

ALTAVOZ PIEZOELECTRICO

GUILLERMO COLOMERO¹ Y GUILLERMO SOSA¹

¹Estudiante de Ingeniería Electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba (UTN. FRC), Maestro López Esq. Cruz Roja Argentina. CP X5016ZAA. Córdoba, Argentina.

guillecolo@gmail.com, guillems22@gmail.com

Resumen – La piezoelectricidad es un fenómeno presentado por determinados cristales que, al ser sometidos a tensiones mecánicas, adquieren una polarización eléctrica en su masa, apareciendo una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie. Este fenómeno también se presenta a la inversa, esto es, se deforman bajo la acción de fuerzas internas al ser sometidos a un campo eléctrico. Una vez que dicho campo desaparece, los cristales recuperan su forma. El objetivo del presente trabajo es describir las características generales de los altavoces piezoeléctricos detallando modelos matemáticos, eléctricos y aplicaciones; logrando comprender el funcionamiento de los mismos, la manera en la que emiten sonido, su respuesta en frecuencia, el nivel de presión sonora y sus diferentes tipos constructivos.

1. INTRODUCCIÓN

La propiedad de la piezoelectricidad fue observada por primera vez por Pierre y Jacques Curie en 1881 estudiando la compresión del cuarzo. Al someterlo a la acción mecánica de la compresión, las cargas de la materia se separan y esto da lugar a una polarización de la carga. Esta polarización es la causante de que salten las chispas. El efecto piezoeléctrico es un proceso reversible que consiste en la deformación que sufren ciertos materiales cuando se les aplica un campo eléctrico ó viceversa, cuando al ser sometidos a tensiones mecánicas adquieren una polarización eléctrica en su masa, apareciendo una diferencia de potencial y cargas eléctricas en su superficie. Los materiales piezoeléctricos son sustancias cristalinas naturales ó sintéticas que no poseen centro de simetría (que posean disimetría) y por lo tanto que tengan un eje polar. El efecto de una compresión o de un cizallamiento consiste en disociar los centros de gravedad de las cargas positivas y de las cargas negativas. Aparecen de este modo dipolos elementales en la masa y, por influencia, cargas de signo opuesto en las superficies enfrentadas. De las 32 clases cristalinas, 21 no tienen centro de simetría. Todas estas clases menos una tienen la propiedad piezoeléctrica en mayor o menor medida. Los gases, los líquidos y los sólidos con simetría no poseen piezoelectricidad. Pueden distinguirse dos grupos de materiales: los que poseen carácter piezoeléctrico de forma natural (cuarzo, turmalina) y los llamados ferroeléctricos, que presentan propiedades piezoeléctricas tras ser sometidos a una polarización (tantalio de litio, nitrato de litio, berilita en forma de materiales monocristalinos y cerámicas o polímeros polares bajo forma de microcristales orientados). Sustancias cerámicas como el titanio de bario o algunos plásticos altamente polimerizados, pueden

ser mucho más efectivos para el desarrollo de los mismos[1]. El principio de funcionamiento de los altavoces piezoeléctricos es un innovador método en la utilización de oscilación natural de los elementos cerámicos piezoeléctricos. Actualmente, los altavoces piezoeléctricos se utilizan de muchas maneras, aplicándose ampliamente en alarmas, timbres telefónicos, transmisores, receptores, entre otros [2].

2. ALTAVOZ PIEZOELECTRICO

Los cristales piezoeléctricos pueden ser de dos tipos: monomórficos, constituidos por un solo cristal o cerámica; y bimórficos, constituidos por dos placas cerámicas superpuestas y de comportamiento contrario, de modo que una se dilata y la otra se contrae. Esta configuración *push-pull* se muestra en los dos altavoces de la Figura 1a [1]. El alto valor de impedancia mecánica de las sustancias minerales restringe su uso a la banda de altas frecuencias. El *tweeter* de bocina de la Figura 2 es la aplicación más extendida de los altavoces piezoeléctricos. Está formado por un disco circular unido a una pequeña bocina. Para aumentar el rendimiento, se aprovecha la vibración máxima en el centro del disco, donde se conecta la membrana como se ve en la Figura 1a [1]. Con esta configuración se consigue una respuesta axial de 4 a 20 kHz sin la necesidad de un filtro separador de vías, ya que, debido al alto valor capacitivo del cristal, se eliminan las bajas frecuencias [1].

