

**DISEÑO E IMPLEMENTACION DE UN DISPOSITIVO PARA MEDIR
ESPESORES DE TUBERIA Y TANQUES METALICOS MEDIANTE LA
UTILIZACION DE SEÑALES DE ULTRASONIDO**

**OLARTE CORTES, WILLIAM
SILVA ORTEGA, CARLOS ARMANDO**

**UNIVERSIDAD TECNOLOGICA DE PEREIRA
FACUTAD DE CIENCIAS BASICAS
MAESTRIA EN INSTRUMENTACION FISICA
PEREIRA
2010**

1. CAPÍTULO I

1.1 Introducción

1.1.1 Antecedentes

El mantenimiento preventivo, es la actividad humana cuyo fin es asegurar la calidad del funcionamiento de bienes y servicios que proporcionan las máquinas e instalaciones, dentro de los límites presupuestados. [1]

Las actividades de mantenimiento preventivo, se programan a partir de las especificaciones o criterios que proporcionan los fabricantes, atendiendo a las condiciones del entorno de los equipos.

El eje cafetero ha tenido un desarrollo industrial significativo en los últimos años, sin embargo, en la mayoría de las pequeñas y medianas empresas, no es posible tener un presupuesto que permita la implementación de un mantenimiento preventivo y sistemático, centrando el desarrollo del mismo exclusivamente a las acciones correctivas, lo cual conlleva a pérdidas de tiempo en reparaciones de emergencia, sobrecostos de mantenimiento y lucro cesante.

Lo anterior, implica una desventaja frente a las empresas con recursos suficientes que pueden implementar estos sistemas de mantenimiento, que garantizan la confiabilidad de sus equipos de producción.

El desarrollo de tecnología de equipos de predicción de fallas por ultrasonido, es proveniente de países desarrollados, lo cual hace costosa su adquisición en el entorno nacional.

En Colombia, no hay establecidas empresas dedicadas al desarrollo de esta clase de tecnología, que permita estar al alcance de la pequeña y mediana empresa (PYMES).

Muchos de los equipos que hay en el mercado presentan los resultados de medición en forma de ondas, lo cual dificulta su interpretación; los equipos más avanzados presentan resultados en forma digital.

La tecnología actual es importada y costosa, lo que motiva el desarrollo de proyectos de apropiación de tecnología, encaminados a reducir costos en la implementación de estas aplicaciones, orientadas al medio industrial regional y nacional.

1.1.2 Objetivos

1.1.3 Objetivo General:

Construir un prototipo que permita detectar el espesor de las paredes en tuberías y tanques metálicos utilizados para el transporte y almacenamiento de fluidos, mediante la utilización de señales de ultrasonido.

1.1.3.1 Objetivos Específicos:

- Analizar un equipo importado en sus partes componentes: Circuitos modulares, procesamiento de datos y presentación de los mismos.
- Diseñar y construir los diferentes módulos requeridos para la generación de señal, recepción de señal, procesamiento de datos y presentación de resultados en un LCD, a partir de elementos de consecución nacional y con los conocimientos adquiridos durante la investigación.
- Construir software para procesar datos y presentación de los mismos al usuario.
- Comparar resultados obtenidos con el prototipo y otros equipos comerciales importados tomados como referencia.
- Demostrar en la práctica la utilización del equipo en una aplicación industrial.

1.2 Producción de una onda sonora.

Cuando se produce una perturbación periódica en el aire, se originan ondas sonoras longitudinales. Por ejemplo, si se golpea un diapasón con un martillo, durante su vibración los brazos emiten ondas longitudinales. El oído actúa como receptor de estas ondas periódicas, las cuales son interpretadas por el cerebro como sonido.

El término sonido se usa de dos formas distintas. Los fisiólogos definen el sonido en términos de las sensaciones auditivas producidas por perturbaciones longitudinales en el aire. Para ellos, el sonido no existe en un planeta distante. En física, por otra parte, se hace referencia a las perturbaciones por sí mismas y no a las sensaciones que producen.

