

# Modelo Didáctico para Evaluar Sistemas Acústicos

*M. en C. Miguel A. Partida Tapia* †  
*Subdirector Académico y de Investigación del CINTEC-IPN.*  
*Ing. Francisco Flavio Cordova Quiroz*  
*Estudiante de la Maestría CINTEC-IPN.*  
*Ing. Rubén Peredo Valderrama*  
*Profesor e Investigador del CINTEC-IPN.*  
*Ing. Alberto Flores Rueda*  
*Profesor e Investigador del CINTEC-IPN.*

**P**ara comprender adecuadamente la importancia de los sistemas acústicos debemos de considerarlos como un medio de comunicación entre transmisor y receptor, si este medio resulta ser de una mala calidad, el mensaje que envíe el transmisor nunca será legible para el receptor, por lo tanto no se tendrá la comunicación deseada entre estos dos. Por tanto, el propósito principal de este trabajo es evaluar tales sistemas y corregirlos para que sean de una buena calidad.

## Introducción

Generalmente se reconoce que el rango de frecuencias audible para el ser humano es de 20 Hz a 20 KHz. Considerando este rango y dentro de un sistema acústico, se pueden presentar diferentes fenómenos que hacen más difícil el estudio y análisis del sistema. Para hacer una evaluación eficiente se debe dividir el espectro audible para aislar de la mejor forma posible las frecuencias indeseadas para cada estudio.

Cada una de estas zonas del espectro audible se encuentran plena-

mente definidas, y se han etiquetado como zona X, zona A, zona B y zona CS. En cada una de estas zonas se presentan distintos fenómenos que se explican a continuación

**Zona A**, región de baja frecuencia y es dominada por los modos normales de oscilación.

**Zona B**, región de frecuencias medias y es dominada por los fenómenos de difusión y difracción.

**Zona CS**, zona dominada por las reflexiones.

**Zona X**, zona con la característica de no ser afectada prácticamente por ningún fenómeno.

La división del espectro audible se puede hacer en cuatro zonas, como se muestra en la **figura 1**. Estas cuatro zonas pueden variar la posición de sus fronteras, ya que se encuentran en función de las dimensiones del recinto acústico, y conociendo estas dimensiones se puede calcular la frecuencia donde se encontrará dicha frontera, por lo tanto se tiene:

La frontera entre X y A está definida por la ecuación  $n=172/L$ , donde L es la longitud del recinto acústico, y se encuentra dada en metros.

La frontera entre A y B está definida por la ecuación  $n1 = 1904.9 (T / V)$ , donde T es el tiempo que tarda en decaer una señal a -60 dB, y V es el volumen del recinto acústico dado en metros cúbicos.

La frontera entre B y C, esta definida por la relación  $n2 = 4 n1$

Dado que la gráfica está en función de las dimensiones del recinto y la frecuencia a la cual se encuentra la frontera, se ve entonces que mientras mas pequeño sea un recinto las fronteras se encontrarán situadas en (X)Hz y por consiguiente se tendrá un fenómeno más acentuado, en cambio, si el recinto aumenta en sus dimensiones, estas fronteras se moverán a una nueva frecuencia y por consiguiente habrá un nuevo fenó-