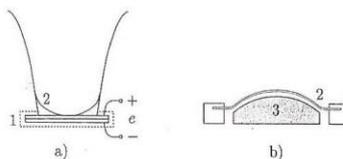


Figura 1: a) Cristal piezoeléctrico *push-pull* acoplado a una pequeña bocina. b) Altavoz cerámico de cúpula. 1: cristal, 2: diafragma, 3: espuma amortiguadora.



Figura 2: *Tweeter* de bocina.

Por otro lado, existen también altavoces piezoeléctricos de cúpula, tal como se muestra en la Figura 1 b. Están constituidos por una película piezoeléctrica metalizada por las dos caras en forma de cúpula. La vibración se traduce en un cambio de curvatura que provoca que se aproxime al modelo de esfera pulsante [1].

Otras configuraciones, como la de cilindros pulsantes en los que la pared del cilindro es un plástico arrollado, llegan a radiar por encima del margen audible y, por lo tanto, son usados como transductores de ultrasonidos [1].

3. FUNCIONAMIENTO

Básicamente, la fuente que origina el sonido de un componente de sonido piezoeléctrico es un diafragma piezoeléctrico. Este consiste en una placa de cerámica piezoeléctrica que tiene electrodos en ambos lados y una placa de metal (latón o acero inoxidable, etc.) que se puede apreciar en la Figura 3.

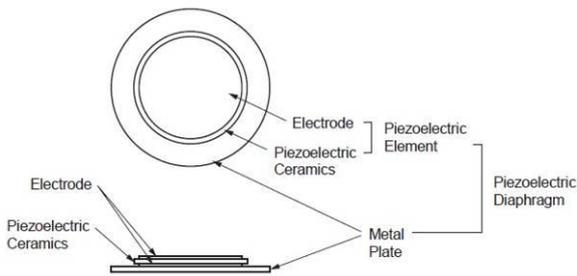


Figura 3: Estructura de la membrana piezoeléctrica.

Aplicando tensión continua entre los electrodos, se produce una distorsión mecánica debido al efecto piezoeléctrico, que se manifiesta como una deformación del diafragma el cual se expande en una dirección radial. La polarización de los electrodos produce una expansión o contracción del elemento piezoeléctrico, efecto que se puede distinguir en la Figura 4. La placa metálica unida al elemento piezoeléctrico no se expande o contrae. Así, cuando un voltaje de corriente alterna se aplica a través de los electrodos, podemos observar en la Figura 4 a y 4 b una flexión. Este mismo efecto lo observamos en la Figura 4 c produciendo ondas de sonido en el aire [2].

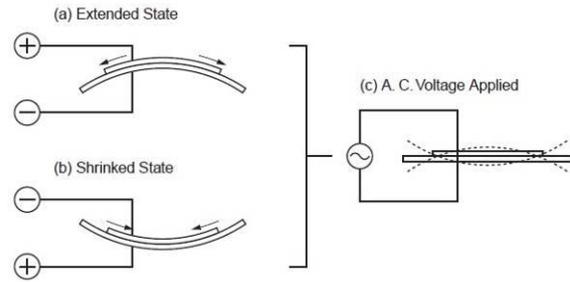


Figura 4: Sistema oscilante de un diafragma piezoeléctrico.

4. PROCEDIMIENTOS DE DISEÑO

En general, el rango de frecuencia audible del hombre es de 20 Hz a 20 kHz. El rango de frecuencias comprendido entre 2 a 4 kHz es el de mayor sensibilidad. Por esta razón, los componentes de sonido piezoeléctricos se utilizan en esta gama de frecuencias, y la frecuencia de resonancia (f_0) se selecciona generalmente en el mismo rango también. La frecuencia de resonancia involucra en su ecuación al módulo de Young o módulo de elasticidad longitudinal, que es un parámetro que caracteriza el comportamiento de un material elástico, según la dirección en la que se aplica una fuerza [2].

