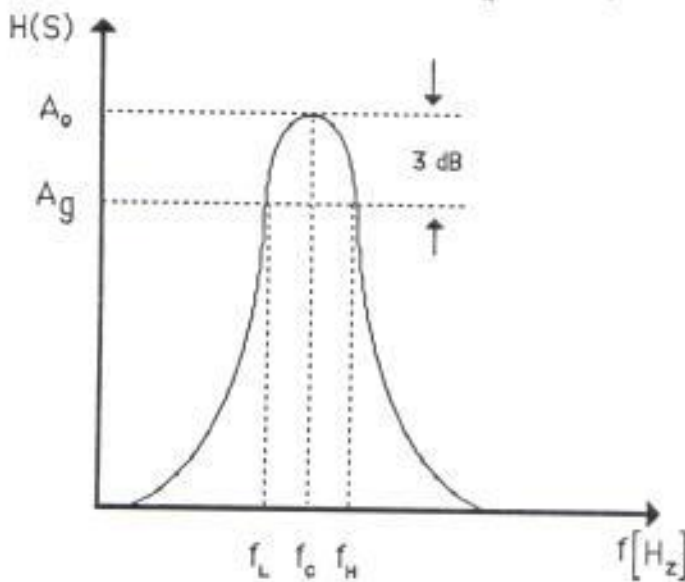


FIG. N° 20.- Respuesta de frecuencia del filtro pasa banda

Los parámetros de importancia en un filtro pasa banda son su baja y alta frecuencias de corte ( \$f\_h\$ y \$f\_l\$ ), el ancho de banda ( \$B\$ ó \$\Delta f\$ ), la frecuencia central ( \$f\_0\$ ó \$\omega\_0\$ ), la ganancia en la \$f\_0\$ ( \$A\_0\$ ) y la selectividad o factor \$Q\$.

$$\Delta f = f_H - f_L$$

en rad/seg  $B = W_H - W_L$

la frecuencia central es

$$f_c = \sqrt{f_H \cdot f_L}$$

$$W_c = \sqrt{W_H \cdot W_L}$$

La selectividad o factor Q es la razón de la frecuencia central para el ancho de banda.

$$Q = \frac{f_c}{\Delta f}$$

$$Q = \frac{W_c}{B}$$

Esta nos da una medida del nivel de selectividad del filtro, a menor Q, menor ancho de banda, esto significa que el filtro es más selectivo. Así tenemos que conociendo Q, podemos obtener :

$$f_L = f_c \left[ \sqrt{\frac{1}{4Q^2} + 1} - \frac{1}{2Q} \right]$$

$$f_H = f_c \left[ \sqrt{\frac{1}{4Q^2} + 1} + \frac{1}{2Q} \right] ; Q = 1/\alpha$$

Revisando el ejemplo y realizando las deducciones necesarias llegamos a determinar que :

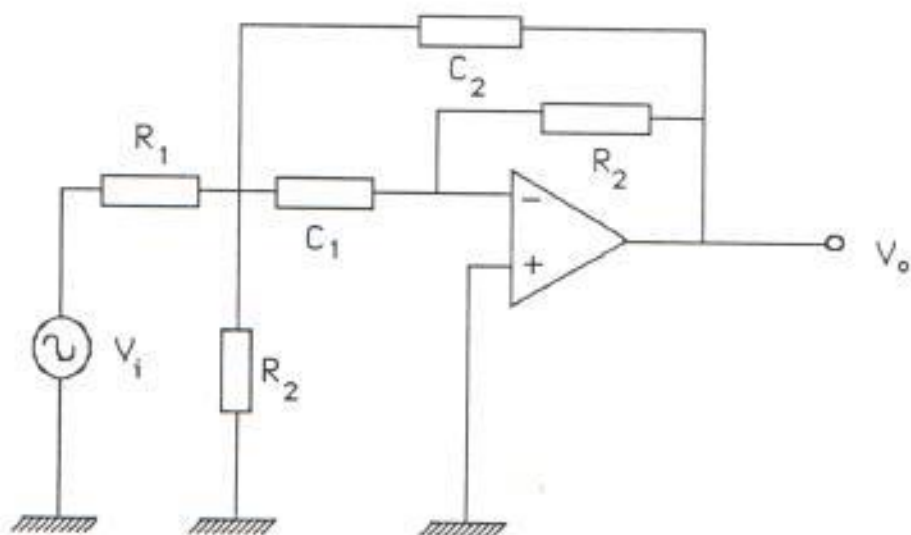


FIG. Nº 21.- Circuito del filtro pasa banda de segundo orden

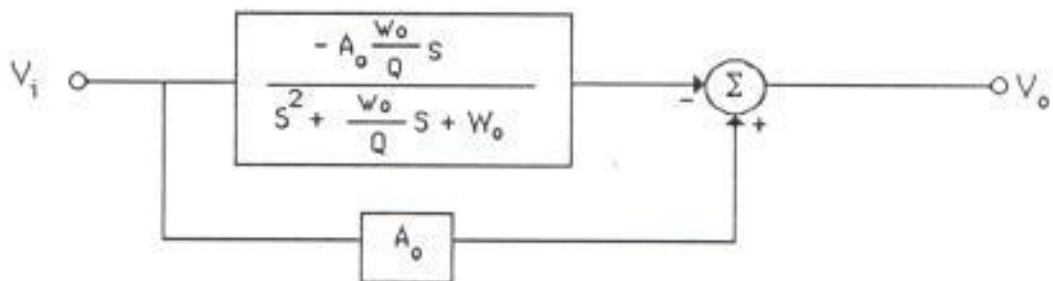
$$H(S) = \frac{\left(-\frac{1}{R_1 C}\right) S}{S^2 + \frac{2}{R_2 C} S + \frac{R_1 + R_3}{R_1 R_2 R_3 C^2}}$$

comparando con la ecuación general podemos calcular cada parámetro estudiado.

$$H(S) = \frac{-A_0 \frac{w_0}{Q} S}{S^2 + \frac{w_0}{Q} S + w_0^2}$$

d) La forma más sencilla de realizar un filtro notch es sustraer la salida de un filtro pasa banda de su entrada, tal como veremos a continuación :





Obteniendo :

$$H(S) = \frac{A_o (S^2 + w_o^2)}{S^2 + \frac{w_o}{Q} S + w_o^2}$$

O sea :

$$H(S) = \frac{M S^2 + D}{S^2 + A S + B}$$

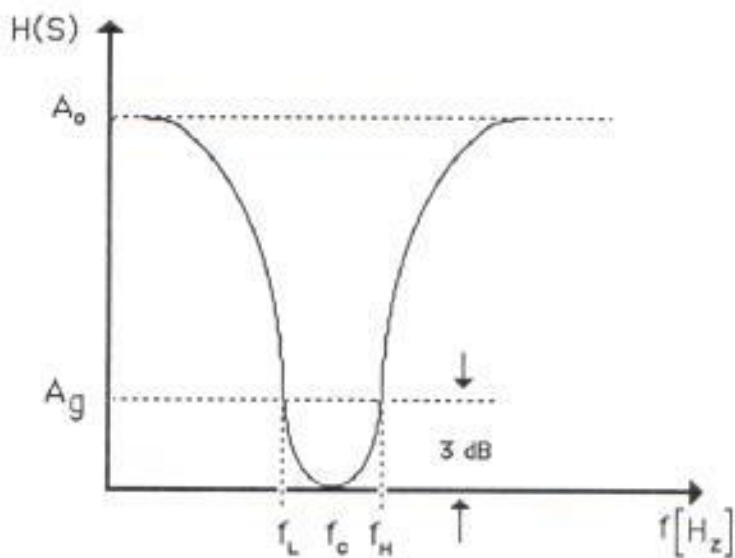


FIG. Nº 22.- Respuesta de frecuencia del filtro notch

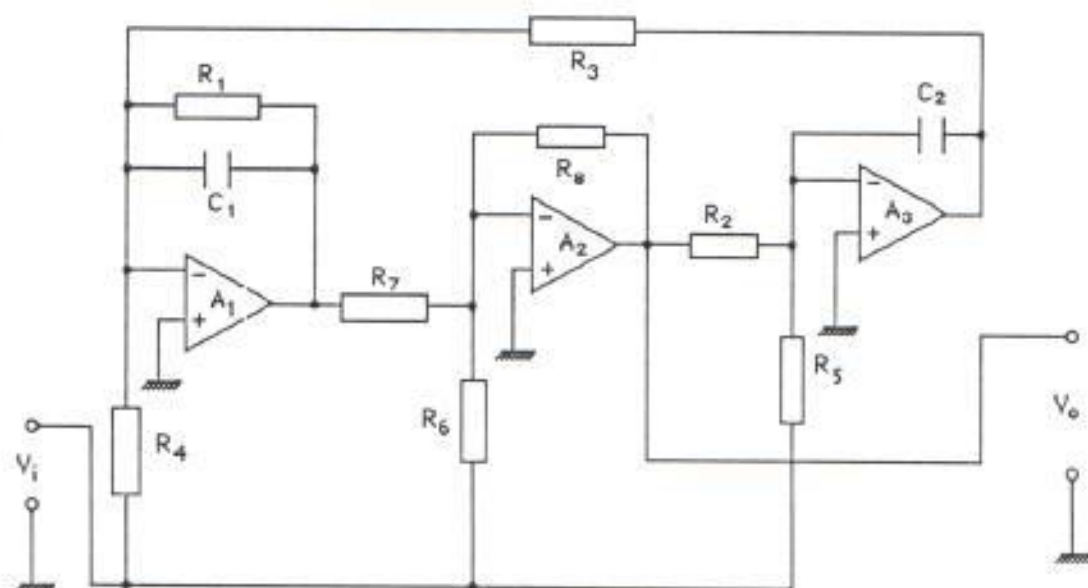
## **II . - DISEÑO DEL CIRCUITO ACTIVO UNIVERSAL**

En el capítulo anterior estudiamos brevemente las características de los elementos en que se basa nuestro circuito. En el presente capítulo revisaremos más detalladamente el circuito que vamos a implementar y los componentes que vamos a utilizar.

### **2.1.- CIRCUITOS DE FILTROS BICUADRATICOS**

Para obtener mayor información acerca de los circuitos de filtros bicuadráticos universales hemos consultado en la literatura correspondiente, encontrando lamentablemente que en la mayoría de los textos consultados los circuitos son muy similares entre ellos si es que no eran idénticos, por esta razón analizaremos a continuación únicamente dos de estos circuitos que son muy parecidos entre sí. Sobre ellos queremos demostrar el porque estos circuitos no son los más convenientes para nuestro

proyecto . Uno de los puntos fundamentales de este trabajo es que el circuito que se utilizará debe permitir que el ajuste o selección de los coeficientes de nuestra función bicuadrática sea realizado en forma individual e independiente, esto es que el cambio de uno de los coeficientes no altere a los otros.



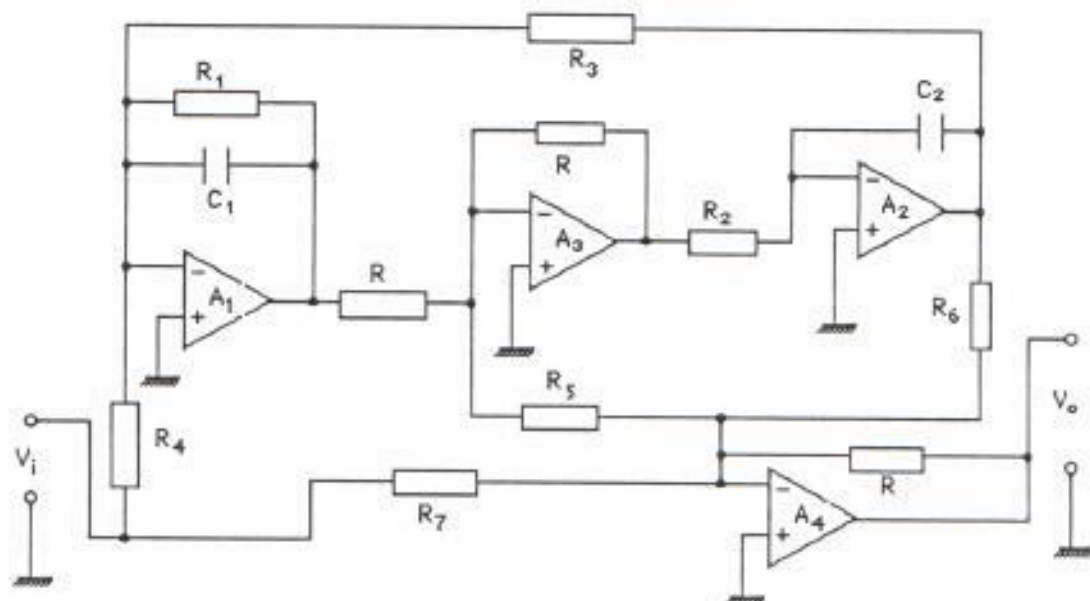
$$R_1 = \frac{1}{A C_1} \quad ; \quad R_2 = \frac{K_1}{\sqrt{B} C_2} \quad ; \quad R_3 = \frac{1}{K_1 K_2} \cdot \frac{1}{\sqrt{B} C_1}$$

$$R_4 = \frac{1}{K_2(MA-C)C_1} \quad ; \quad R_5 = \frac{K\sqrt{B}}{D C_2} \quad ; \quad R_6 = \frac{1}{M} R_8 \quad ; \quad R_7 = K_2 R_8$$

FIG. N° 23.- Ejemplo de circuito de filtro universal

Como podemos observar los coeficientes A y M son directamente proporcionales y ajustables a través de las resistencias R1 y R6 respectivamente, pero no sucede lo mismo con los otros coeficientes, ya que, por ejemplo el coeficiente B depende de dos resistencias R2 y R3.

A través de R4 se influencia la suma de M, A y C; y a través de R5 se alteran tanto el coeficiente B como D. Así vemos que para nuestro propósito, este circuito no es el necesario.