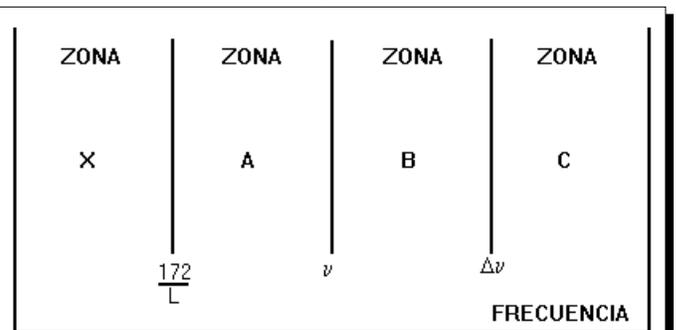
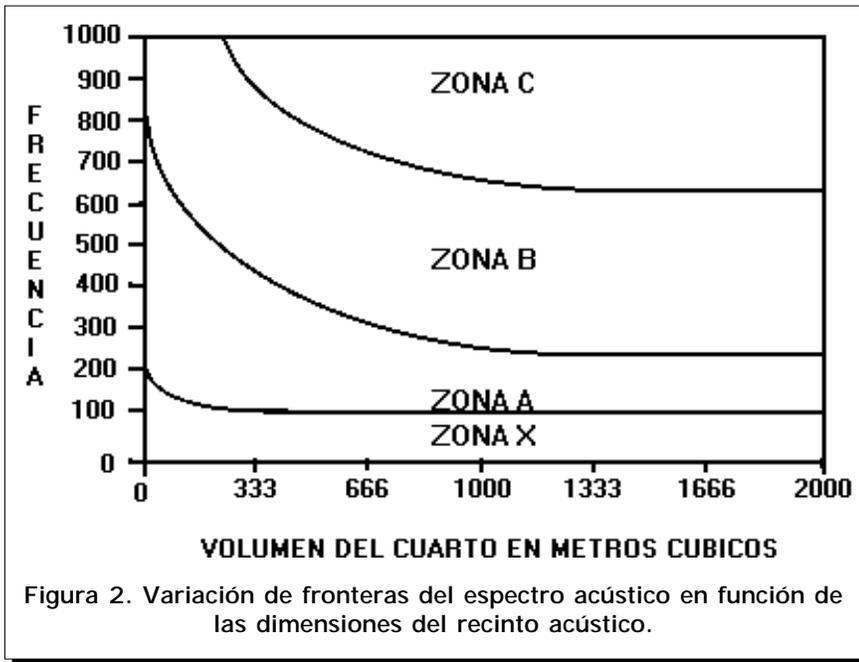


Figura 1. División del espectro audible.



diciones y caracterizaciones de los sistemas acústicos. Básicamente se pueden identificar 4 sistemas acústicos :

- A) Recintos acústicos.
- B) Elementos acústicos.
- C) Instrumentos musicales y equipos de sonido.
- D) Medios de comunicación.

Entonces se definirán todos los requerimientos para cada uno de estos sistemas acústicos, y así obtener un sistema computacional que pueda evaluar a estos sistemas de manera eficiente.

### Recintos Acústicos

Se considera un recinto acústico a los siguientes lugares: teatros, cines, salas de conferencias, estudios de grabación, salas de música, estadios, plazas, palenques, etc., los cuales pueden presentar distintos problemas que impiden que se les considere como recintos acústicos de buena calidad. Generalmente son:

- 1.- Inducciones por la red eléctrica.
- 2.- Exceso de nivel de ruido del medio ambiente.
- 3.- Reverberación excesiva.
- 4.- Modos normales de oscilación destacados.
- 5.- Defectos de forma (distorción).

¿Cuales son las características de cada una de estos problemas y como se resuelven?

meno predominante, ya que la influencia aumenta respecto a una zona determinada y por consecuencia disminuye a las otras zonas; esto se muestra en la **figura 2**. Como se ha visto, las características de cualquier recinto acústico varían dependiendo de sus dimensiones físicas, por lo tanto existe una cierta cantidad de nodos donde se observan uniones positivas y destructoras de las ondas, y que alterarán las configuraciones de reverberación, eco, aumento de la ganancia relativa de la frecuencia, tiempo de decaimiento y atenuación de la señal, tal como se muestra en la **figura 3**.

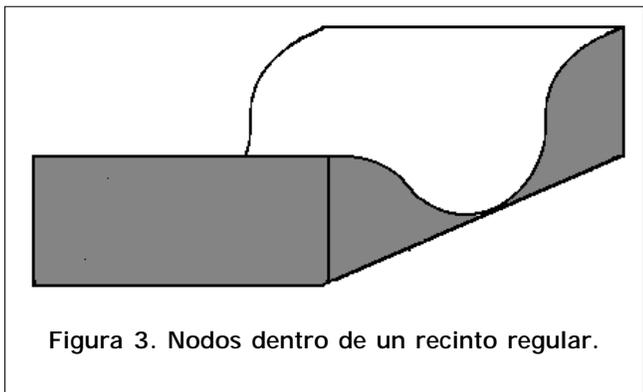
No está de más tener una aproximación de la cantidad de nodos que existen en un recinto a una frecuencia dada, esto se calcula con la siguiente ecuación.

$$N = (4 \text{ pvl}^3)(\text{nic})^3 + (\text{psl}^4)(\text{n/c})^2 + (E/8)(\text{n/c})$$

Sin embargo, sería más útil conocer la cantidad de nodos existentes para un ancho de banda, por lo que:

$$DN = (4 \text{ pv}(\text{n/c})^3 + (\text{pis})(\text{nic})^2 + (E18)(\text{nic}))(\text{Dnin})$$

Con esto es posible tener una aproximación de donde ubicar los resonadores y atenuadores necesarios para uniformizar el recinto. Pero lo expuesto hasta el momento no es suficiente para la evaluación de un sistema acústico y consecuentemente su corrección, por consiguiente se tienen que hacer me-



### **1.- Inducciones por la Red Eléctrica**

Esto se identifica por un ligero zumbido constante que es característico de la alimentación eléctrica, este zumbido se detecta a través de mediciones constantes, con diferentes condiciones hasta detectar la fuente y aislar la inducción.