En la Figura 5 se ilustra los métodos utilizados para apoyar el diafragma piezoeléctrico el cual depende de frecuencia resonante.

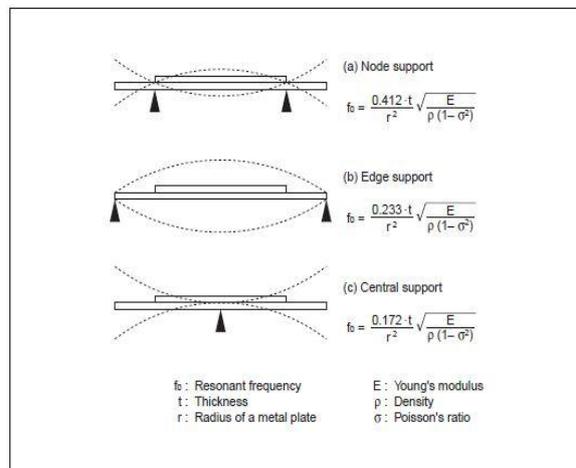
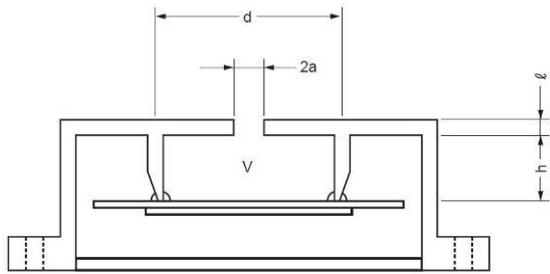


Figura 5: Método de apoyo

En general, el diafragma piezoeléctrico está instalado en una cavidad para producir un sonido de alta presión (Figura 6). La frecuencia de resonancia (f_{CAV}) de la cavidad en la Figura 6 se obtiene de la ecuación (1) (Fórmula Helmholtz). Dado que el diafragma piezoeléctrico y la cavidad tienen adecuadas frecuencias resonantes, (f_0) y (f_{CAV}) respectivamente, la presión de sonido en frecuencias específicas puede ser aumentada y un ancho de banda determinado puede ser proporcionado por el control de ambas posiciones [2].



$$f_{cav} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{\pi a^2}{V(\ell + 1.3a)}} = \frac{c}{2\pi} \sqrt{\frac{4a^2}{d^2 h(\ell + 1.3a)}} \dots (1)$$

f_{cav} : Resonant freq. of a cavity (Hz) d : Diameter of a supporting rim (cm)
 c : The speed of sound (cm/sec) h : Depth of a cavity (cm)
 a : Radius of sound emitting hole (cm) ℓ : Wall thickness of a cavity (cm)

Figura 6: Vista seccional de la cavidad.

4.1. Acondicionamiento

El procedimiento de accionamiento para componentes de sonido piezoeléctricos incluye: a) el método unidad externa y b) método de auto unidad como se muestra en la Figura 7.

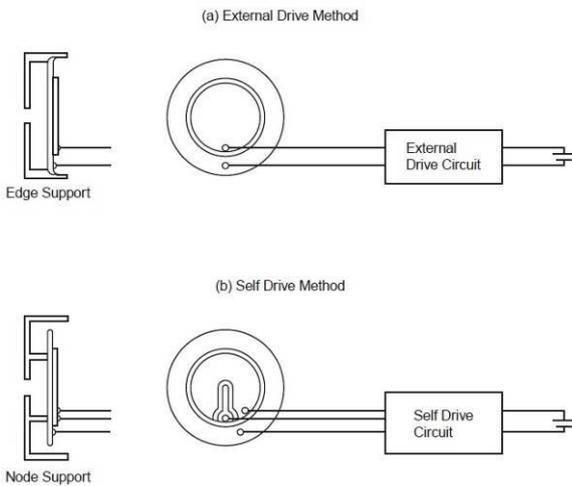


Figura 7: Vista de los acondicionamientos.