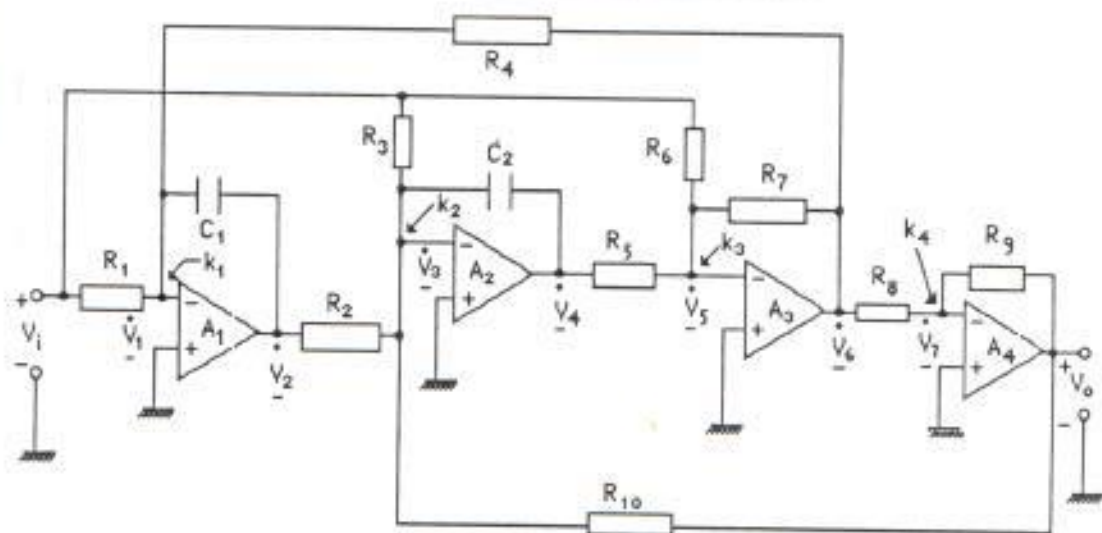
$$R_1 = \frac{1}{A C_1} ; \quad R_2 = \frac{K_1}{\sqrt{B} C_2} ; \quad R_3 = \frac{1}{K_1 \sqrt{B} C_1} ; \quad R_4 = \frac{1}{K_2 (MA - C) C_1}$$

$$R_5 = K_2 R ; \quad R_6 = \frac{K_2 MA - C}{K_1 MB - D} \sqrt{B} R ; \quad R_7 = \frac{1}{M} R$$

FIG. N° 24.- Ejemplo de circuito de filtro universal

También para este circuito observamos que los coeficientes no pueden ser relacionados independientemente al igual que en el circuito anterior. Por esta razón éste tampoco sirve para nuestros propósitos. A continuación veremos el circuito que vamos a utilizar, el cual nos permite realizar la no dependencia entre los coeficientes de nuestra función de transferencia.

## 2.2.- DERIVACION DE LA FUNCION DE TRANSFERENCIA



$$K_1 = K_2 = K_3 = K_4 = \text{nodos}$$

FIG. N° 25.- Circuito de filtro universal escogido

$$H(S) = \frac{V_i}{V_o}$$

$$\text{En } K_1 : \frac{V_i - \mathcal{X}_1^0}{R_1} = (\mathcal{X}_1^0 - V_2) \cdot S C_1 + \frac{\mathcal{X}_1^0 - V_6}{R_4}$$

$$\text{En } K_2 : \frac{V_2 - \mathcal{X}_3^0}{R_2} = \frac{\mathcal{X}_3^0 - V_o}{R_{10}} + \frac{\mathcal{X}_3^0 - V_i}{R_3} + (\mathcal{X}_3^0 - V_4) \cdot S C_2$$

$$\text{En } K_3 : \frac{V_4 - \mathcal{X}_5^0}{R_5} = \frac{V_5 - V_6}{R_7} + \frac{V_5 - V_i}{R_6}$$

$$\text{En } K_4 : \frac{V_6 - V_7}{R_8} = \frac{V_7 - V_o}{R_9}$$

$$\text{En } K_1 : \frac{V_i}{R_1} = -V_2 S C_1 - \frac{V_6}{R_4} \quad \text{ya que } V_1 \rightarrow 0$$

$$\text{En } K_2 : \frac{V_2}{R_2} = -\frac{V_o}{R_{10}} - \frac{V_i}{R_3} - V_4 S C_2 \quad \text{ya que } V_3 \rightarrow 0$$

$$\text{En } K_3 : \frac{V_4}{R_5} = - \frac{V_6}{R_7} - \frac{V_i}{R_6} \quad \text{ya que } V_5 \rightarrow 0$$

$$\text{En } K_4 : \frac{V_6}{R_8} = \frac{V_o}{R_9} \quad \text{despejando } V_6 = - \frac{V_o R_8}{R_9}$$

Reemplazando  $K_2$  en  $K_1$  y obtenemos la ecuación  $K_5$

$$K_5 : \frac{V_i}{R_1} = - S C_1 \left[ \left( - \frac{V_o}{R_{10}} - \frac{V_i}{R_3} - V_4 S C_2 \right) R_2 \right] - \frac{V_6}{R_4}$$

Con  $K_4$  en  $K_3$  y despejando  $V_4$  tenemos:

$$V_4 = \frac{V_o R_8 R_5}{R_9 R_7} - \frac{V_i R_5}{R_6}$$

Con  $V_4$  y  $V_6$  en el nodo o ecuación  $K_5$ , tenemos:

$$K_5 : \frac{V_i}{R_1} = - S C_1 \left[ \left( - \frac{V_o}{R_{10}} - \frac{V_i}{R_3} - \left( \frac{V_o R_8 R_5}{R_9 R_7} - \frac{V_i R_5}{R_6} \right) S C_2 \right) R_2 \right] + \frac{V_o R_8}{R_9 R_4}$$

$$\frac{V_i}{R_1} = - S C_1 \left[ - \frac{V_o R_2}{R_{10}} - \frac{V_i R_2}{R_3} - \left( \frac{V_o R_8 R_5}{R_9 R_7} - \frac{V_i R_5}{R_6} \right) S C_2 R_2 \right] + \frac{V_o R_8}{R_9 R_4}$$

$$\frac{V_i}{R_1} = - S C_1 \left[ - \frac{V_o R_2}{R_{10}} - \frac{V_i R_2}{R_3} - \frac{V_o R_8 R_5 S C_2 R_2}{R_9 R_7} - \frac{V_i R_5 S C_2 R_2}{R_6} \right] + \frac{V_o R_8}{R_9 R_4}$$

$$\frac{V_i}{R_1} = \frac{V_o R_2 S C_1}{R_{10}} + \frac{V_i R_2 S C_1}{R_3} + \frac{V_o R_8 R_5 S^2 C_2 R_2 C_1}{R_9 R_7} - \frac{V_i R_5 S^2 C_2 R_2 C_1}{R_6} + \frac{V_o R_8}{R_9 R_4}$$

$$V_i \left[ \frac{R_5 C_2 R_2 C_1}{R_6} S^2 - \frac{R_2 C_1}{R_3} S + \frac{1}{R_1} \right] = V_o \left[ \frac{R_8 R_5 C_2 R_2 C_1}{R_9 R_7} S^2 + \frac{R_2 C_1}{R_{10}} S + \frac{R_8}{R_9 R_4} \right]$$

$$H(S) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{R_5 C_2 R_2 C_1}{R_6} S^2 - \frac{R_2 C_1}{R_3} S + \frac{1}{R_1}}{\frac{R_8 R_5 C_2 R_2 C_1}{R_9 R_7} S^2 + \frac{R_2 C_1}{R_{10}} S + \frac{R_8}{R_9 R_4}}$$

Despejando  $S^2$  en el denominador tenemos :

$$H(S) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{\frac{R_9 R_7}{R_8 R_6} S^2 - \frac{R_9 R_7}{R_8 R_3 R_5 C_2} S + \frac{R_9 R_7}{R_8 R_1 R_5 C_2 R_2 C_1}}{S^2 + \frac{R_9 R_7}{R_8 R_5 C_2 R_{10}} S + \frac{R_7}{R_4 R_5 C_2 R_2 C_1}}$$

Comparando esta ecuación con la ecuación general :

$$H(S) = \frac{V_o}{V_i} = \frac{M S^2 + C S + D}{S^2 + A S + B}$$

obtenemos las ecuaciones de cada coeficiente, así tenemos que:

$$M = \frac{1}{R_6} \cdot \frac{R_9 R_7}{R_8}$$

$$A = \frac{1}{R_{10}} \cdot \frac{R_9 R_7}{R_8 R_5 C_2}$$

$$B = \frac{1}{R_4} \cdot \frac{R_7}{R_5 C_2 R_2 C_1}$$

$$C = \frac{1}{R_3} \cdot \frac{R_9 R_7}{R_8 R_5 C_2}$$

$$D = \frac{1}{R_1} \cdot \frac{R_9 R_7}{R_8 R_5 C_2 R_2 C_1}$$

Así tenemos que cada coeficiente depende de solo un elemento, manteniendo los demás componentes de la ecuación constantes, así podemos fijar individualmente cada uno de los coeficientes independizándolos unos de otros.

Para calcular la ecuación de transferencia y por consiguiente sus coeficientes podemos utilizar la siguiente tabla:

Filtro pasa bajo	→	$M = C = 0$
Filtro pasa alto	→	$C = D = 0$
Filtro pasa banda	→	$M = D = 0$
Filtro notch	→	$M > 0 ; C = 0 ; D > 0$

**TABLA N° 2.-** Relación entre los filtros y sus coeficientes

Tomando los circuitos que usamos de ejemplos al explicar cada filtro podemos demostrar cada una de estas afirmaciones.

### 2.3.- CONVERTIDORES DIGITAL-ANALOGICO

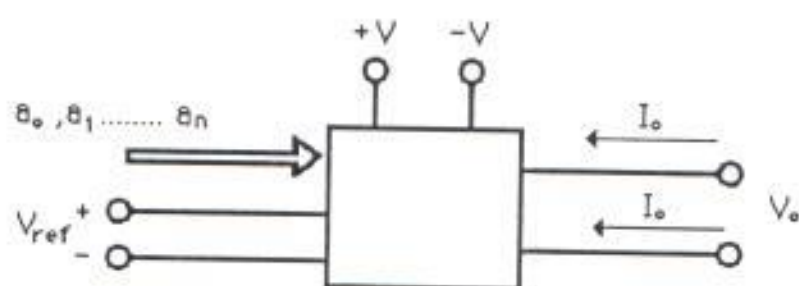
Como nos damos cuenta en la función de transferencia los coeficientes son variables, y logramos variarlos al variar las resistencias de las cuales depende cada uno de ellos.

Ya que los coeficientes mencionados no deben ser solamente variables, sino que también sus posibilidades de variación deben ser reproducibles, hemos escogido una combinación de circuito codificador con un convertidor digital analógico.



Analicemos brevemente el proceso de conversión digital analógico; básicamente es el proceso de tomar un valor representado en el código digital en la entrada y convertirlo a un voltaje o una corriente en la salida, el cual será proporcional al valor digital de entrada.

En la entrada de un convertidor digital analógico D/A, se mezclan una palabra digital y un voltaje de referencia para controlar la salida. Para la mayoría de los convertidores D/A comunes, la palabra digital de entrada va a estar en cualquier código binario o BCD (Binary coded decimal). La salida del convertidor D/A puede ser dada como una corriente de salida o como un voltaje de salida, dependiendo del diseño del convertidor y de los requerimientos del usuario.



$I_o$  = corriente de salida  
 $V_o$  = voltaje de salida  
 $V_{ref}$  = voltaje de referencia  
 $\theta_0, \theta_1, \dots, \theta_n$  = palabra de entrada de n-bits

FIG. N° 26.- Diagrama de bloque de un convertidor D/A

Todo convertidor digital analógico básicamente se compone de una interfase digital la cual se encarga de convertir las entradas digitales en niveles de voltaje o corriente apropiados para manejar un conjunto de interruptores electrónicos que forman la red de conmutación, los cuales, generalmente son transistores bipolares o unipolares (FET), estos interruptores conmutados por las señales digitales mandan a la entrada de la red de precisión las señales de referencia fijos. La red de precisión está formada por las resistencias. Por la manera de conectar las resistencias en esta red podemos dividir a los convertidores digitales analógicos en dos grupos:

- convertidores D/A con resistencias ponderadas
- convertidores D/A con escalera R-2R.

Para el primer caso consideremos el siguiente ejemplo:

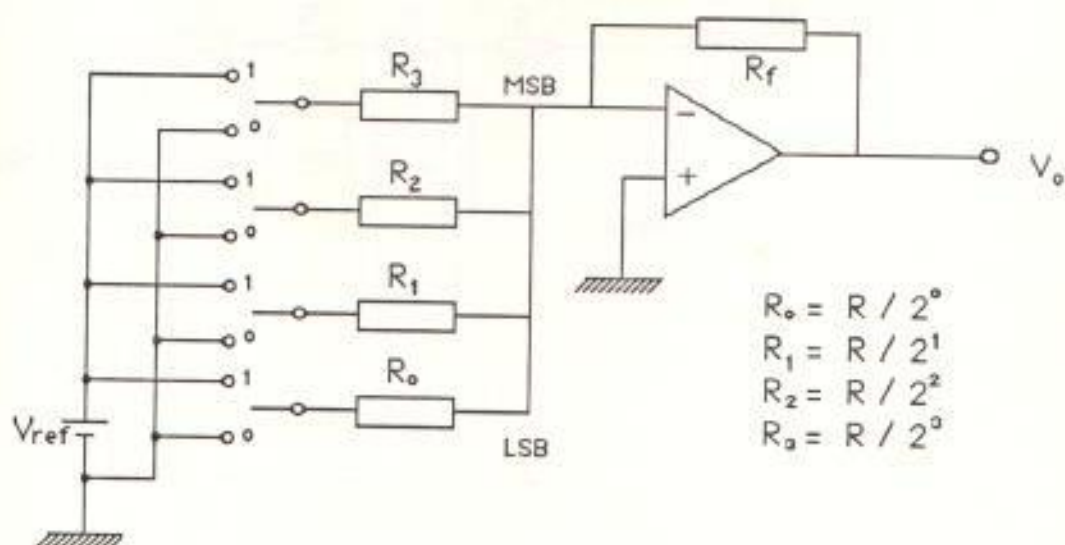


FIG. N° 27.- Convertidor D/A con resistencias ponderadas

Es un convertidor D/A con resistencias ponderadas. La entrada digital de 4 bits maneja los interruptores  $S_0, S_1, S_2, S_3$ . Cuando la entrada digital corresponde a un uno lógico el interruptor pasa en posición 1, conectando la entrada correspondiente de la red de precisión a  $V_{ref}$  y cuando es un cero lógico se conecta a tierra. Las resistencias de la red de precisión  $R_0, R_1, R_2, R_3$  están ponderadas de modo que sus resistencias son inversamente proporcionales al peso del dígito binario correspondiente.

Ya que el amplio rango de valores de los resistores que deben ser utilizados es difícil de producir en forma de circuito integrado con la precisión requerida en un amplio rango de temperatura se utiliza mucho más el convertidor con escalera  $R-2R$ . El siguiente gráfico representa a un convertidor básico con escalera  $R-2R$ :

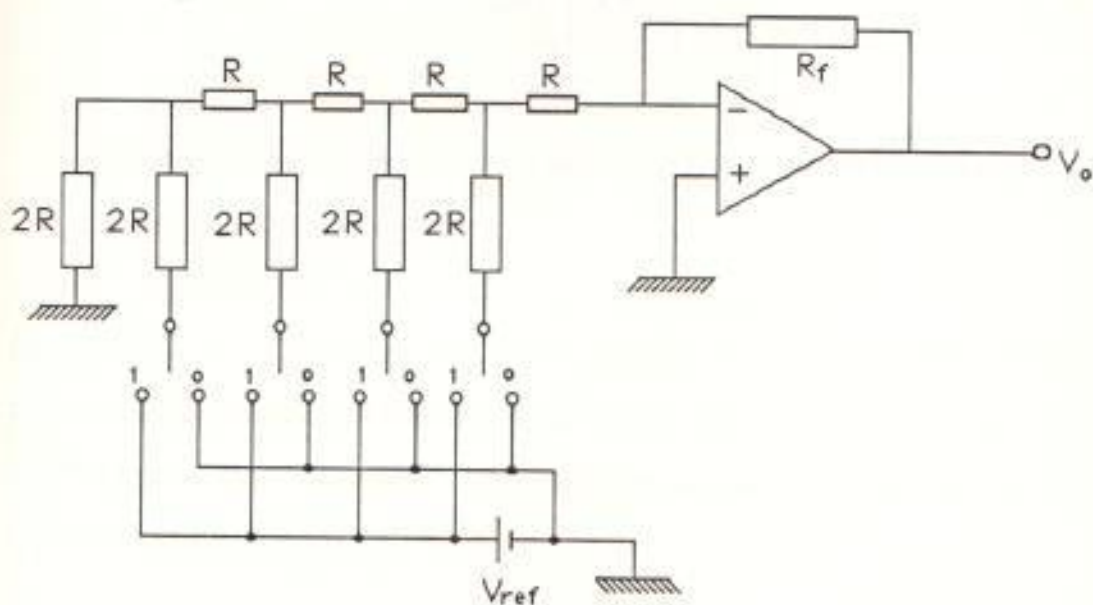


FIG. N° 28.- Convertidor D/A con escalera  $R-2R$

Este utiliza resistencias de dos valores solamente. Observemos que este sistema requiere del doble de resistencias para el mismo número de bits de entrada que en el convertidor de resistencias ponderadas.