### **2.- Exceso de Nivel de Ruido del Medio Ambiente**

Esto se percibe durante la medición, creciendo más rápidamente que otro ruido y con componentes espectrales de todas las frecuencias audibles (ruido rosa), lo que más deteriora la señal. Para aislar este tipo de ruido, se deben instalar cancelas y reforzar las puertas y ventanas logrando con esto el objetivo

### **3.- Reverberación Excesiva**

Se detecta cuando se presenta el fenómeno de prolongación de la energía después de haberse emitido un sonido, que es fácilmente identificable por la prolongación de cualquier fonema por más de 3 ms. Para corregir este defecto es necesario hacer un estudio acústico para encontrar las absorciones necesarias que permitan arreglar el recinto, de acuerdo con las técnicas tradicionales.

### **4.- Modos Normales de Oscilación Destacados**

(MNO). Se descubre cuando el sonido de las palabras producidas por un individuo o sistema, se van convirtiendo a través de los diferentes ciclos de su emisión en sonidos metálicos hasta que finalmente solo se pueden escuchar sonidos de frecuencias definidas. Para la corrección de este defecto acústico se debe de hacer un barrido de frecuencias, para determinar la frecuencia de re-

sonancia, con este dato se puede calcular la frecuencia del resonador absorbente con el cual se resuelve el problema, así como la ganancia relativa de la frecuencia para cuantificar la absorción que debe de tener el resonador, en función de la absorción promedio del recinto.

### **5.- Defectos de Forma (Distorsión)**

Este defecto es consecuencia de los (MNO), y provoca la distorsión del sonido haciéndolo ininteligible, según sea el grado de distorsión. Su solución esta dada de igual manera como se expresa en el punto anterior, con la única variante de que se define el lugar donde se ubican estos resonadores absorbentes.

### **Elementos Acústicos**

Se consideran elementos acústicos a resonadores, filtros silenciadores, baffles, cancelas, barreras acústicas, y por lo tanto para estudio se pueden dividir en dos grupos.

- 1.- Para el caso de los resonadores, filtros, baffles, se tiene por objetivo encontrar las frecuencias características de trabajo, para comprobar su diseño y funcionamiento. Además se obtienen las constantes de amortiguamiento  $K_n$ , factor de calidad  $Q$  y su ancho de banda  $A_f$ .
- 2.- Para el caso de cancelas y barreras acústicas, se hace un barrido en frecuencia para encontrar sus debilidades de aislamiento acústico, con el fin de reforzar y de tener el aislamiento deseado, también se obtiene la constante de amortiguamiento  $K_n$ , factor de calidad  $Q$  y su ancho de banda  $A_f$ .

### **Instrumentos Musicales y Equipos de Sonido**

Con este tipo de instrumentos y equipo de sonido, se hace la evaluación de la calidad del sonido, para comprobar su diseño o simplemente clasificar comparativamente su calidad entre varios para su selección. Esto puede ser evaluado con acoplamientos completos de micrófono preamplificador, amplificador, bocina aisladamente a amplificadores o parejas de micrófono-bocina. Así se puede hacer un barrido en frecuencia, para localizar las frecuencias de resonancia en cada uno de estos acoplamientos electro-mecánico-acústicos, y revelar si existen configuraciones de las distribución de estas frecuencias, resultado de una afortunada o desafortunada compensación en la respuesta de frecuencia total.

Para el caso especial de los instrumentos musicales, también se buscan las frecuencias de resonancia para observar el comportamiento total de los resonadores, membranas, cuerdas etc. En ambos casos se cuantifica la ganancia relativa de frecuencia, la constante de tiempo a  $-60\text{dB}$ , frecuencias de resonancia, factor de amortiguamiento  $K_n$ , factor de calidad  $Q$  y ancho de banda  $A_f$ .

### **Medios de Comunicación**

En forma parecida a los recintos acústicos, los medios de comunicación pueden ser evaluados en su calidad total con los siguientes puntos:

- 1.- Inducciones de la red eléctrica.
- 2.- Exceso de ruido en la transmisión o propagación.
- 3.- Distorsión exagerada.