4.2. Método de unidad externa

Este método produce sonido por la conducción del diafragma piezoeléctrico con señales eléctricas suministradas a partir de un circuito externo oscilante como un multivibrador. El uso de este método, hace que el zumbador piezoeléctrico funcione como un altavoz. En este método, un mecanismo de oscilación Q_m del diafragma piezoeléctrico se amortigua adecuadamente para proporcionar una banda de frecuencia más amplia. Es aplicado en conmutación de electrodomésticos, aparatos de oficina, alarmas de los relojes digitales y los sonidos múltiples, como los utilizados en los juegos electrónicos. Este método también se emplea en los timbres, transmisores, receptores de aparatos telefónicos, radios y altavoces de televisores. Las Figuras 8 a y b muestran ejemplos del circuito donde se aplica el método de unidad

externa, representando el diafragma piezoeléctrico conectado a teléfonos.

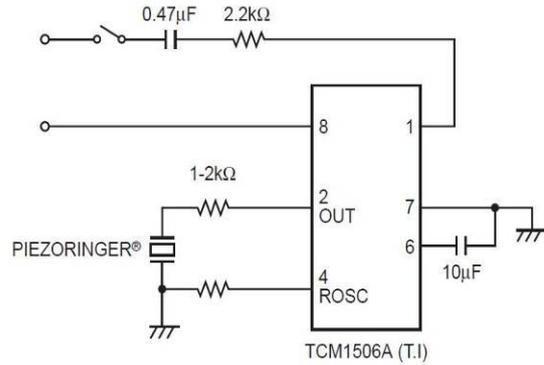


Figura 8 a: Circuitos de excitación externos.

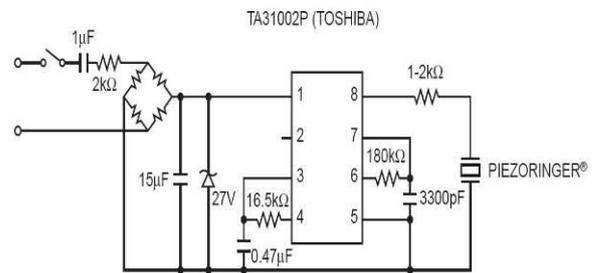


Figura 8 b: Circuitos de excitación externos.

Aplicaciones del método de unidad externa

1) Las cargas eléctricas acumuladas en el diafragma piezoeléctrico debido al choque térmico y mecánico puede causar alto voltaje que puede destruir el circuito integrado tipo LSI (en inglés *Large Scale Integration*). Para evitar este inconveniente se utiliza el método de control en el cual se coloca dos diodos zener como se muestra en la Figura 9.

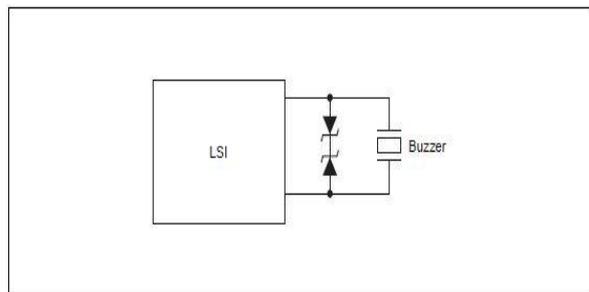


Figura 9: Arreglo de diodos.

2) La aplicación de voltaje de corriente continua (DC) para el diafragma piezoeléctrico en el entorno de alta humedad provoca la migración de Ag. Por lo tanto, es necesario diseñar un circuito que no requiere tensión de corriente continua.

3) Considerar los siguientes puntos en la conexión de un circuito integrado (IC) de timbre piezoeléctrico.

- Usar condensadores externos y resistencias, especialmente cuando la frecuencia de llamada se cambia mediante el ajuste de resistencia variable, el tono puede ser distorsionado.
- Timbre circuitos integrados, estos son producidos por muchos fabricantes, y tienen características diferentes. Cuando se utiliza un circuito integrado de timbre, es necesario consultar las hojas de datos de los altavoces para su correcta utilización.
- Si el tono está distorsionado, y se tiene una configuración como se describe en la Figura 10 a, es necesario colocar una resistencia en serie para variar la resistencia tal como se describe en la Figura 10 b, y así seleccionar una resistencia con la que puede eliminarse la distorsión. La resistencia que se recomiendan está en un rango entre 1 kΩ a 2 kΩ. Alternativamente, se recomienda colocar un diodo en paralelo con el timbre piezoeléctrico como se distingue en la Figura 10 c.