Para explicar más sencillamente su operación consideremos que  $S_0=1$  y los otros son iguales a cero. Aplicando el teorema Thevenin tenemos una fuente de voltaje  $V_{ref}/2$  en serie con la resistencia  $R$ .

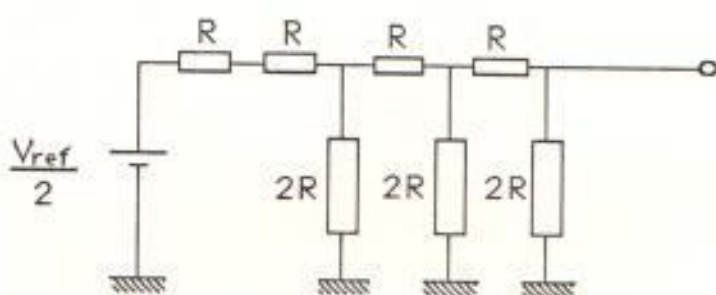


FIG. N° 29.- Convertidor D/A reducido (teorema de Thevenin)

Repitiendo la aplicación del teorema de Thevenin vemos que en cada una de tales aplicaciones la fuente de voltaje es nuevamente dividida por dos, mientras que la resistencia equivalente Thevenin permanece constante en  $R$ .

Ahora consideremos la principal característica que sirve para describir la calidad de funcionamiento de un convertidor D/A, ésta se llama resolución, y se define como el cambio más pequeño de voltaje que puede ser producido a la salida del convertidor como resultado de un cambio en la entrada.

También denominada tamaño de paso, por ser la cantidad de voltaje que cambiará a medida que el código digital de entrada va de un paso al siguiente :

$$A = 2^n \quad \begin{array}{l} A : \text{pasos o escalones} \\ n : \text{\# de bits} \end{array}$$

$$\text{Resolución} = \frac{V_o}{2^n}$$

En un convertidor D/A de 10 bits de entrada tenemos 1024 pasos o escalones. No solamente tensiones se pueden regular sino también se lo puede utilizar como resistencias variables.

Normalmente se lo utilizan con entradas digitales pero también podemos utilizar entradas en código BCD, que para nuestro caso será lo más apropiado.

## 2.4.- CALCULOS DE LAS CLASES DE FILTROS

a) Filtro Pasa bajo . -

La forma general de un filtro pasa bajo es la siguiente :

$$H(S) = \frac{D}{S^2 + AS + B} ; \quad H(S) = \frac{A_0 \omega_g^2}{S^2 + \frac{\omega_g}{Q} S + \omega_g^2}$$

donde :  $D = A_0 \omega_0^2 = A_0 \frac{\omega_g^2}{b_1}$

$$A = \frac{\omega_0}{Q} = \frac{a_1 \omega_g}{b_1}$$

$$B = \omega_0^2 = \frac{\omega_g^2}{b_1}$$

Tipo de filtro	orden	$a_1$	$b_1$
0.5 dB Tschebyscheff	2	1,3614	1,3827
1 dB Tschebyscheff	2	1,3022	1,5515
2 dB Tschebyscheff	2	1,1813	1,7775
3 dB Tschebyscheff	2	1,0650	1,9305
Bessel	2	1,3617	0,6180
Butterworth	2	1,4142	1,0000

**TABLA Nº 3.-** Coeficientes de compensación  $a_1$  y  $b_1$

De acuerdo a la función de transferencia tenemos que :

$$D = \frac{R_7 R_9}{R_1 R_2 R_5 C_1 C_2 R_8}$$

$$A = \frac{R_7 R_9}{R_5 R_8 R_{10} R_2}$$

$$B = \frac{R_7}{R_2 R_4 R_5 C_1 C_2}$$

Si tenemos que :

$$R_5 = R_2 = R ; C_1 = C_2 = C ; Z = R C ; \omega_g = 2\pi f_g$$

Reemplazamos en las ecuaciones antes anotadas y obtenemos lo siguiente :

$$\omega_g^2 = \frac{R_7}{R_4 Z^2} = B$$

$$\omega_g = \sqrt{\frac{R_7}{R_4}} \cdot \frac{1}{Z} = \sqrt{B}$$

$$Q = \frac{R_{10} Z R_8}{R_7 R_9} \cdot \sqrt{\frac{R_7}{R_4}} \cdot \frac{1}{Z}$$

$$Q = \frac{R_{10} R_8}{R_9} \cdot \sqrt{\frac{1}{R_4 R_7}} = \frac{\sqrt{B}}{A}$$

$$A_0 \omega_g^2 = \frac{R_7 R_9}{Z^2 R_1 R_8}$$

$$A_0 = \frac{R_7 R_9}{Z^2 R_1 R_8} \cdot \frac{1}{\omega_g^2} = \frac{\cancel{R_7} R_9}{\cancel{Z^2} R_1 R_8} \cdot \frac{\cancel{Z} R_4}{\cancel{R_7}}$$

$$A_0 = \frac{R_4 R_9}{R_1 R_8} = \frac{D}{B}$$

b) Filtro Pasa alto

La forma general del filtro pasa alto es la siguiente :

$$H(S) = \frac{MS^2}{S^2 + AS + B} \quad H(S) = A_0 \frac{S^2}{S^2 + \frac{W_g}{Q}S + W_g^2}$$

donde  $M = A_0$  ;  $A = \frac{W_g}{Q}$  y  $B = W_g^2$

De acuerdo con la función de transferencia tenemos que :

$$M = \frac{R_7 R_9}{R_6 R_8}$$

$$A = \frac{R_7 R_9}{R_5 R_8 R_{10} C_2}$$

$$B = \frac{R_7}{R_2 R_4 R_5 C_1 C_2}$$

Si tenemos que :

$$R_5 = R_2 = R \quad ; \quad C_1 = C_2 = C \quad ; \quad Z = RC \quad ; \quad W_g = 2\pi f_g$$

Reemplazamos en las ecuaciones antes anotadas y obtenemos lo siguiente :

$$W_g^2 = \frac{R_7}{R_4 Z^2} = B$$

$$W_g = \sqrt{\frac{R_7}{R_4}} \cdot \frac{1}{Z} = \sqrt{B}$$



$$Q = \frac{R_{10} Z R_8}{R_7 R_9} \cdot \sqrt{\frac{R_7}{R_4}} \cdot \frac{1}{Z}$$

$$Q = \frac{R_{10} R_8}{R_9} \cdot \sqrt{\frac{1}{R_4 R_7}} = \frac{\sqrt{B}}{A}$$

$$A = \frac{R_7 R_9}{R_6 R_8} = M$$

c) Filtro Pasa banda

La forma general del filtro pasa alto es la siguiente :

$$H(S) = \frac{-CS}{S^2 + AS + B} \quad H(S) = \frac{-\frac{A_0 W_0}{Q} S}{S^2 + \frac{W_0}{Q} S + W_0^2}$$

donde  $C = -\frac{A_0 W_0}{Q}$  ;  $A = \frac{W_0}{Q}$  ;  $B = W_0^2$

De acuerdo con la función de transferencia tenemos que :

$$C = \frac{R_7 R_9}{R_5 R_8 R_3 C_2}$$

$$A = \frac{R_7 R_9}{R_5 R_8 R_{10} C_2}$$

$$B = \frac{R_7}{R_2 R_4 R_5 C_1 C_2}$$

Si tenemos que :

$$R_5 = R_2 = R \quad ; \quad C_1 = C_2 = C \quad ; \quad Z = RC$$

$$\omega_0 = 2\pi f_0 \quad ; \quad B_{3dB} = f_{g0} - f_{gu}$$

Reemplazamos en las ecuaciones antes anotadas y obtenemos lo siguiente :

$$\omega_0^2 = \frac{R_7}{R_4 Z^2} = B$$

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{R_7}{R_4}} \cdot \frac{1}{Z} = \sqrt{B}$$

$$Q = \frac{R_{10} Z R_8}{R_7 R_9} \cdot \sqrt{\frac{R_7}{R_4}} \cdot \frac{1}{Z}$$

$$Q = \frac{R_{10} R_8}{R_9} \cdot \sqrt{\frac{1}{R_4 R_7}} = \frac{\sqrt{B}}{A}$$

$$C = \frac{A \omega_0}{Q} = \frac{R_7 R_9}{R_8 R_3 Z}$$

$$A_0 = \frac{R_7 R_9}{R_3 R_8 Z} \cdot \frac{R_{10} Z R_8}{R_7 R_9} = \frac{R_{10}}{R_3} = \frac{C}{A}$$

## 2.5.- CARACTERISTICAS DE LOS ELEMENTOS UTILIZADOS Y SU JUSTIFICACION TECNICA

Durante los puntos tratados en el capítulo anterior y en el presente capítulo hemos mencionado los componentes que forman nuestro circuito entre los cuales tenemos como elemento fundamental los amplificadores operacionales, y en segundo lugar en importancia los convertidores digitales analógicos, estos dos elementos son la base de nuestro proyecto que conjuntamente con resistencias y capacitores forman el circuito en mención.

Como amplificador operacional utilizamos el op-amp 741 en un circuito integrado de configuración TBA 221A, el cual mostramos a continuación:

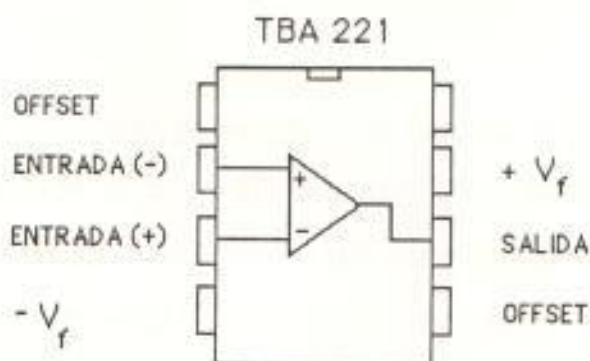


FIG. N° 30.- Amplificador operacional TBA 221A

Este amplificador fue escogido en base a sus características, las cuales adjuntamos al final, y debido a su bajo costo lo cual también es un factor importante a considerar.

Para mantener una facilidad y sencillez al escoger los coeficientes de la función de transferencia utilizamos un interruptor codificado de salida BCD de cuatro bits, el cual nos permite reproducir los valores utilizados en el diseño del filtro determinado.

Como la salida de este interruptor es BCD utilizamos como convertidor digital analógico uno cuya entrada tenga la misma codificación. Para esto escogimos el convertidor D/A AD7525 el cual es un CMOS de 3 1/2 dígitos BCD que cumple funciones de ser un potenciómetro digitalmente controlado.

Adicionando un opamp externo, la salida puede ser digitalmente controlado desde 0 a  $1.999 V_{in}$  con una resolución de  $0.001 V_{in}$ . Más características técnicas adjuntamos al final. En el interior del AD 7525 se encuentran tres convertidores D/A de cuatro (4) bits cada uno y un divisor de corriente. En el pin de salida se produce la suma de las corrientes de todos los convertidores.

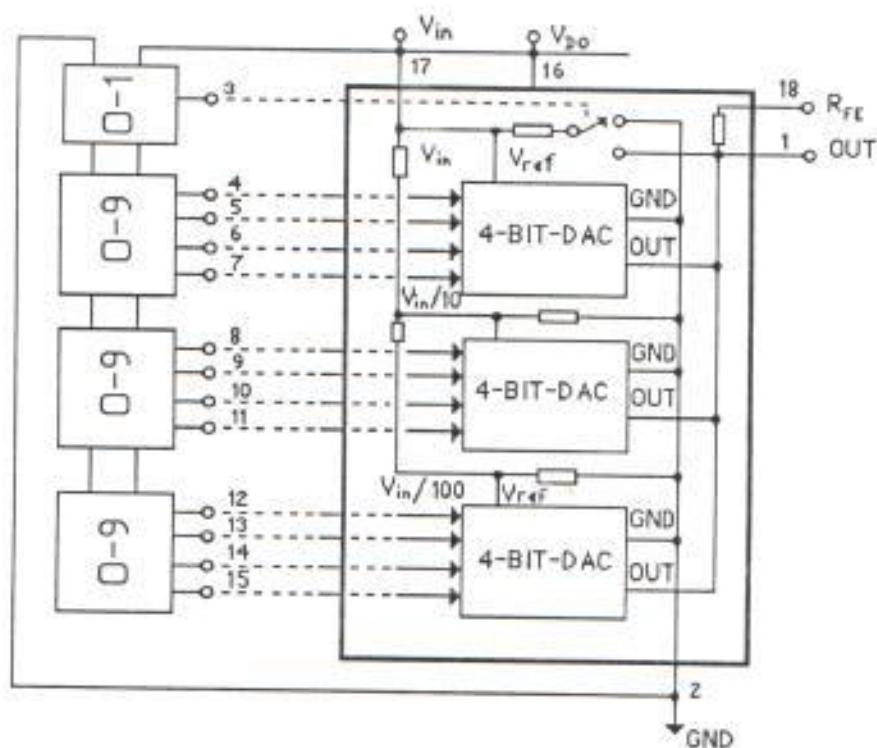


FIG. N° 31.- Convertidor D/A AD7525

Estos convertidores están ordenados de acuerdo a su prioridad.