4.- Frecuencias de resonancia características del equipo.

¿Cuales son las características de cada uno de ellos, y como se resuelven?

**1.- Inducciones de la Red Eléctrica**

Este se identifica por un ligero zumbido constante, que es característico de la alimentación eléctrica, este zumbido se detecta y se elimina mediante constantes mediciones en diferentes condiciones, hasta detectar la fuente y aislar la inducción.

**2.- Exceso de Ruido de Transmisión o Propagación**

Este se detecta en la medición, ya que crece más rápidamente que otros defectos en la transmisión, es el que primero deteriora la señal; una vez identificado se procederá a su solución, dependiendo el tipo de equipo que se esté trabajando.

**3.- Distorsión Exagerada**

Esa es posible detectarla en las mediciones, ya que deteriora la señal, provocando la pérdida del timbre de la voz. Para su corrección se debe de mejorar la respuesta en frecuencia del equipo.

**4.- Frecuencias de Resonancia Características del Equipo**

Se descubren cuando el sonido de las palabras producidas, por un individuo, se van convirtiendo a través de los diferentes ciclos de su emisión en sonidos metálicos, y que finalmente solo se pueden escuchar sonidos de frecuencias definidas.

Para la corrección de este defecto acústico, se debe de hacer un barrido de frecuencias; para determinar la

frecuencia de resonancia, se calcula la ganancia relativa de frecuencias, el factor de amortiguamiento  $K_n$ , factor de calidad  $Q$  y ancho de banda  $\Delta f$ , en cada etapa del sistema para hacer la corrección técnica necesaria.

**Descripción del Modelo**

De acuerdo con lo anteriormente expresado, se puede concluir que el modelo de evaluación acústico debe estar diseñado para evaluar las distintas características de los sistemas acústicos mencionados con anterioridad. Ya que el modelo de evaluación es completamente digital, este debe de ser sumamente amigable, y contener las siguientes funciones de evaluación:

- 1) Evaluación Acústica.
- 2) Modos normales de oscilación destacados.
- 3) Ganancia relativa de frecuencia.
- 4) Factor de amortiguamiento.
- 5) Reproducción de defectos.
- 6) Análisis de Fourier (FFT).
- 7) Generador de señales.

A continuación, se describen las operaciones que pueden realizarse con la ayuda de este modelo.

**1.- Evaluación Acústica**

Con esta prueba se evalúa la calidad total del siste-

ma, ya que permite detectar el total de información que se pierde al propagarse en un medio (recinto acústico). Esto es debido a que el defecto tiene la característica de aumentar potencialmente con el número de veces que se repite una palabra o frase continuamente.

**2.- Modos Normales de Oscilación Destacados**

Bajo esta prueba se pueden obtener los modos normales de Oscilación de cualquier sistema acústico, electrónico o mecánico; así se pueden detectar los defectos en recintos acústicos y sistemas de comunicación; virtudes, como en instrumentos musicales y filtros pasa banda, e inclusive las debilidades de barreras acústicas y cancelles.

Para su evaluación se puede ejemplificar la **figura 4**. Una vez que se han encontrado los modos normales de oscilación, este modelo tiene métodos de reproducción total o parcial, que permiten estudiar el comportamiento en detalle, para medir la ganancia, constante de amortiguamiento  $K_n$ , factor de calidad  $Q$  y