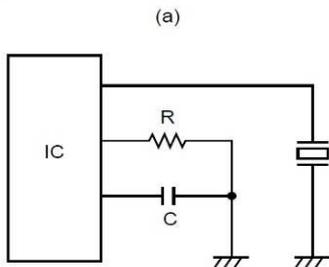


Figura 10 a: Diagrama esquemático

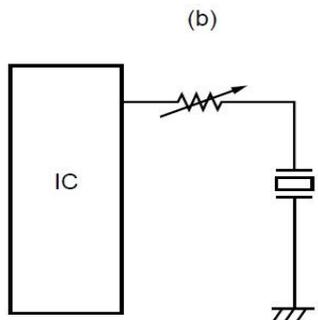


Figura 10 b: Diagrama esquemático

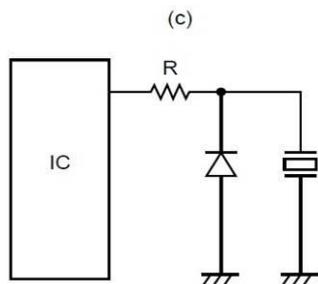


Figura 10 c: Diagrama esquemático

4.3 Método auto unidad

La Figura 11 muestra una aplicación típica del método de auto unidad. El diafragma piezoeléctrico provisto de electrodos de retroalimentación está incorporado en el bucle cerrado de un circuito de oscilación tipo Hartley. Cuando la frecuencia está cercana a la frecuencia de resonancia, el circuito satisface las condiciones oscilantes, y el diafragma piezoeléctrico es impulsado con la frecuencia de oscilación. Es un circuito simple que consta de un transistor y tres resistencias para producir la oscilación del diafragma.

En general, el método de apoyo que se muestra en la Figura 5 es popular en el método de auto unidad.

Con una resonancia apropiada del diafragma piezoeléctrico por el nodo de apoyo, proporciona una oscilación estable con alta vibración mecánica Q_m y un solo tono de alta presión.

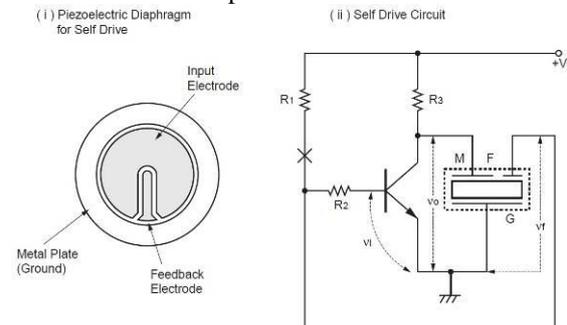


Figura 11: Circuito auto unidad

Las condiciones básicas de oscilación de este circuito se muestran a continuación:

- Diferencia de fase entre V_O y V_f debe ser de 180 grados.
- Las siguientes condiciones deben cumplirse:

$$v_f / v_o \geq \frac{R_2 + h_{ie}}{h_{fe} \cdot R_3}$$

donde:

h_{ie} : impedancia de entrada del transistor.
 h_{fe} : amplificación de corriente.

- Establecer R_1 de modo que el punto de polarización de CC del transistor sea para MES.
- Ajuste R_2 de manera que la oscilación espuria no se aplica a las ondas oscilantes.

4.4 Uso del método de auto unidad

- 1) Cuando el zumbador piezoeléctrico está ajustado para producir sonidos intermitentes, el sonido puede ser escuchado de forma continua, incluso cuando el circuito de auto accionamiento se pone en ON / OFF en la "X" punto que se muestra en la Figura 11. Esto es debido a la insuficiencia de apagar la tensión de realimentación.