Para comprender mejor la función del AD7525 vemos su aplicación en un circuito inversor :

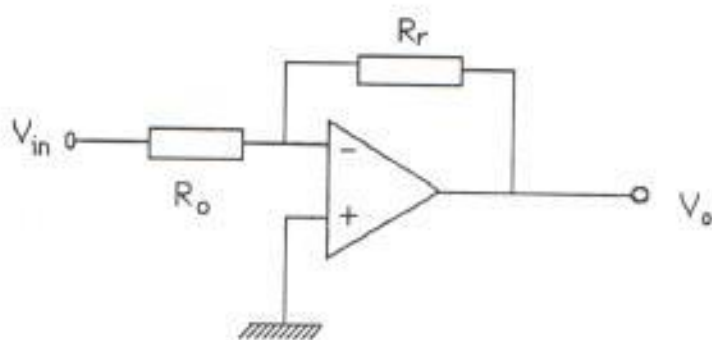


FIG. N° 32.- Circuito inversor

En lugar de la resistencia  $R_0$  se coloca el AD7525 y renombramos a  $R_r$  por  $R_{fb}$ . Así tenemos que :

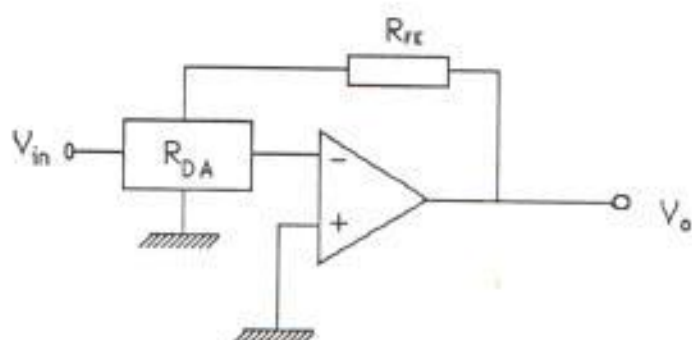


FIG. N° 33.- Circuito inversor utilizando RDA

En el circuito inversor sabemos que  $V_R = - \frac{R_r}{R_o} \longrightarrow V_R = \frac{V_o}{V_{in}}$

Con el convertidor tenemos que  $V_R = - \frac{R_{FB}}{R_{DA}}$  donde  $R_{DA}$  es la resistencia variable del AD 7525 .

Se puede fijar el código del interruptor entre 0 y 1,999. Al utilizar este dispositivo como un potenciómetro se debe deducir el comportamiento de la resistencia en dependencia de su codificación. Mayores datos técnicos adjuntamos en el anexo.

Estos son los principales elementos que conforman nuestro circuito junto con resistencias de acoplamiento y capacitores para mantener y filtrar la señal de alimentación.

Para poder analizar el comportamiento de dicha resistencia partimos de la siguiente ecuación :

$$R_{DA} \sim \frac{1}{\text{código}}$$

$$R_{DA} = K \cdot \frac{1}{\text{código}}$$

Considerando que  $K = R_L \cdot 2^n$  donde  $n = \#$  de bit

$R_L =$  resistencia del conductor del circuito R-2R

Tenemos que

$$R_{DA} = \frac{R_L 2^n}{\text{código}}$$

Como podemos apreciar en el gráfico para las resistencias  $R_C$  y  $R_D$  el voltaje de entrada se subdivide en  $V_{in}/10$  y  $V_{in}/100$  respectivamente:

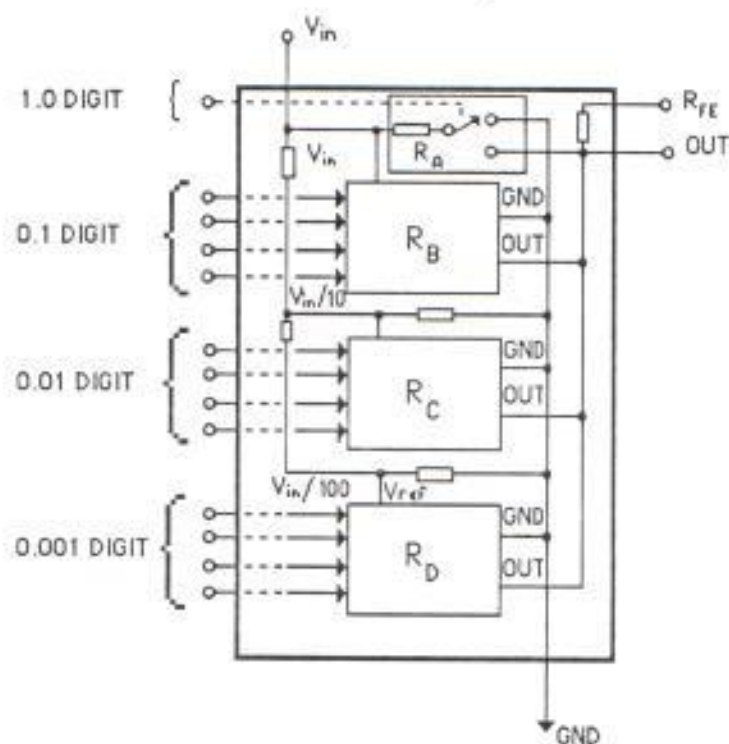


FIG. N° 34.- Circuito del AD7525

$$R_{DA} = R_A \parallel R_B \parallel R_C \parallel R_D$$

$$R_A = \frac{1.6 R_L}{\text{Código A}} \quad \text{Código A puede ser 0 ó 1}$$

$$R_B = \frac{16 R_L}{\text{Código B}} \quad \text{Código B = 0,1,2,\dots,9}$$

$$R_C = \frac{1.6 R_L}{\text{Código C}} \cdot \frac{1}{0.1} \quad \text{Código C = 0,1,2,\dots,9}$$

$$R_D = \frac{1.6 R_L}{\text{Código D}} \cdot \frac{1}{0.01} \quad \text{Código D = 0,1,2,\dots,9}$$

La conductividad del convertidor es :

$$G_{DA} = \frac{1}{R_A} + \frac{1}{R_B} + \frac{1}{R_C} + \frac{1}{R_D}$$

$$G_{DA} = \frac{\text{Código A}}{1.6 R_L} + \frac{\text{Código B}}{16 R_L} + \frac{\text{Código C}}{1.6 R_L} 0.1 + \frac{\text{Código D}}{1.6 R_L} 0.01$$

$$G_{DA} = \frac{1}{1.6 R_L} \left( \text{Código A} + \frac{\text{Código B}}{10} + \frac{\text{Código C}}{10} 0.1 + \frac{\text{Código D}}{10} 0.01 \right)$$

Código BCD (decimal)

$$G_{DA} = \frac{\text{Código BCD (decimal)}}{1.6 R_L}$$

$$R_{DA} = \frac{1.6 R_L}{\text{Código BCD (decimal)}}$$

Para comprobar la conductividad de esta resistencia tomamos las siguientes medidas. Armamos un circuito constituido de una fuente de tensión continua de 10 V, el convertidor D/A y un



amperímetro. Tomamos medidas de  $I$  para diferentes valores de codificación y obtenemos:

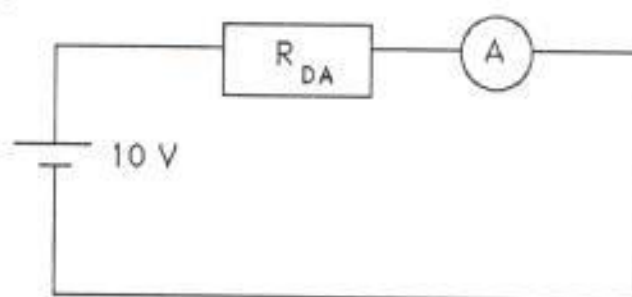


FIG. N° 35.- Circuito probador de conductividad de RDA

Utilizando una  $R = 10.8 \text{ K}\Omega$  y reemplazando en la fórmula obtenemos los datos teóricos.

Código	$R_{DA}$ teórico	$R_{DA}$ medido	$\Delta$ Error
0.001	17.28 $\text{M}\Omega$	16.95 $\text{M}\Omega$	1.9
0.002	8.64 $\text{M}\Omega$	8.47 $\text{M}\Omega$	1.9
0.004	4.32 $\text{M}\Omega$	4.38 $\text{M}\Omega$	1.4
0.008	2.16 $\text{M}\Omega$	2.25 $\text{M}\Omega$	4.2
0.010	1.73 $\text{M}\Omega$	1.77 $\text{M}\Omega$	2.4
0.020	864 $\text{K}\Omega$	869.5 $\text{K}\Omega$	0.6
0.040	432 $\text{K}\Omega$	444.4 $\text{K}\Omega$	2.8
0.080	216 $\text{K}\Omega$	217.3 $\text{K}\Omega$	0.6
0.100	172.8 $\text{K}\Omega$	177 $\text{K}\Omega$	2.4
0.200	86.4 $\text{K}\Omega$	86 $\text{K}\Omega$	0.4
0.400	43.2 $\text{K}\Omega$	42.16 $\text{K}\Omega$	2.3
0.800	21.6 $\text{K}\Omega$	21.74 $\text{K}\Omega$	0.6
1.000	17.28 $\text{K}\Omega$	17.24 $\text{K}\Omega$	0.2

TABLA N° 4.- Cálculos de RDA

Al ser la diferencia tan pequeña, tomaremos como parámetros los valores teóricos en la fijación de los coeficientes de la función de transferencia.

## 2.6.- DIAGRAMA DEL CIRCUITO

Realizando las sustituciones correspondientes a las resistencias variables que regulan cada uno de los coeficientes de la función de transferencia, tenemos el siguiente circuito :

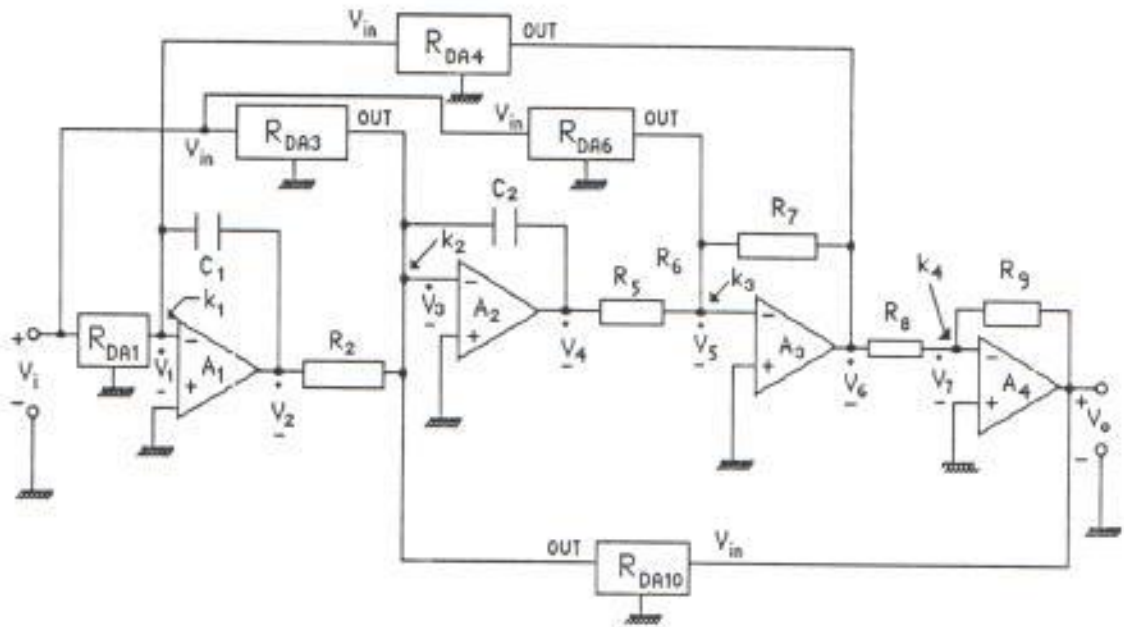


FIG. N° 36.- Circuito final del filtro universal

Y su función de transferencia es la siguiente :

$$H(S) = \frac{\frac{R_9 R_7}{R_8 R_{DA6}} S^2 - \frac{R_9 R_7}{R_{DA3} R_8 R_5 C_2} S + \frac{R_9 R_7}{R_{DA1} R_5 C_2 R_2 C_1 R_8}}{S^2 + \frac{R_9 R_7}{R_8 R_5 C_2 R_{DA10}} S + \frac{R_7}{R_{DA4} R_5 C_2 R_2 C_1}}$$

### III.- CONSTRUCCION Y PRUEBAS EXPERIMENTALES

En este capítulo revisaremos las pruebas experimentales que se realizaron una vez construido el circuito definitivo, el cual ya hemos analizado en los capítulos anteriores.

También realizaremos una comparación entre los datos teóricos calculados y los que se produjeron en la práctica, y analizaremos la veracidad y confiabilidad de los mismos junto con el análisis de las gráficas correspondientes.

#### 3.1.- CONSTRUCCION DEL CIRCUITO

En los dos capítulos anteriores, hemos revisado el funcionamiento de los diversos tipos de filtros, así como también hemos analizado varios circuitos encaminados a encontrar uno

que satisfaga nuestros requerimientos. Habiendo determinado que circuitería es la más conveniente y escogidos los componentes que mejor se adaptan a cumplir los objetivos de nuestro trabajo, debemos proceder a la construcción de nuestro proyecto.

Luego de haber probado nuestro diseño en un protoboard, procedimos a diseñar el arte para elaborar la placa del circuito impreso. El diseño del arte ocupó ambos lados de la placa reduciendo así el tamaño de la misma y la complejidad del diseño. Una vez confeccionada la placa por los métodos convencionales y posicionados los elementos respectivos en sus correspondientes ubicaciones, procedemos a la prueba final para comprobar la efectividad del circuito. Después de probar el buen funcionamiento del circuito en la placa impresa, lo colocamos dentro de una pequeña caja tomando las precauciones de aislamiento correspondientes, para por un lado darle una mejor presentación al proyecto y por otro, para permitirle al operador del mismo una mejor operación ya que tanto la placa como los interruptores de fijación de los coeficientes se encontrarán fijos y con los conectores o plugs de entrada y salida bien identificados. Por último realizamos las pruebas experimentales finales y comparamos estos datos con los valores teóricos calculados, para poder analizar la confiabilidad y veracidad del proyecto.