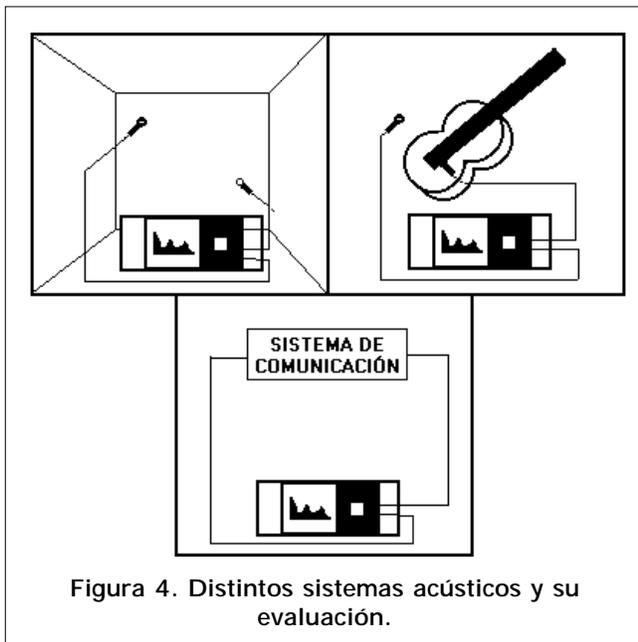
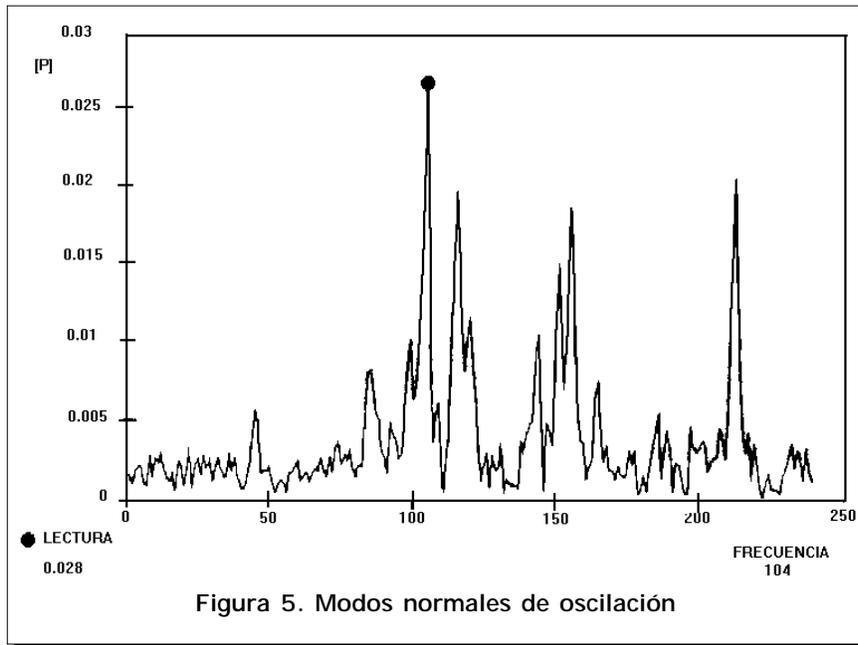


Figura 4. Distintos sistemas acústicos y su evaluación.



ancho de banda presentando los resultados en una gráfica en pantalla o por impresora, como puede verse en la **figura 5**.

### 3.- Ganancia relativa de Frecuencia

La ganancia relativa de frecuencia de un sistema que tiene una respuesta característica en frecuencia, es una constante adimensional, que expresa la relación en los valores de respuesta de los módulos de una señal senoidal a una frecuencia  $f$ , a la cual se desea conocer su promedio unitario.

Cuando el promedio del modulo de esta señal de entrada se mantiene unitario, el valor del modulo de la respuesta de frecuencia fija representa el valor de la ganancia del sistema a esta frecuencia  $f$ , en caso contrario esta opción permitirá calcular el resonador y absorbedor adecuados para ajustar el sistema a nuestras necesidades.