- 2) El hfe del transistor y constantes del circuito están diseñados para asegurar la oscilación estable de la sonda piezoeléctrica.
- 3) El diseño de conmutación asegura la conmutación de alimentación directa.
- 4) El circuito de auto excitación ya está contenido en el zumbador piezoeléctrico. Así que no hay necesidad de preparar otro externo.
- 5) Tensión nominal (3,0 a 20 Vcc) debe ser mantenida. Hay productos que pueden funcionar con una tensión superior a 20 Vdc.
- 6) No colocar las resistencias en serie con la fuente de alimentación, ya que esto puede causar la oscilación anormal. Si un resistor es esencial para ajustar la presión de sonido, colocar un condensador (aproximadamente 1μF) en paralelo con el zumbador piezoeléctrico como se muestra en la Figura 12.

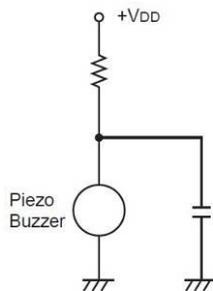


Figura 12: Zumbador en paralelo con condensador

- 7) No cerrar el agujero de sonido en el lado frontal de la carcasa.
- 8) Tener cuidado al instalar el zumbador piezoeléctrico considerando que no hay ningún obstáculo colocado dentro de 15 mm desde el orificio de liberación de sonido en el lado frontal de la carcasa.

5. AUMENTO DEL NIVEL DE PRESIÓN SONORA

El nivel de presión sonora (SPL) de transductores electroacústicos tipo piezoeléctrico es mayor que el nivel de tensión de entrada, ya que los componentes piezoeléctricos de sonido son impulsados por el voltaje. La relación entre el SPL y la el nivel de tensión de entrada se muestra en la formula siguiente [2]:

$$\text{SPL luego de aumentar el voltaje de entrada} = \text{Anterior SPL} + 20 \log(V_2/V_1)$$

V1: tensión de entrada anterior

V2: incremento de la tensión de entrada

Por lo tanto, el SPL se incrementa en 6 dB con el doble de la tensión de entrada. La Figura 13 representa el SPL en función de la frecuencia para PKLCS1212E4001-R1 de la firma MURATA Manufacturing Company en el que la tensión de

entrada es variada. Podemos ver que el SPL incrementa en 6 dB cuando la tensión de entrada es dos veces más grande.

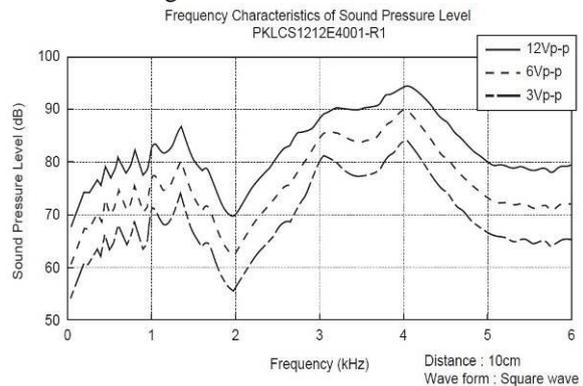


Figura 13: Respuesta de frecuencia vs. SPL.

6. PROCEDIMIENTO DE MEDICIÓN

6.1 Medición de la frecuencia resonante e impedancia de resonancia.

Cuando el diafragma piezoeléctrico oscila libremente en el aire, el nodo se mueve como se muestra en la Figura 14 [2].

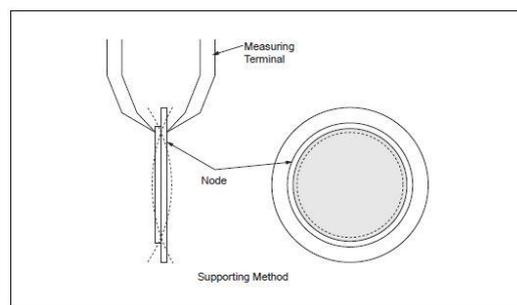


Figura 14: Medición de la membrana piezoeléctrica

La frecuencia de resonancia (f_0) y la impedancia resonante (R_0) se miden en el circuito de corriente constante, como se muestra en la Figura 15.