### 3.2.- PRUEBAS EXPERIMENTALES

a) Filtro pasa bajo :

$$H(S) = \frac{D}{S^2 + A S + B}$$

$D = 32$  ,  $A = 60$  ,  $B = 16$  tenemos que :

$$H(S) = \frac{32}{S^2 + 60 S + 16}$$

Estos valores representan según el anexo A "Tabla de parámetro" a los siguientes valores :

$$D = 32 \rightarrow 9.249 \times 10^7$$

$$A = 60 \rightarrow 3491$$

$$B = 16 \rightarrow 2.06 \times 10^7$$

$$A = \frac{D}{B} = 4.48 \text{ [V]}$$

$$B = \omega_g^2 \quad \omega_g = \sqrt{B b_1} = 6306.21 \text{ [rad/seg.]}$$

$$f_g = \frac{\omega_g}{2\pi} = 1.0036 \text{ [KHz]}$$

$$Q = \frac{B}{A} = 1.3$$

Según el gráfico en la sección 3.3.a , tenemos que :

$$A_o = 12.8 \text{ dB} = 20 \log V$$

$$A_o = 4.365 \text{ [V]}$$

$$f_g = 0.996 \text{ [KHz]}$$

Este es un ejemplo de como se calculan los valores teóricos y experimentales, otras pruebas, la gráfica y la tabla correspondiente analizaremos en el siguiente subcapítulo.

b) Filtro pasa alto :

$$H(S) = \frac{M S^2}{S^2 + A S + B}$$

$M = 1999$  ,  $B = 1958$  ,  $A = 1025$  tenemos que :

$$H(S) = \frac{1999 S^2}{S^2 + 1025 S + 1958}$$

Estos valores representan según el anexo A "Tabla de parámetro" a los siguientes valores :

$$M = 1999 \rightarrow 2,06$$

$$A = 1025 \rightarrow 59645$$

$$B = 1958 \rightarrow 2.521 \times 10^9$$

$$B = \omega_g^2 \quad \omega_g = \sqrt{B} = 50213,86 \text{ [rad/seg.]}$$

$$f_g = \frac{\omega_g}{2\pi} = 7,9917 \text{ [KHz]}$$

$$Q = \frac{\sqrt{B}}{A} = 0.84$$

$$M = A_o = 2.06$$

Según el gráfico en la sección 3.3.b , tenemos que :

$$A_o = 6.3 \text{ dB} = 20 \log V$$

$$A_o = 2.06 \text{ [V]}$$

$$f_g = 6,937 \text{ [KHz]}$$

Este es un ejemplo de como se calculan los valores teóricos y experimentales, otras pruebas, la gráfica y la tabla correspondiente analizaremos en el siguiente subcapítulo.

c) Filtro pasa banda:

$$H(S) = - \frac{C S}{S^2 + A S + B}$$

$C = 1$  ,  $B = 1$  ,  $A = 1$  tenemos que :

$$H(S) = \frac{S^2}{S^2 + S + 1}$$

Estos valores representan según el anexo A "Tabla de parámetro" a los siguientes valores :

$$C = 1 \rightarrow 54,18$$

$$A = 1 \rightarrow 58,19$$

$$B = 1 \rightarrow 1.287 \times 10^6$$

$$B = \omega_0^2 \quad \omega_0 = \sqrt{B} = 1134,46 \text{ [rad/seg.]}$$

$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = 180,66 \text{ [KHz]}$$

$$Q = \frac{\sqrt{B}}{A} = 19,50$$

$$A_0 = \frac{C}{A} = 0,931$$

Según el gráfico en la sección 3.3.c, tenemos que :

$$A_0 = 0.5 \text{ dB} = 20 \log V$$

$$A_0 = 1.06 \text{ [V]}$$

$$f_0 = 184 \text{ [KHz]}$$

Este es un ejemplo de como se calculan los valores teóricos y experimentales, otras pruebas, la gráfica y la tabla correspondiente analizaremos en el siguiente subcapítulo.

### 3.3.- GRAFICOS DE CURVAS CARACTERISTICAS

#### a) Filtro Pasa bajo

LINEA	coeficientes			$f_g$		$A_0$	
	A	B	D	teórico	medido	teórico	medido
1.a	60	16	32	1,004	0,996	4,5	4,365
1.b	108	23	47	1,19	0,996	4,6	4,365
1.c	153	31	62	1,005	0,996	4,5	4,365
1.d	239	50	100	1,004	0,996	4,5	4,365

LINEA	coeficientes			$f_g$		$A_0$	
	A	B	D	teórico	medido	teórico	medido
2.a	108	23	47	1,018	0,986	4,59	4,36
2.b	108	43	47	1,392	1,316	2,45	2,37
2.c	108	63	47	1,685	1,595	1,67	1,64
2.d	108	83	47	1,934	1,919	1,27	1,23

**TABLA N° 5.-** Resultados experimentales del filtro pasa bajo



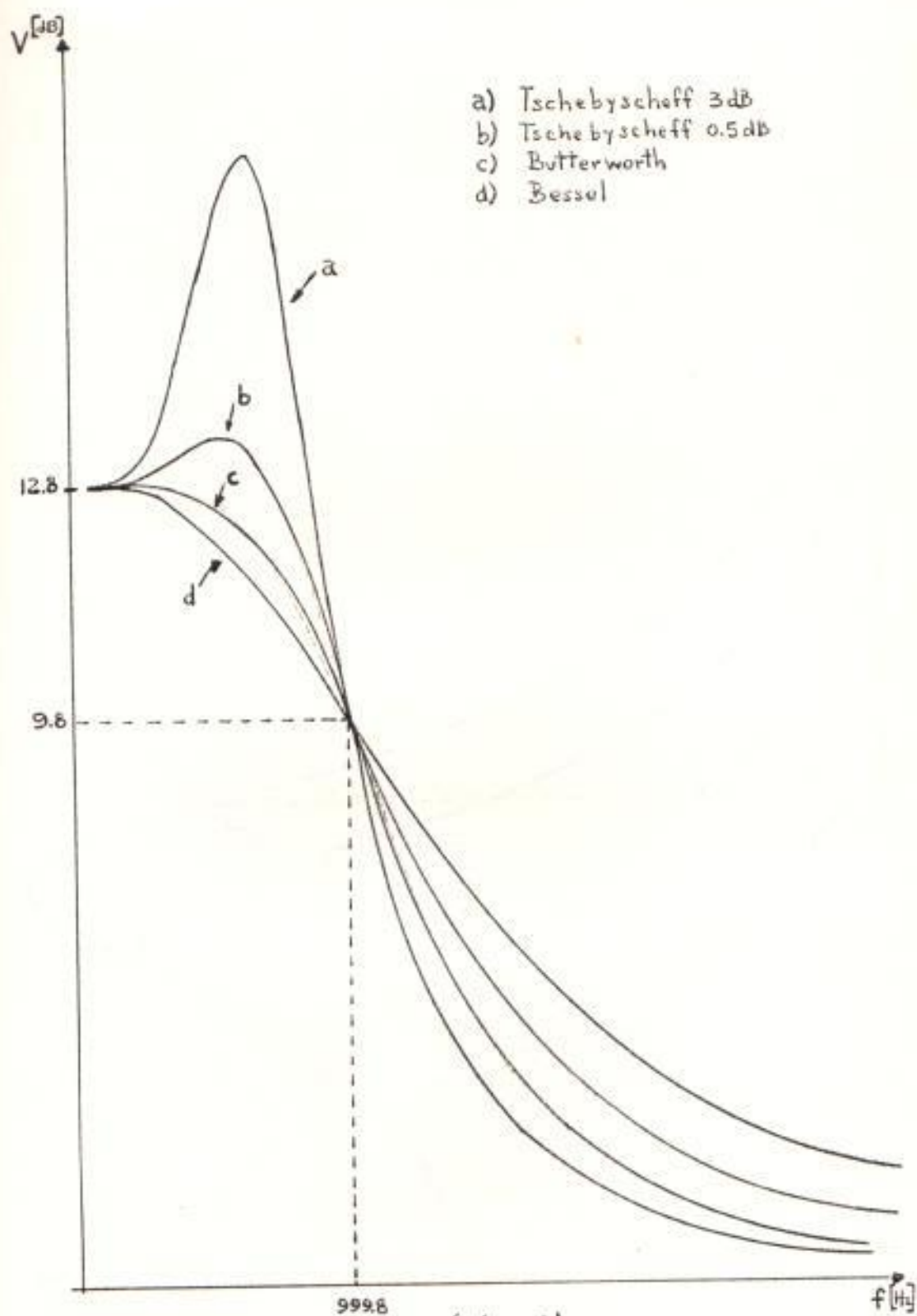


FIG. N° 37.- Filtro Pasa bajo (línea 1)

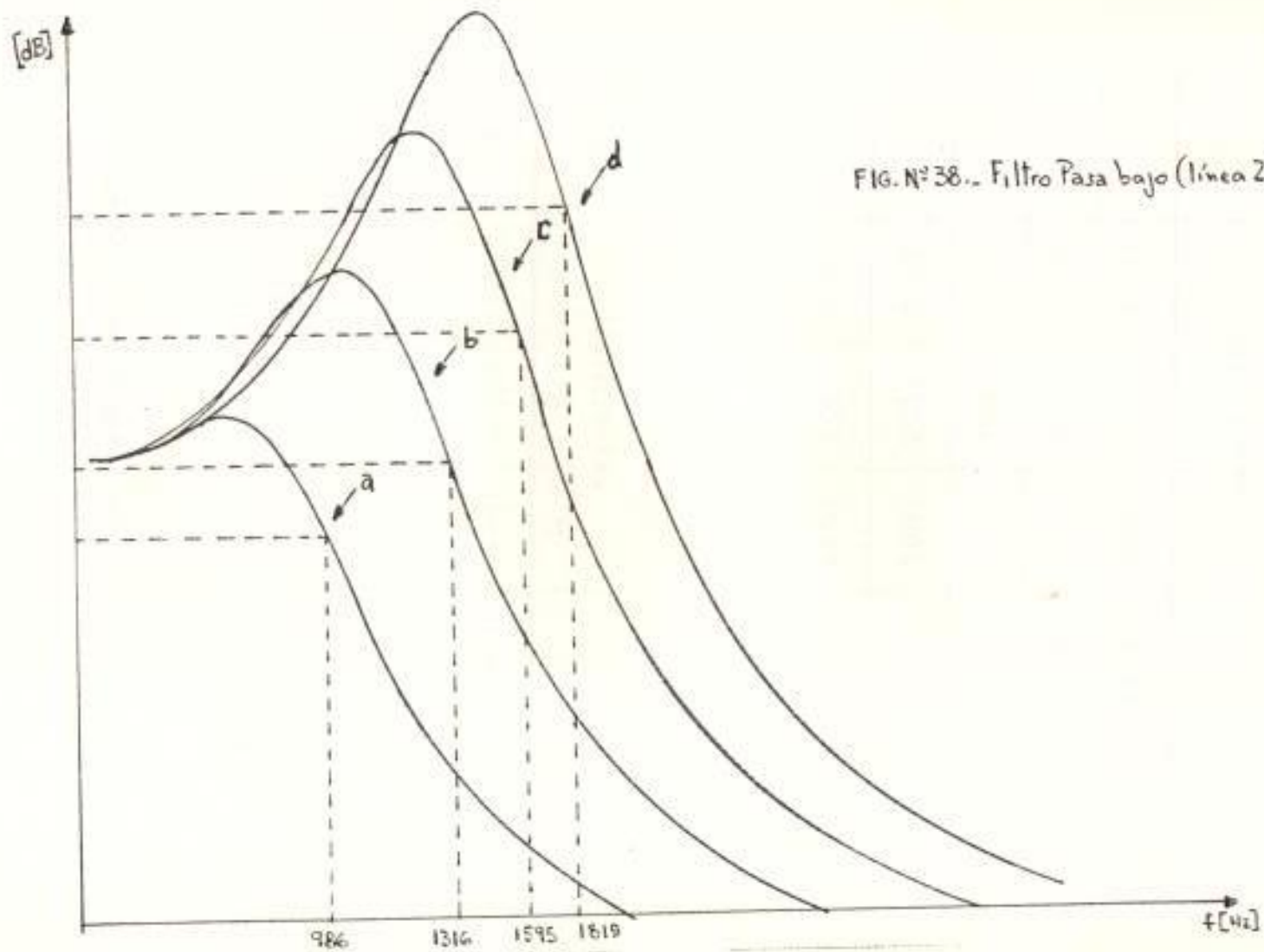


FIG. N° 38.- Filtro Pasa bajo (línea 2)

b) Filtro Pasa alto

LINEA	coeficientes			$r_g$	$A_0$
	A	B	M		
1.a	1025	1958	1999	6,937	2,06
1.b	0325	1958	1999	8,8	2,06
1.c	1000	1958	1999	6,86	2,06
1.d	0700	1958	1999	5,9	2,06
1.d	0900	1958	1999	6,414	2,06

LINEA	coeficientes			$r_g$	$A_0$
	A	B	M		
2.a	1025	0058	1999	8,84	1,97
2.b	1025	0458	1999	7,64	1,99
2.c	1025	0858	1999	6,94	2,02
2.d	1025	1958	1999	7,17	2,11

TABLA N° 6.- Resultados experimentales del filtro pasa alto

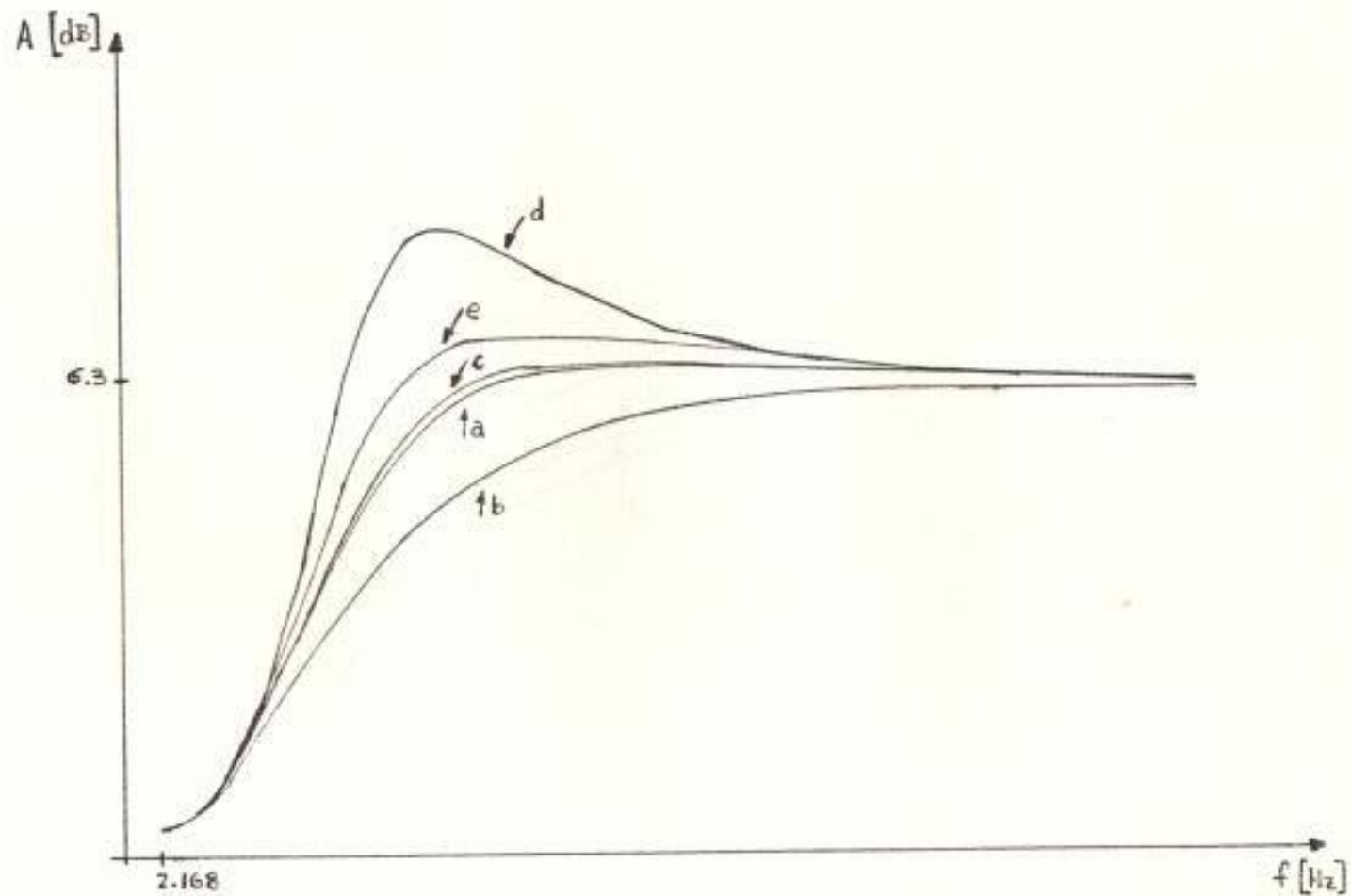


FIG. N° 39.- Filtro Pasa Alto (Línea 1)