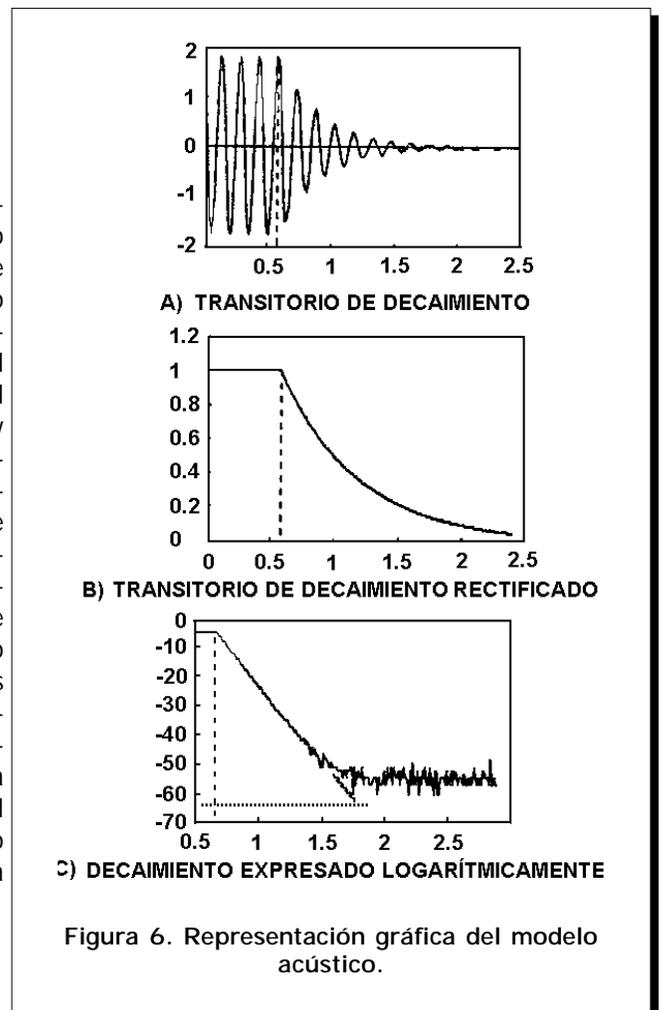
### 4.- Factor de Amortiguamiento

Con esta opción del modelo acústico es posible calcular el tiempo que tarda en amortiguarse una señal cualquiera hasta el nivel de  $-60\text{dB}$ , y se puede representar a través de distintas gráficas que permitirían visualizar completamente los factores de amortiguamiento de cada una de las frecuencias involucradas en el análisis, así como la constante general del sistema, como se muestra en la **figura 6**.

### 5.- Reproductor de Defectos

El sistema de evaluación tiene la capacidad de repetir indefinidamente la señal sonora retroexcitada, propia del sistema acústico a través del mismo medio que los produjo, para sostener el régimen característico, y poderlo estudiar cuidadosamente.

El programa que produce este efecto con la señal propia del sistema es fácil de usar, ya que después de que ha producido el ultimo ciclo de trabajo con la opción (2), el aparato queda preparado para producir este efecto especial.



### 6.- Analizador de Fourier

En caso especial de la operación (Modo de Oscilación) se puede utilizar un analizador de Fourier, alimentando por su entrada una señal cualquiera (voz, ruido, tonos etc.), obteniendo en su salida las componentes espectrales de la señal y observando en una gráfica la distorsión producida por el sistema (convolución), para esto se usará el algoritmo de la transformada rápida de Fourier (FFT), dentro del rango audible de 20 a 20000 Hz con la capacidad de selección del número de muestras, que va de 512, 1024, 2048 a 4096 muestras para el análisis.

### 7.- Generador de Señales

Como se ha visto, en muchas de las distintas evaluaciones se debe hacer un barrido en frecuencia; por lo tanto, para ser congruente con las necesidades, se tiene integrado este generador, el que permite que el sistema tenga un mayor potencial de trabajo. El tipo de señal que puede generar es:

- A) Pulso de ruido en banda ancha normalizado.
- B.) Muestra de voz normalizada.
- C) Senoidales en cualquier frecuencia, con una definición de 1 Hz en la banda de 1 a 2000 Hz, y de 2 Hz en la banda de 2001 a 20000 Hz.
- D) Señal cuadrada.

De esta manera se cuenta con un equipo bastante eficaz y flexible para el trabajo de evaluación.

Hasta este punto se han mencionado las funciones que desarrolla el modelo, pero falta detallar cuales son las características del Hardware, cual es su velocidad de trabajo etc.

El modelo trabaja con un microprocesador 80C188EB de INTEL, opera a una velocidad de 16 MHz y dispone de dos canales de muestreo, que pueden trabajar con una frecuencia de muestreo de 0.25 Hz hasta los 20 KHz, sobre un rango de 5 Volts positivos y negativos; dichos canales de muestreo tienen una definición de 12 bits, lo que nos permite hacer divisiones de 1/4096 de señal.

Además se dispone de un banco de memoria de 256 Kb que permite respaldar la información obtenida durante alguna opción, y con una batería que puede mantenerla activa hasta 10 años, imprimir la información en una impresora de matriz de puntos y comunicarse vía puerto de comunicaciones con otras computadoras facilitando aún más el manejo de información. Por otro lado, el sistema cuenta con una pantalla de cristal líquido (LCD), con una resolución de 620\*200 puntos de imagen; para que el usuario observe las gráficas de los resultados en sus distintas modalidades, así como las señales de entrada.

### Características del Sistema

El diseño está constituido por una tarjeta madre, un subsistema de alimentación y dos acoplamientos (para entrada y salida, respectivamente), en forma analógica.

En la **figura 7** se muestra el diagrama del 80C188EB, conjuntamente con su lógica de interfaces, así como el subsistema de memoria y control de despliegue de cristal líquido.