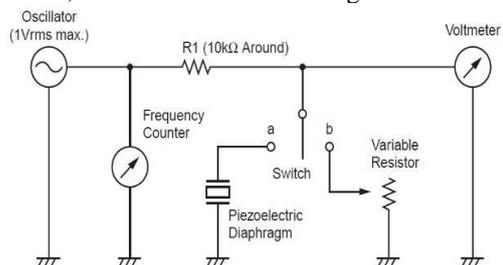


Figura 15: Medición de puesta en marcha de frecuencia resonante e impedancia de resonancia.

Procedimiento de medición

- 1) Conectar el interruptor en el lado "a" y ajustar la frecuencia del oscilador de leer la frecuencia y el voltaje cuando el voltímetro indica un valor mínimo.

- 2) A continuación conectar el interruptor en el lado "b" y variar la resistencia variable a tener el mismo voltaje como en 1). Después lee el valor de la resistencia.
- 3) La frecuencia de resonancia (f_0) puede obtenerse a partir de 1) y la impedancia resonante (R_0) desde 2). La medición real se realiza utilizando una unidad de medición de acuerdo con los principios anteriores.

7. CUATRO PRINCIPIOS BASICOS

Los altavoces piezoeléctricos tienen un principio de funcionamiento totalmente diferente a los altavoces electrodinámicos. No tienen bobina, ni campo magnético ni gran consumo de corriente. Por lo tanto el primer principio: "No hay campo electromagnético" [3].

El corazón de cada altavoz piezoeléctrico es un disco cerámico que interactúa cuando percibe una diferencia de potencial.

Un aumento en la amplitud de Vpp (tensión pico a pico) implica un aumento en la deformación y por lo tanto, un aumento en el sonido de salida como se muestra en la Figura 16. Entonces, el segundo principio se puede enunciar: "Interacción con tensiones variables" [3].

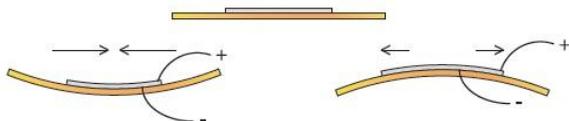


Figura 16: Deformación con tensión variable.

Los altavoces piezoeléctricos tienen un circuito electrónico equivalente complejo, pero se pueden considerar principalmente como una carga capacitiva con valores entre los 10 nF y 1 uF, ver Figura 17.

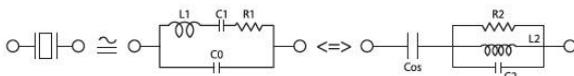


Figura 17: Circuito equivalente.

El valor de la capacidad es una importante característica para el circuito amplificador del altavoz. Con lo cual, el tercer principio: "Altavoz piezoeléctrico significa carga capacitiva" [3].

Debido a que los altavoces piezoeléctricos actúan principalmente como una carga capacitiva, la impedancia compleja disminuirá con un aumento de la frecuencia. La reactancia capacitiva es una función asintótica, ver Figura 18.

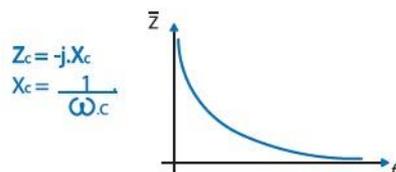


Figura 18: Reactancia capacitiva.

La mayoría de los circuitos integrados amplificadores están desarrollados para altavoces electrodinámicos. Pueden entregar altas variaciones de corriente y están limitados a un nivel de tensión de +/- 10 Vpp.

Los altavoces piezoeléctricos requieren variaciones de tensión. El consumo de corriente es extremadamente bajo y la tensión pico a pico puede llegar a 60 Vpp. El cuarto principio: "Un amplificador de audio es necesario" [3].

8. APLICACIONES

8.1 Altavoz piezoeléctrico a prueba de agua.

Algunas características de este altavoz son: disponible a prueba de agua, alta calidad de sonido y alto nivel de presión sonora, ultra fino (0,9 mm de espesor), ahorro de energía, sin imán, sin ruido electromagnético, ver Figura 19, [4].



Figura 19: Altavoz piezoeléctrico a prueba de agua.

Este tipo de altavoz se puede utilizar en teléfonos celulares, PDA, audio de estado sólido, etc.

Algunas especificaciones se muestran en la Tabla 1.