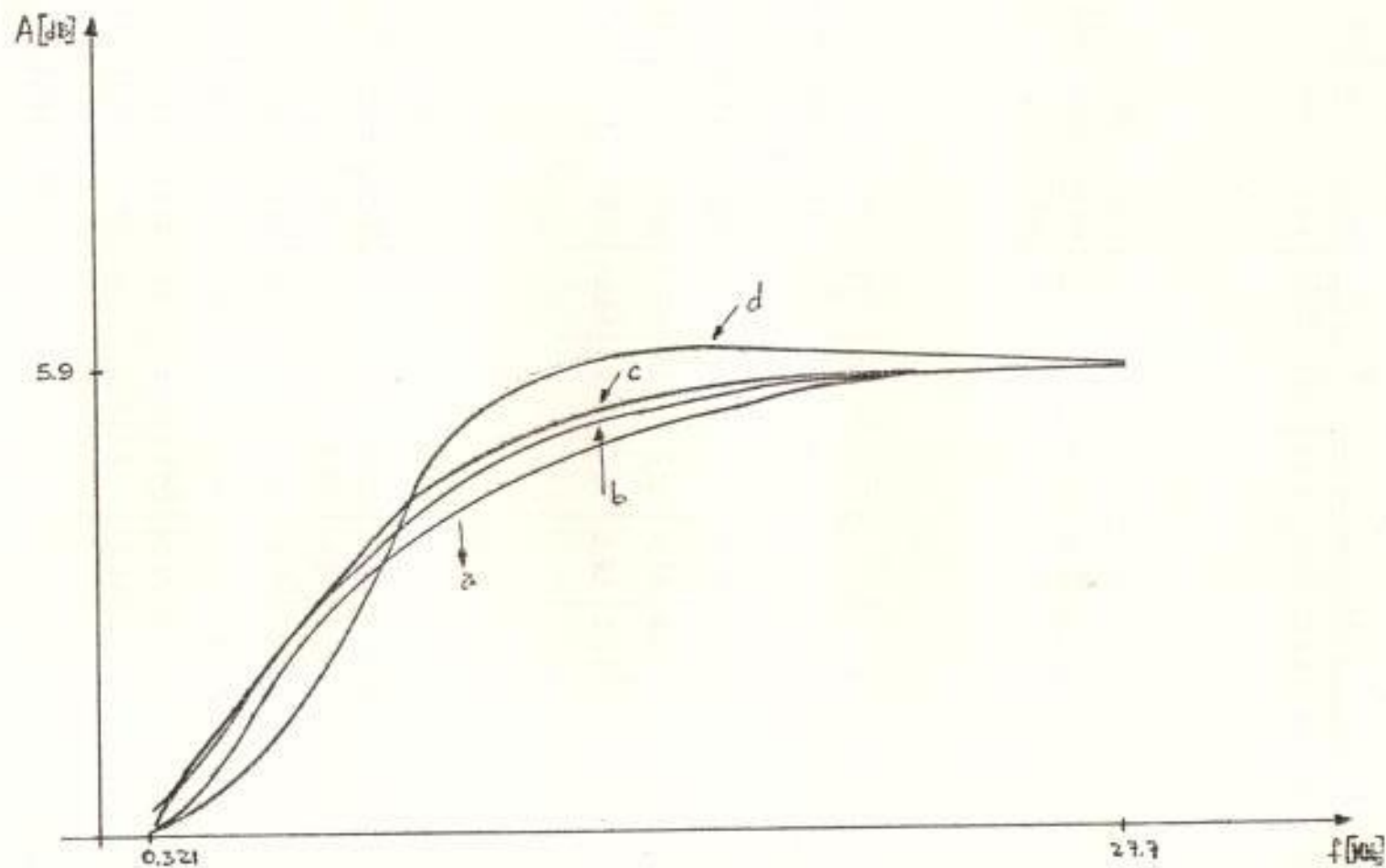


FIG N° 40.. Filtro Pasa Alto (línea 2)

c) Filtro Pasa banda

Línea	fo		f <sub>gl</sub>	f <sub>gh</sub>	Q		Ao		A	B	C
	teórico	medido			teórico	medido	teórico	medido			
1	180,6	184	179,5	189	19,3	19,5	0,93	1,06	0001	0001	0001

Línea	fo		f <sub>gl</sub>	f <sub>gh</sub>	Q		Ao		A	B	C
	teórico	medido			teórico	medido	teórico	medido			
2	8074,7	7740	2923	20653	0,375	0,436	0,93	0,9	1999	1999	1999

Línea	fo		f <sub>gl</sub>	f <sub>gh</sub>	Q		Ao		A	B	C
	teórico	medido			teórico	medido	teórico	medido			
3.a	8074,7	7838	7485	8191	11,1	8,8	12,2	15,3	99	1999	999
3.b	8074,7	7838	7519	8566	12,3	9,79	12,4	15,3	89	1999	999
3.c	8074,7	7840	7199	8625	5,5	4,38	4,67	5,6	199	1999	999
3.d	8074,7	7838	6824	9173	3,33	2,92	3,11	3,4	299	1999	999

Línea	fo		f <sub>gl</sub>	f <sub>gh</sub>	Q		Ao		A	B	C
	teórico	medido			teórico	medido	teórico	medido			
4.a	599	582	515	674	3,66	4,04	69,7	62,4	16	11	1199
4.b	1005,6	976	907	1058	6,46	6,78	69,7	62,4	16	31	1199
4.c	1289,8	1253	1185	1330	8,64	8,7	69,7	63,1	16	51	1199
4.d	1521,8	1478	1411	1550	10,63	10,27	69,7	63,8	16	71	1199
4.e	1806,3	1755	1690	1825	13	12,19	69,7	64,5	16	100	1199

**TABLA N° 7.-** Resultados experimentales del filtro pasa banda

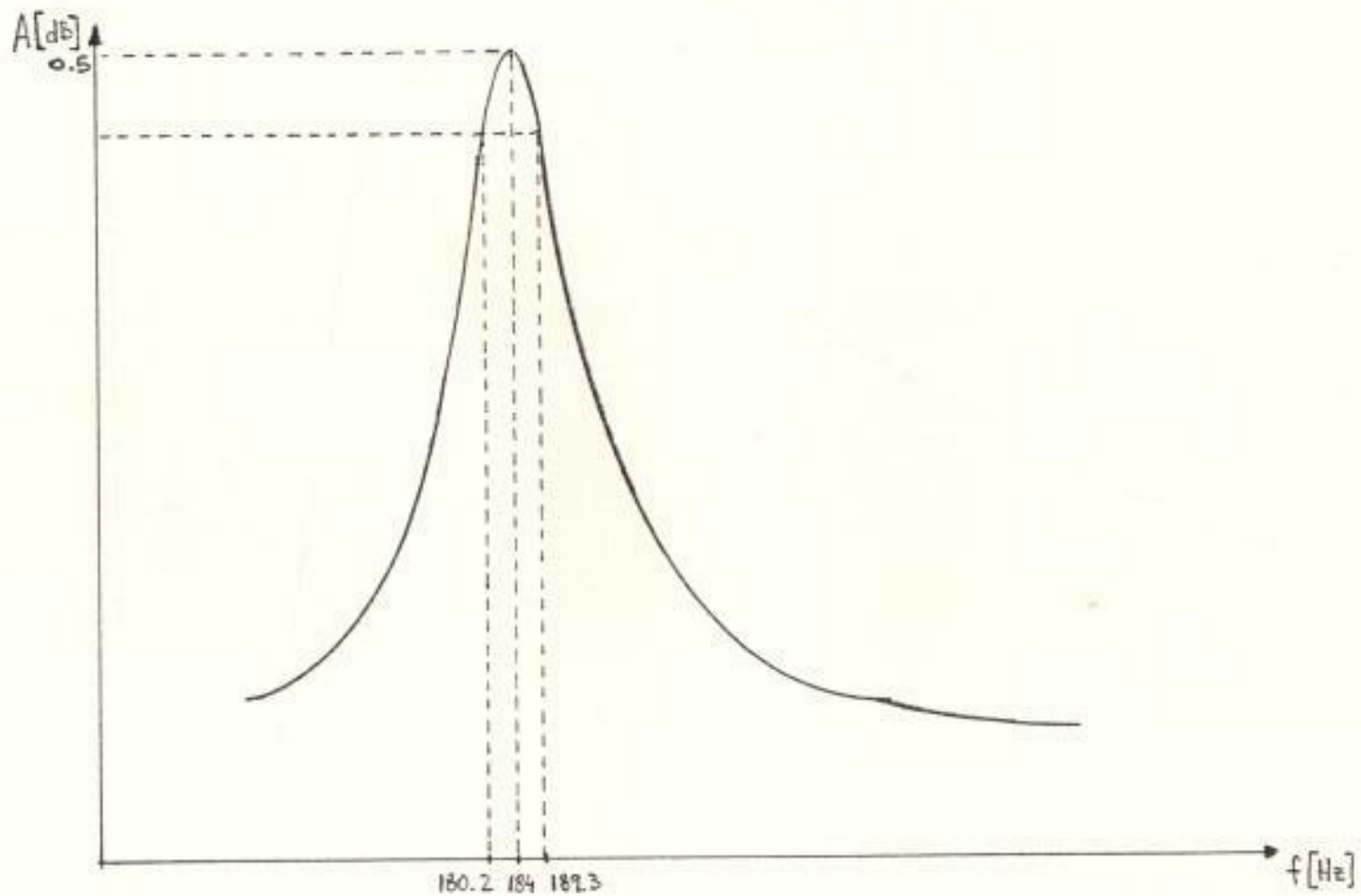


FIG. N° 41.- Filtro Pasa Banda (línea 1)

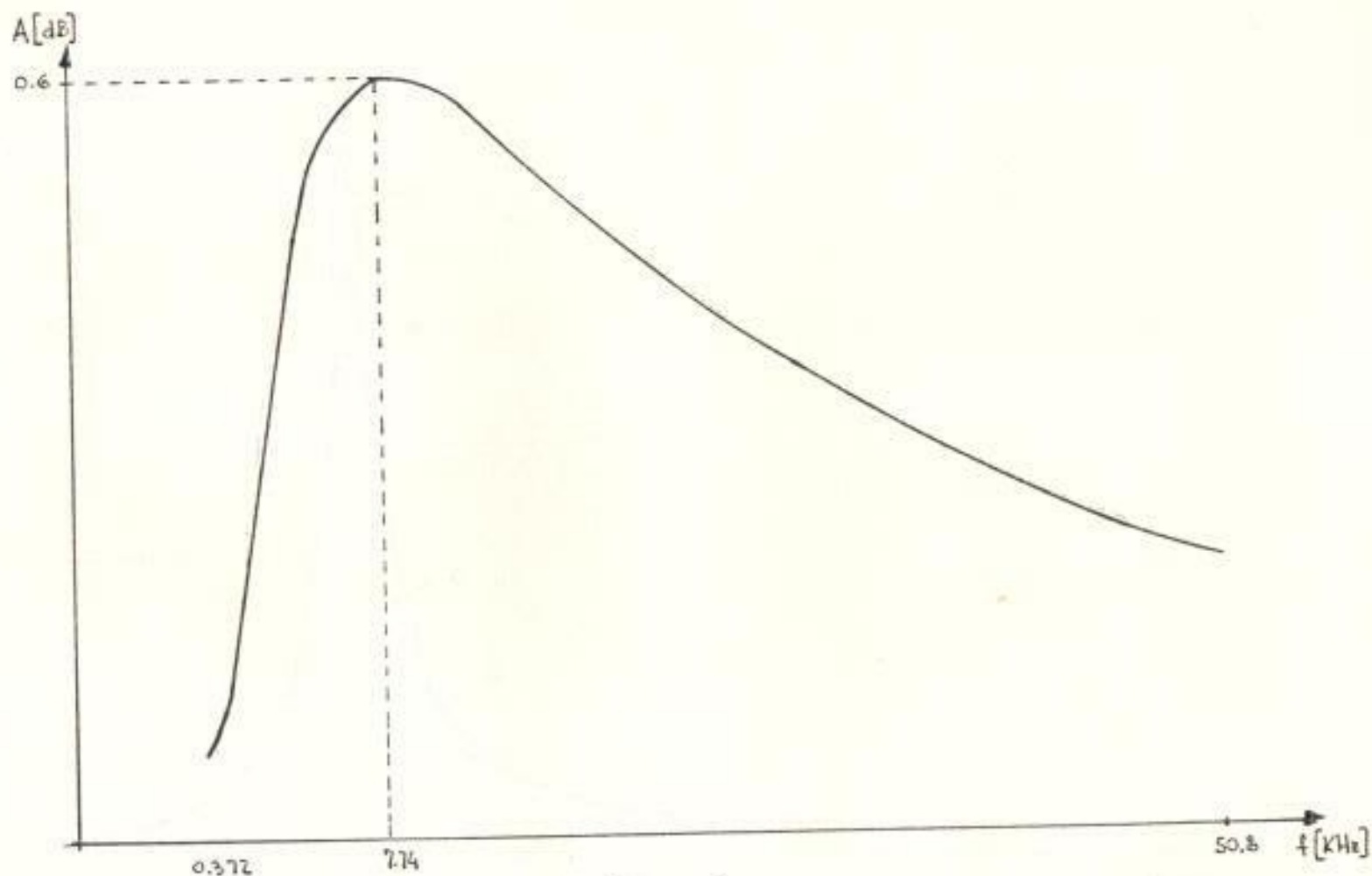


FIG. N° 42.- Filtro Pasa Banda (línea 2)