El procesador 80C188EB forma parte de la línea de microcontroladores de INTEL (Embedded Microcontroller and Processors), al cual le han sido adicionados elementos, que facilitan al diseñador el manejar subsis-

temas diversos con una cantidad mínima de componentes. Su operación, con un reloj a 16 MHz, satisface las necesidades computacionales para esta aplicación, y el hecho de ser compatible en el conjunto de instrucciones con el resto de la línea de microprocesadores 80X86 de INTEL, facilita el diseño de software de aplicación, que se presenta en la **figura 7**.

En resumen el microprocesador integra:

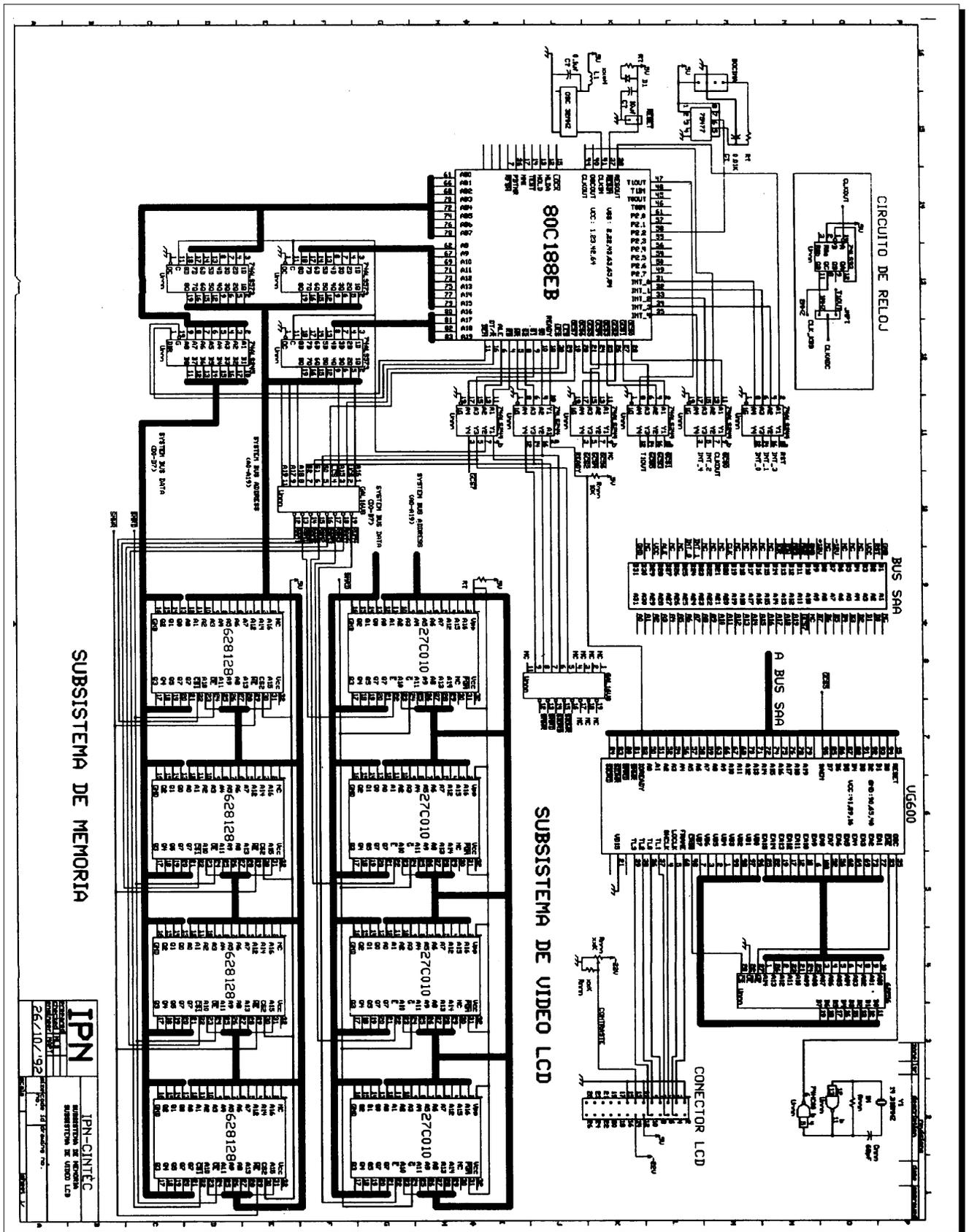
- 7 Líneas de Interrupciones
- 3 Canales de Timer/Count
- 2 Canales de comunicación serie
- 10 Líneas de salida para "Chip Select"
- 1 Unidad de puertos I/O
- 1 Unidad de control de refresco de memoria
- 1 Unidad de control de alimentación.