Parámetro	Valores
Rango de frecuencia nominal	200 Hz a 20 kHz
Nivel de presión sonora	92,0 dB ± 3,0 dB
Frecuencia de resonancia	1400 Hz ± 20 %
Capacidad	0,9 µF ± 30 %
Máxima tensión sinusoidal	5,0 Vrms
Temperatura de funcionamiento	-20 a + 70°C
Temperatura de almacenamiento	-30 a + 85°C

Tabla 1: Especificaciones estándar.

En la Figura 20 se observa la respuesta en frecuencia en función del nivel de presión sonora típica de este tipo de transductores.

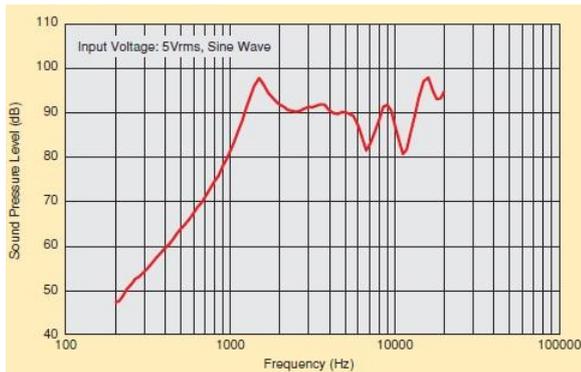


Figura 20: Respuesta en frecuencia típica en función del SPL [4].

9. CONCLUSIONES

En el presente informe técnico se describió el altavoz piezoeléctrico, el cual combina un disco piezocerámico con una membrana flexible, lo que modifica el rango de frecuencias y se incrementa el volumen del sonido. Se considera como una carga capacitiva por lo que su impedancia compleja disminuirá con el aumento de la frecuencia de trabajo, esto sucede entre los 2000 y 20000 Hz para que el oído humano pueda escucharlo. Una frecuencia superior también es utilizada en altavoces de ultrasonido.

Con un diseño adecuado puede producirse un SPL de 110 dB a 2 metros de distancia, por lo que los altavoces piezoeléctricos son especialmente aptos para alarmas y sirenas.

Técnicamente cabe mencionar que en el caso de querer utilizar un rango de frecuencias alto, *la técnica de unidad externa* es la más adecuada. Por el contrario si se desea proporcionar una oscilación estable con alta vibración mecánica Q_m y un solo tono de alta presión *el método de auto unidad* es el conveniente.

Finalmente, un altavoz piezoeléctrico posee la característica de que su SPL se incrementa en 6 dB cuando la tensión de entrada se duplica y que actúan principalmente como una carga capacitiva, la impedancia disminuirá con el aumento de la frecuencia.

10. REFERENCIAS

- [1] Basilio Pueo Ortega y Miguel Romá Romero, *Electroacústica, Altavoces y Micrófonos*. Person Prentice Hall, Madrid, 2003.
- [2] Murata Manufacturing Company Ltd., *Piezoelectric Sound Components, P15E-8*, Application Manual, Oct. Japan, 2012.
- [3] Sonitron, *Piezoelectric Speaker Technology*, Techpaper. Belgium, 2012.
- [4] Murata Manufacturing Company Ltd., *Waterproof Piezoelectric Speaker, P83E, Jul 2012, Japan*.

11. DATOS BIOGRAFICOS

Colombero Guillermo, nacido en Húinca Renanco el 23/07/1985. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina. Del 2010 a 2012 fue becario de investigación en el Centro Universitario de Desarrollo en Automación y Robótica (CUDAR), Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Sus intereses son: procesamiento digital de señales, sistemas embebidos, electroacústica, electrónica digital y telecomunicaciones. E-mail: guillecolo@gmail.com.

Sosa Guillermo, nacido en Córdoba el 22/08/1978. Estudiante de ingeniería en electrónica, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Córdoba. Argentina. Trabaja desde el 2001 a la fecha en el área informática de la Facultad de Odontología de la Universidad Nacional de Córdoba. Sus intereses son: electrónica aplicada, electrónica de potencia, sistemas de comunicaciones. E-mail: guillems22@gmail.com