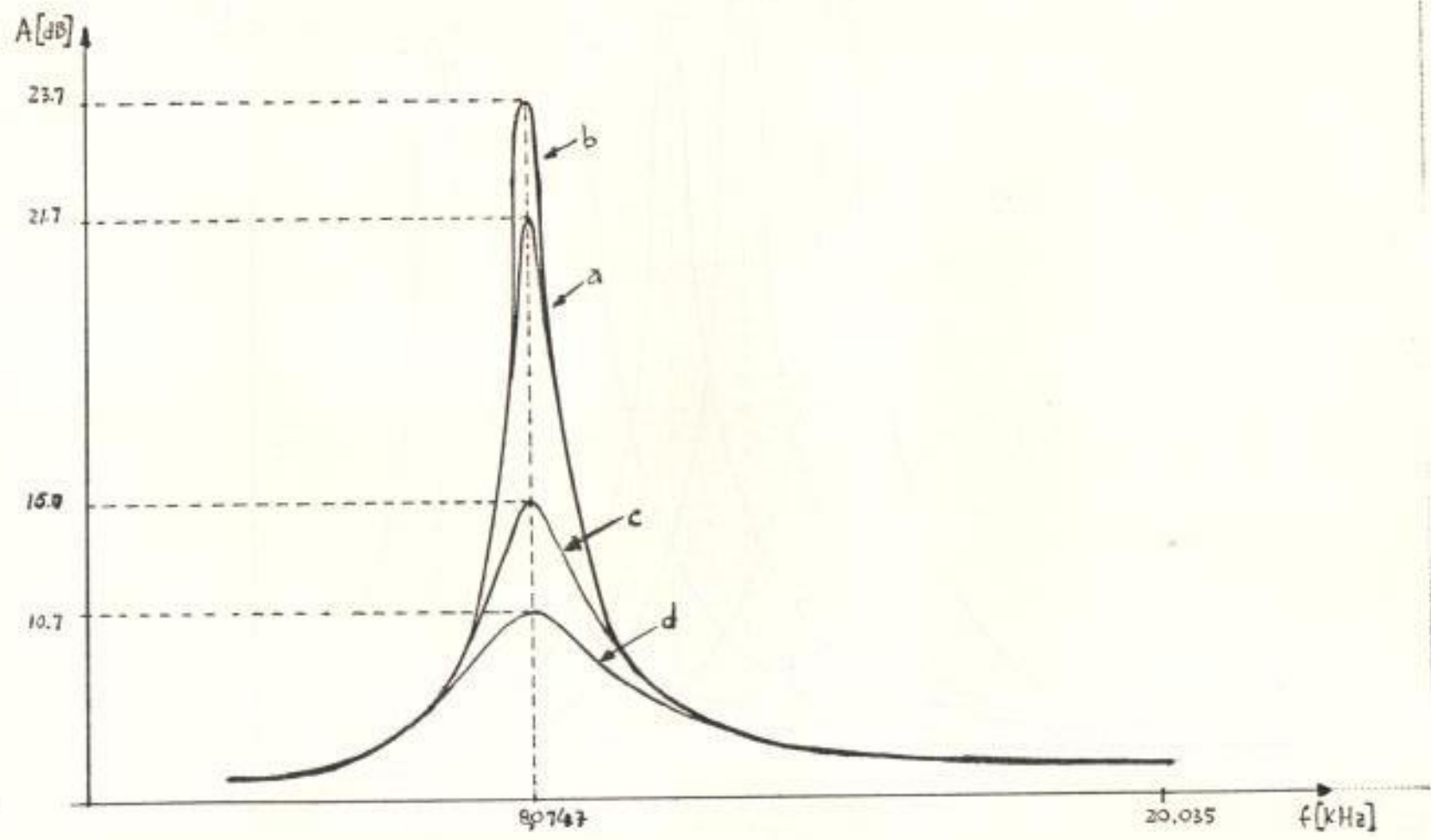


FIG. N° 43... Filtro Pasa Banda (línea 3)

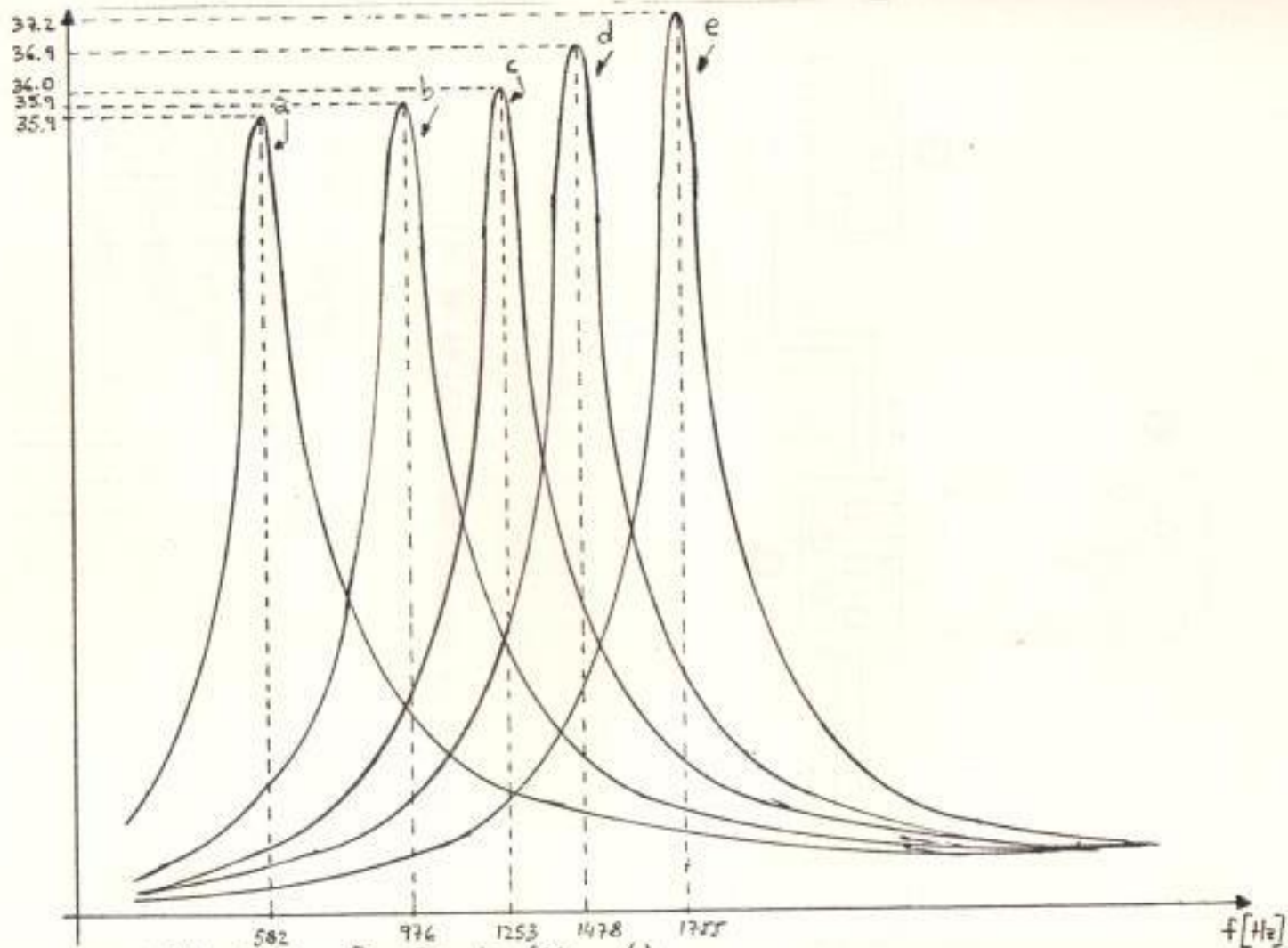


FIG. N°44... Filtro Pasa Banda (línea 4)

3.4.- DIAGRAMA EN BLOQUE DEL CIRCUITO PARA LA MEDICION Y  
LISTA DE APARATOS DE MEDICION

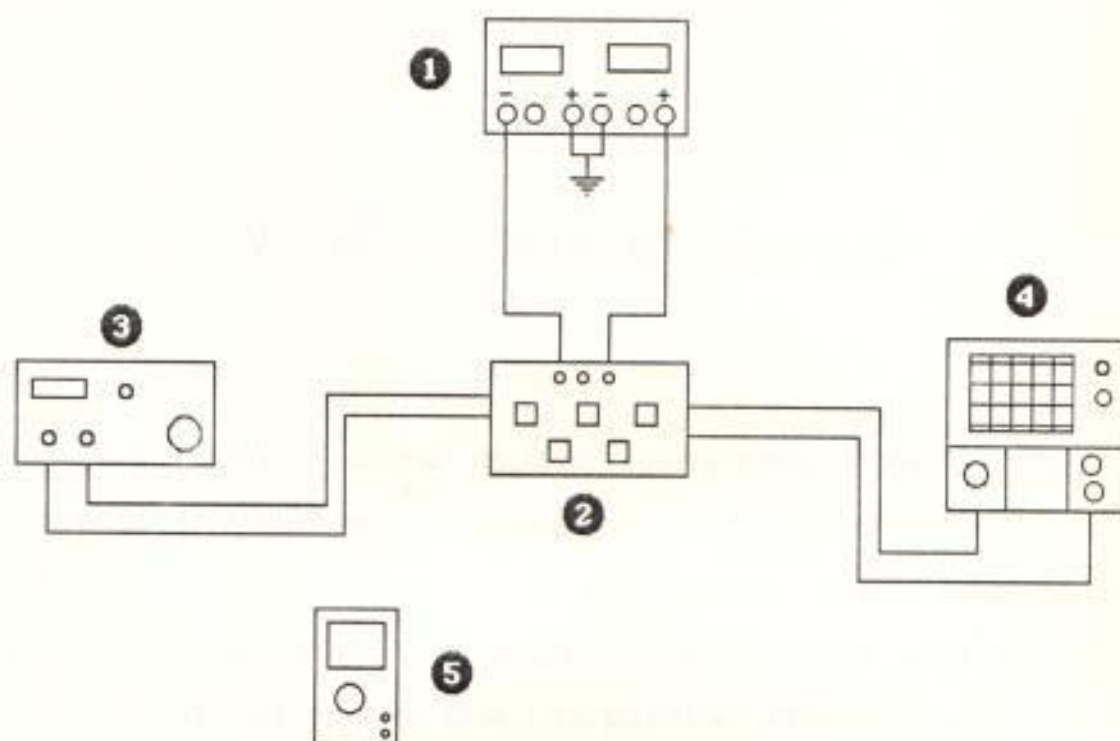


FIG. N° 45.- Elementos utilizados en la medición

- 1.- Fuente de poder +12 V, -12 V
- 2.- Circuito activo universal
- 3.- Generador de señales
- 4.- Osciloscopio
- 5.- Multímetro

## IV.- DESCRIPCION DEL APARATO

En este cuarto y último capítulo revisaremos nuestro circuito, haciendo un resumen de los elementos utilizados, su ubicación dentro del circuito impreso y el diagrama del mismo. Así como también analizaremos el manual de operaciones para el filtro universal, de tal manera que nos permita utilizar este proyecto de una manera más ágil y sencilla en las futuras aplicaciones en los laboratorios.

### 4.1.- MANUAL DE OPERACION

Tomemos para una mejor explicación del funcionamiento del sistema un ejemplo y realicemos todos los pasos necesarios para formar un filtro deseado. Supongamos que queremos utilizar un filtro pasa bajo del tipo 3 dB Tschebyscheff, sabemos que en un filtro pasa bajo los coeficientes  $C$  y  $M$  son iguales a cero y los

factores típicos para un filtro del tipo Tschebyscheff 3dB son :

$$a_1 = 1.065 \quad \text{y} \quad b_1 = 1.9305$$

Para una  $f_g = 1$  KHz posicionemos nuestro selector en  $R_{7,1}$  ya que éste se utiliza para frecuencias mayores a 370 Hz.

$$\omega_g = 2 \pi f_g$$

$$B = \frac{\omega_g}{b_1} = 2.045 \times 10^7$$

Con este valor revisamos nuestra Tabla de Parámetros de B y encontramos :

$$B_1 = 1.932 \times 10^7 \quad \text{y} \quad B_2 = 2.06 \times 10^7$$

Tomamos  $B_2$  ya que es el valor más próximo al deseado y obtenemos:

$$f_g = 1003.6 \text{ Hz}$$

Con este valor calculamos A y tenemos :

$$A = (a_1 \cdot \omega_g) / b_1 = 3480$$

Revisamos en la tabla de A y el valor más cercano es 3491.

Con estos valores calculamos el factor Q.

$$Q = \sqrt{B} / A = 1.3$$

Otro requerimiento es que la amplitud sea de 4.5 entonces tenemos:

$$A_o = D / B \quad \text{por lo que} \quad D = 9.276 \times 10^7$$

Revisando en la tabla correspondiente encontramos  $D = 9.249 \times 10^7$

con este valor calculamos nuevamente  $A_o$  y tenemos  $A_o = 4.4898$

Este ejemplo nos ha servido para conocer los procedimientos que se deben de realizar al escoger un filtro determinado.

## 4.2.- LISTA DE LOS COMPONENTES ELECTRONICOS

A continuación presentamos la lista de los componentes electrónicos que han sido utilizados en este circuito.

### Integrados

OP1.....OP4	TBA 221 B
IC1 ..... IC5	D/A AD 7525
D1 ..... D3	HP 5082-2811

### Resistencias

R <sub>2</sub>	2 K $\Omega$	1 %
R <sub>5</sub>	2 K $\Omega$	1 %
R <sub>9</sub>	24 K $\Omega$	1 %
R <sub>8</sub>	10 K $\Omega$	1 %
R <sub>7,I</sub>	7,5 K $\Omega$	1 %
R <sub>7,II</sub>	16 K $\Omega$	1 %
R	22 K $\Omega$	1 %

### Condensadores

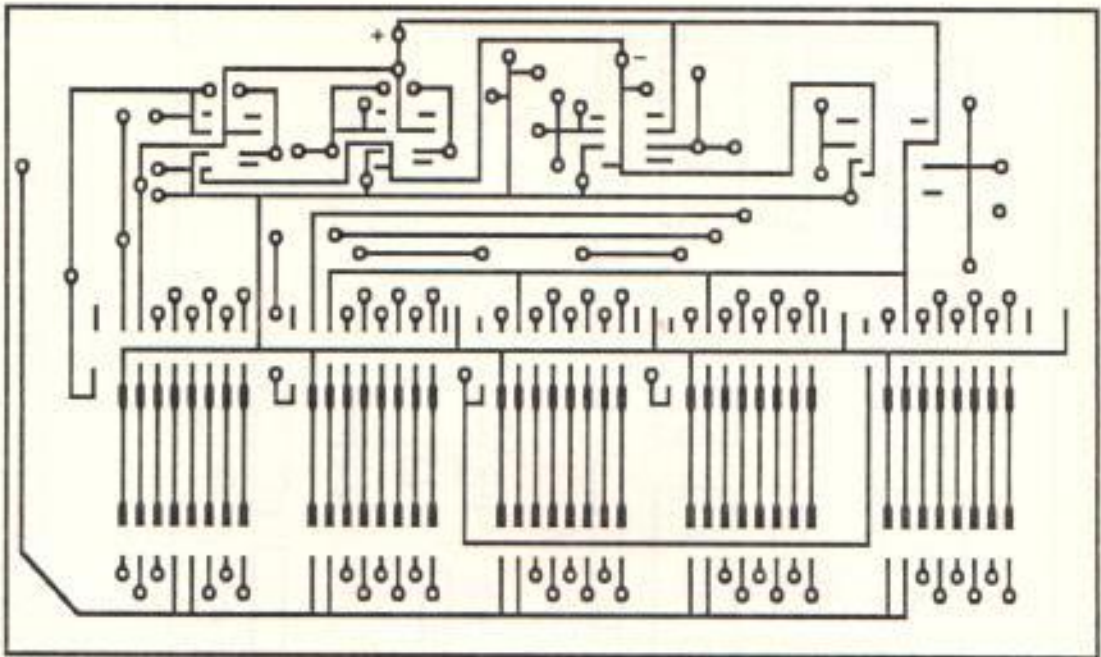
C <sub>1</sub>	10 nF	20 %
C <sub>2</sub>	10 nF	20 %
C <sub>3</sub>	0.1 F	20 %
C <sub>4</sub>	0.1 F	20 %