El subsistema de periféricos para esta aplicación se ajustó de tal modo que fuese 100% compatible. Esto permitirá el desarrollo de rutinas, tanto de graficación, como de comunicaciones que se enlacen con periféricos convencionales.

Su potencial permite utilizarlo como sistema de adquisición remoto, usando un 'MODEM' para transmitir la información por telefonía digital.

En la figura 8 se describe el sistema de adquisición y salida de señales, así como las fuentes de voltajes de referencia para los ADC's y DAC's.

La conversión analogico-digital es efectuada por dos dispositivos ADC 912 de Precision Monolithics Inc.. Estos son convertidores de 12 bits, que operan con base en un proceso de aproximación sucesivas.





La conversión digital-analógica corre por cuenta de un convertidor dual, el dispositivo DAC8248, de Precision Monolithics, Inc. El dispositivo es del tipo multiplicador, puede ser utilizado para la multiplicación en cuatro cuadrantes con el circuito que se indica en la **figura 8**.

El DAC8248 incorpora un doble registro para cada uno de los convertidores, por lo que es posible su escritura secuencial y la habilitación simultánea de nuevos valores.

Cada proceso de conversión requiere de 13 ciclos de reloj; cuya frecuencia es de 1 MHz como máximo. Esta frecuencia puede ser generada por dos vías, la primera derivada del reloj del sistema (16MHz) y la segunda, usando el TIMER 1 del 80C188EB. Ambas opciones se encuentran provistas en el circuito impreso, seleccionables a través de un "JUMPER", y la tensión de entrada debe estar comprendida entre 0 y 10 volts (el resultado es proporcionado en forma binaria).

El procesador efectúa la conversión de complemento a dos. Los dispositivos requieren de una referencia de +5 volts, obtenida a partir del circuito de voltaje de referencia (véase **figura 8**). Desde el punto de vista del procesador, cada convertidor representa un puerto de lectura.

En otro tipo de variantes para su aplicación, se ha experimentado con

64 canales de adquisición multiplexados, donde la adquisición en tiempo real no es tan crítica.

Adicionalmente a lo antes expuesto, se cuenta con un "bus" en formato IBM PC, que permite adicionar periféricos para aumentar la potencialidad del sistema en su conjunto. Para este mismo "bus", se diseñó una tarjeta que reporta errores al momento de ejecución del sistema, con lo cual se facilita la detección de fallas.

Tal ha sido el caso, como incluir "BREAK POINTS" que indican el avance en la ejecución del software residente. Un ejemplo significativo sería que el microprocesador reporte una verificación exitosa o no, de la RAM, antes de continuar la inicialización del resto del sistema.

### Software

El sistema básico de entrada salida contiene, además de las rutinas de control de despliegue y periféricos, las rutinas para cálculo de la Transformada Rápida de Fourier, cálculo de la Magnitud Cuadrada y la Magnitud del espectro.

En síntesis, el presente producto forma una plataforma para máquinas dedicadas a control y procesamiento digital de señales.

---

### Bibliografía

---

- [1] Lindig, M., Sánchez, E., Poujol, F. y Chavez, M. *"Un sistema de Procesamiento de Señales de Vibración"*. Polibits, CINTEC-I.P.N., Núm. 5, enero-marzo 1990, p.p. 3-13.
- [2] Lindig, M. y Partida, M., *"Una Tarjeta Controladora basada en el 80188"*, Polibits, CINTEC - I.P.N. Núm. 5, enero-marzo 1990, p.p. 56-69.
- [3] Lindig, M., *"Una Microcomputadora para el Análisis de Señales"*, Boletín de Graduados e Investigación I.P.N., Núm. 8, julio-agosto 1982, p.p. 54-82
- [4] Lindig, M., *"Diseño de un Filtro Digital Programable para Procesamiento de Señales Biológicas en Tiempo Real"*, Tesis de Maestría, División de Estudios Superiores, Facultad de Ingeniería, UNAM, enero de 1979.
- [5] Linear Databook. National Semiconductor Corp., 1988, p.p. 1-41. Analog Databook Precision Monolithics Inc., 1988, p.p. 12-32, 11-47.
- [6] Embedded Microcontrollers and Processors, Volume II. Intel, 1992, p.p. 24-75a, 24-819.