### Otros componentes

Socket de 8 pines  
Socket de 15 pines  
Interruptores BCD  
Conectores  
Cable

### 4.3.- DIAGRAMA DEL CIRCUITO IMPRESO

- Diagrama exterior



- Diagrama posterior

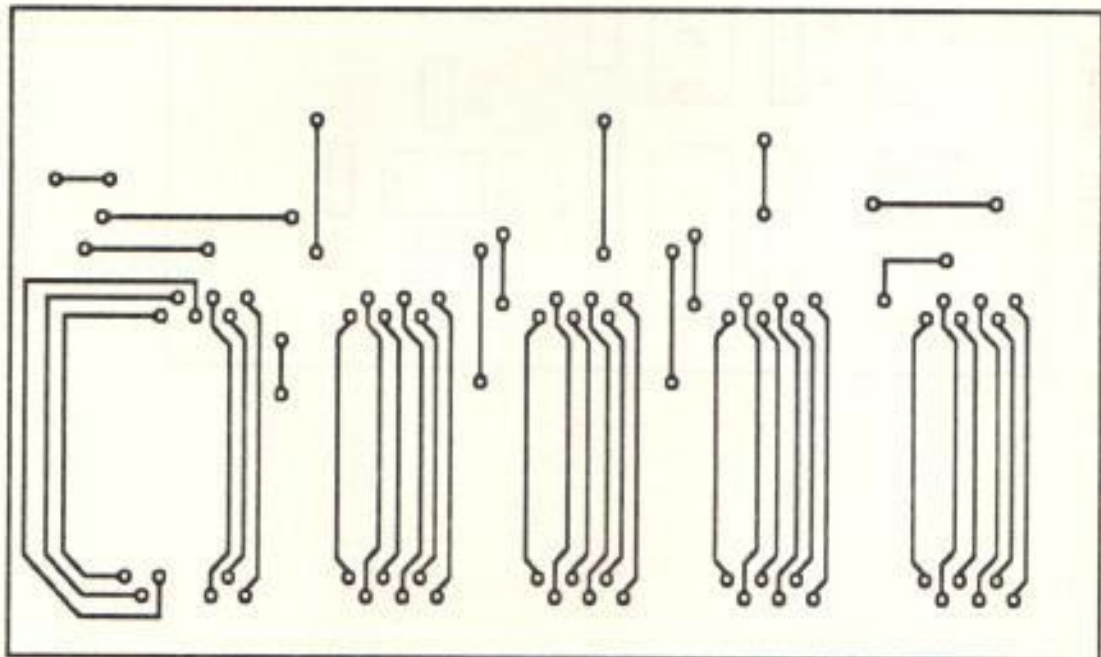


FIG. N° 46.- Diagrama del circuito impreso

#### 4.4.- UBICACION DE LOS COMPONENTES EN EL CIRCUITO (LAYOUT)

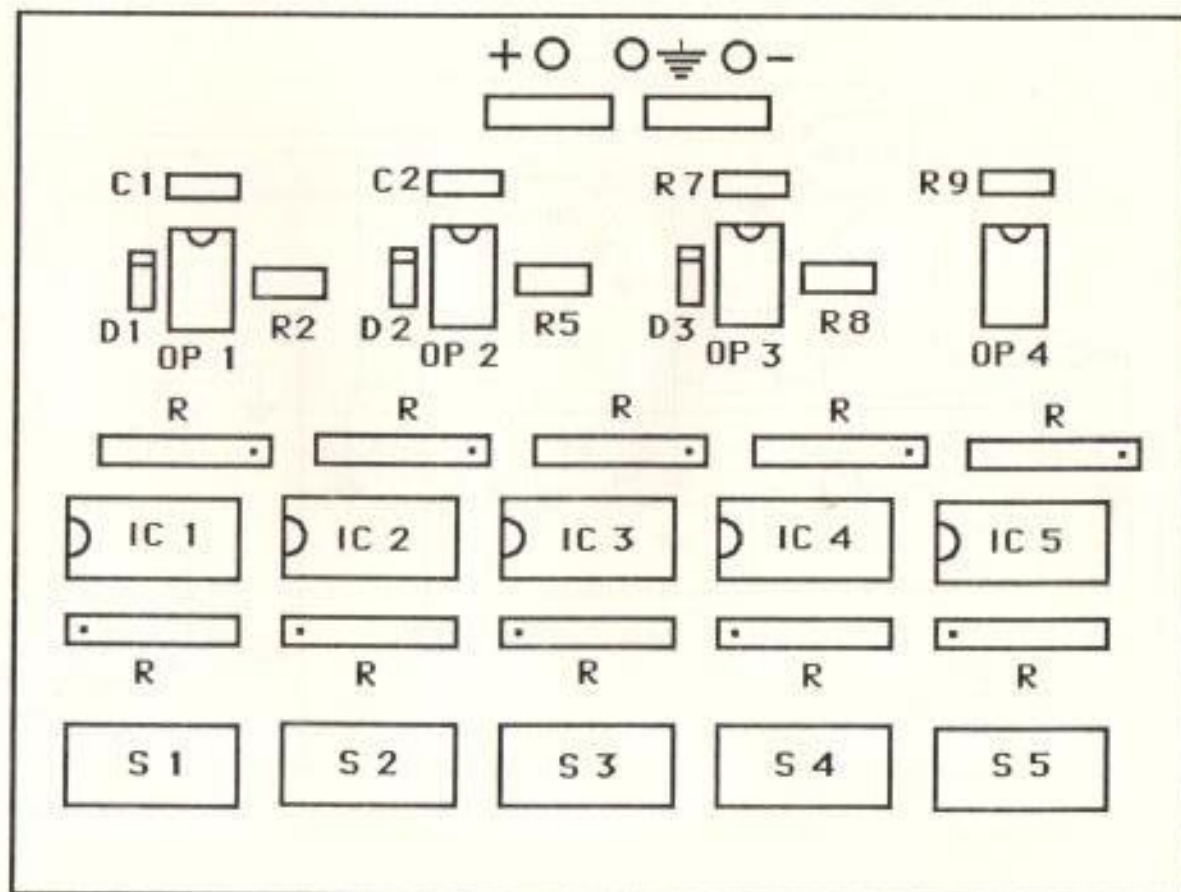


FIG. Nº 47.- Ubicación de los componentes en el circuito



#### 4.5.- DIAGRAMA FINAL DEL CIRCUITO

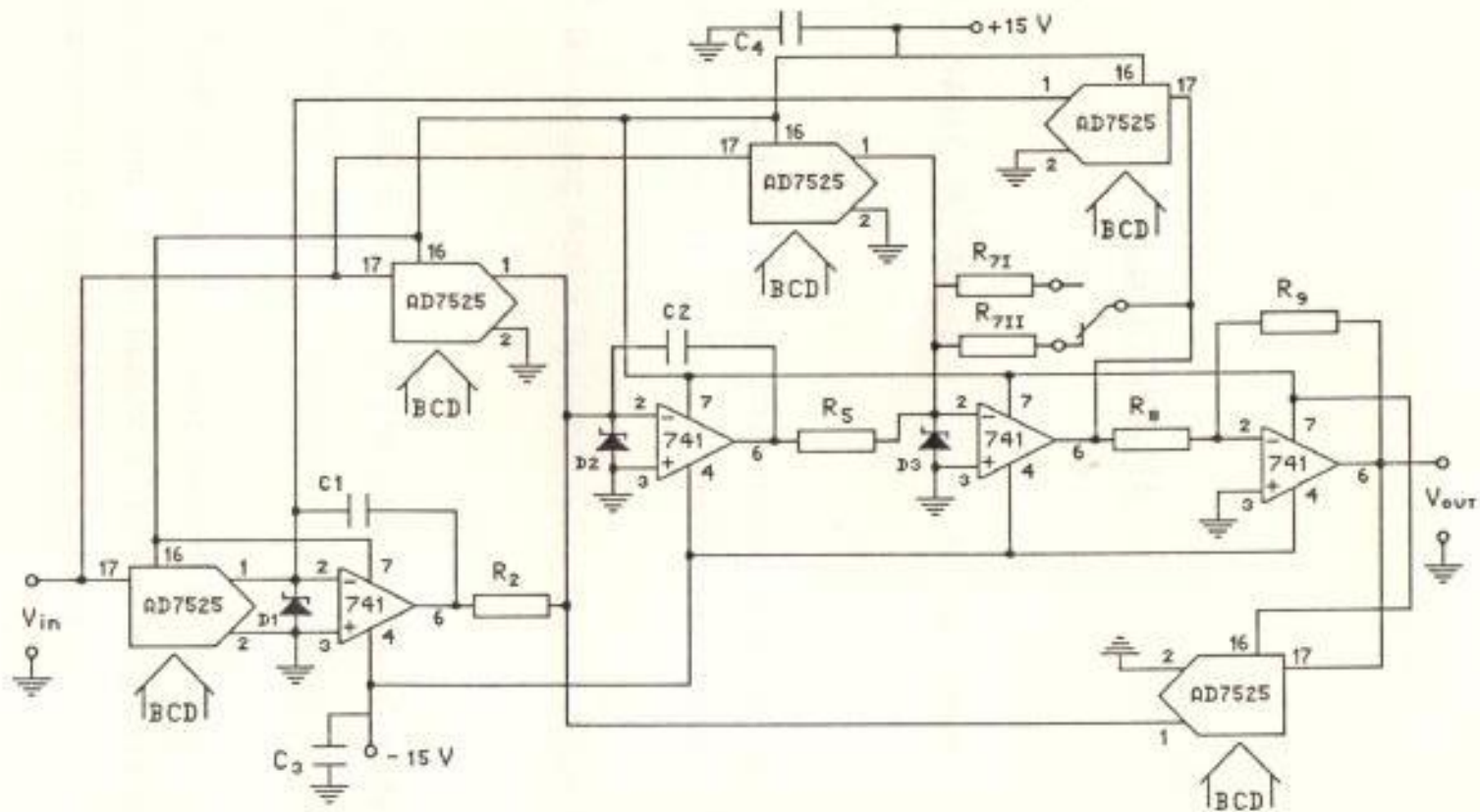


FIG. Nº 48.- Diagrama final del circuito

## BIBLIOGRAFIA

- 1.-**COWAN C., GRANT P.**, Adaptive Filters, Prentice Hall Inc., New Jersey, 1981.
- 2.-**DRISCOLL F., COUGHLIN R.**, Operational Amplifier and Linear Integrated Circuits, Prentice Hall Inc., New Jersey, 1982.
- 3.-**FRITZSCHE G.**, Analog Active Systems, IEEE Trans. Circuit Theory, 1971.
- 4.-**FRITZSCHE G., SEIDEL A.**, RC Electronic Active Circuits, IEEE Trans. Circuit Theory, 1971.
- 5.-**ISMAIL M.**, Opamp Integrators with Infinite Q Factor, A Report from Electronics and Communications Engineering Department, Faculty of Engineering Cairo University, Egypt, 1976.

- 6.-**JACOB M.**, Applications and Design with Analog Integrated Circuits, Reston Publishing Company, Reston Virginia, 1982.
- 7.-**JOHNSON C.,HILBURN L.**, Rapid Practical Designs of Active Filters, Mac Graw Hill, New York, 1968.
- 8.-**JOHNSON C., JOHNSON J., MOORE H.**, A Handbook of Active Filter, Wheeler Lab., New York, 1972.
- 9.-**MITRA K.**, Active Inductorless Filters, The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., New York, 1971.
- 10.- **MOKHTAR A., MOKHTAR M.** ,A Universal Active R Filter, A Report from Electronic Industries Research and Development Center, Egypt, 1976.
- 11.- **ROBERGE J.**, Operational Amplifiers Theory and Practice, Massachusets Institute of Technologie, Massachusets, 1975.
- 12.- **SAAL R.**, Handbook of Filter Design, AEG Telefunken, Germany, 1974.
- 13.- **SOLIMAN A.**, Active Compensation of the Voltage Follower, IEEE Trans. on Circuits and Systems, New York, 1979.

14.- **TOBEY G., GRAEME J., HUELSMAN L.**, Operational Amplifiers Design and Applications, Mac Graw Hill Book Company, New Jersey, 1971.

15.- **WHITE D.**, Electrical Filters, Synthesis Design and Applications, Don White Consultants Inc., 1983.

16.- **WILLIAMS A.**, Active Filter Design, IEEE Trans. Circuit Theory, New York, 1965.

17.- **YOUNG P.**, Electronic Communication Techniques, Electronic Ind., 1978.

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

- 1.- Cumpliendo con el objetivo principal de nuestro trabajo, comprobamos que los coeficientes de nuestra función de transferencia en este caso del filtro pudieron ser escogidos en base a los requerimientos del usuario.
- 2.- Los coeficientes además de poder ser escogidos a voluntad, también pudieron ser reproducidos, lo cual era otro requerimiento del proyecto.
- 3.- Con los filtros pasa bajo y pasa banda se obtuvieron los mejores resultados al comparar los valores teóricos con los obtenidos experimentalmente.
- 4.- Con el filtro pasa alto la relación entre la práctica y la teoría no fue tan exacta como se esperaba, debiéndose al margen de variación que los elementos electrónicos tienen.

- 5.- En general la diferencia que se encuentra en todos los tipos de filtros entre los valores teóricos y los obtenidos experimentalmente se puede explicar tomando en cuenta que los componentes electrónicos tienen una respectiva tolerancia.
- 6.- Debido a la graduación (escalonamiento) de los convertidores digitales analógicos, pueden existir pequeñas diferencias entre el valor decimal del código BCD calculado y el requerido por el usuario del circuito, pero al ser una diferencia mínima no altera de manera preocupante los resultados obtenidos.
- 7.- Mediante la conmutabilidad de R7 se dividió el margen de frecuencia en dos rangos. Desde 180,6 Hz hasta 8075 Hz depende de R7I y desde 8,31 Hz hasta 371,6 Hz depende de R7II.
- 8.- Se debe tomar en cuenta en la amplificación que la amplitud de salida no debe ser mayor a 10 V, debido a que se podría sobrepasar el voltaje de referencia del convertidor digital analógico y esto podría traer consecuencias muy graves para el circuito.
- 9.- Los diodos zener que se instalaron en el circuito son de protección para evitar que al conmutar el convertidor digital analógico se puedan producir picos de voltaje.

- 10.- Los condensadores C3 y C4 sirven como filtros adicionales para la tensión de alimentación y eventualmente protección para los picos en la red.
- 11.- Para poder elegir y reproducir a voluntad los filtros escogidos, el ingreso de los coeficientes que determinan el tipo de filtro debe ser realizado en forma digital.
- 12.- Para manejar esta información digital, utilizamos un convertidor digital analógico, el cual convierte nuestro ingreso de coeficientes digitales en una señal analógica, de tal manera que el circuito pueda procesar dichas señales y realizar la función del filtro deseado.
- 13.- Al tener el ingreso de coeficientes en forma digital, el circuito está preparado para que en una segunda parte de este mismo proyecto, el ingreso de los datos o coeficientes se lo pueda realizar desde un microprocesador.
- 14.- De igual forma con respecto a la salida, el circuito está preparado para que su señal de salida sea graficada por un plotter, lo cual en esta ocasión no fue posible pues no se dispuso de dicho impresor.
- 15.- Es así como hemos construido un circuito que ha cumplido con los objetivos trazados y a la vez nos permite la incorporación de otros dispositivos que optimizan su funcionamiento.