Sonido es una onda mecánica longitudinal que se propaga a través de un medio elástico. El concepto de sonido se usará en su significado físico.

Deben darse dos factores para que exista el sonido. Es necesaria una fuente de vibración mecánica y también un medio elástico a través del cual se propague la perturbación. La fuente puede ser un diapasón, una cuerda que vibre o una columna de aire vibrando en un tubo de órgano. Los sonidos se producen por una materia que vibra.

Ahora se estudiarán más detalladamente las ondas sonoras longitudinales en el aire que proceden de una fuente vibrante. Una cuerda metálica delgada se sujeta fuertemente en sus extremos, se tira de un lugar diferente de sus extremos y luego se suelta. Al oscilar de un lado a otro con movimiento armónico simple, se propagan a través del aire una serie de ondas sonoras longitudinales periódicas que se alejan de la fuente. Las moléculas de aire que colindan con la cuerda metálica se comprimen y se expanden alternativamente, transmitiendo una onda. Las regiones densas en las que gran número de moléculas se agrupan acercándose mucho entre sí se llaman compresiones. Son exactamente análogas a las condensaciones estudiadas para el caso de ondas longitudinales en un resorte en espiral. Las regiones que tienen relativamente pocas moléculas se conocen como rarefacciones. Las compresiones y rarefacciones se alternan a través del medio, en la misma forma que las partículas de aire individuales oscilan de un lado a otro en la dirección de la propagación de la onda. Puesto que una compresión corresponde a una región de alta presión y una rarefacción corresponde a una región de baja presión, una onda sonora también se puede representar trazando en una gráfica el cambio de presión P como una función de la distancia x . La distancia entre dos compresiones o rarefacciones sucesivas es la longitud de onda.

1.3 Velocidad del sonido.

Cualquier persona que haya visto a cierta distancia cómo se dispara un proyectil ha observado el fogonazo del arma antes de escuchar la detonación. Ocurre algo similar al observar el relámpago de un rayo antes de oír el trueno. La velocidad del sonido se puede medir directamente determinando el tiempo que tardan las ondas en moverse a través de una distancia conocida. En el aire, a 0°C , el sonido viaja a una velocidad de 331 m/s (1087 ft/s).

La velocidad de una onda depende de la elasticidad del medio y de la inercia de sus partículas. Los materiales más elásticos permiten mayores velocidades de onda incluido líquidos como el agua, mientras que los materiales menos densos retardan el movimiento ondulatorio. Las siguientes relaciones empíricas se basan en estas proporcionalidades.

Para las ondas sonoras longitudinales en un alambre o varilla, la velocidad de onda está dada por la ecuación (1)

$$V = \sqrt{\frac{\gamma}{\rho}} \quad (1)$$

Donde γ es el módulo de Young para el sólido y ρ es su densidad. Esta relación es válida sólo para varillas cuyos diámetros son pequeños en comparación con las longitudes de las ondas sonoras longitudinales que se propagan a través de ellas.

En un sólido extendido, la velocidad de la onda longitudinal es función del módulo de corte S , el módulo de volumen B , y la intensidad ρ del medio.

La velocidad de la onda se puede calcular a partir de la ecuación (2)

$$V = \sqrt[2]{\frac{B + \left(\frac{4}{3}\right)S}{\rho}} \quad (2)$$

Las ondas longitudinales transmitidas en un fluido tienen una velocidad que se determina a partir de la ecuación (3)

$$V = \sqrt[2]{\frac{B}{\rho}} \quad (3)$$

Donde B es módulo de volumen para el fluido y ρ es su densidad.

Para calcular la velocidad del sonido en un gas, el módulo de volumen B está dado por la ecuación (4)

$$B = \gamma P \quad (4)$$

Donde γ es la constante adiabática ($\gamma = 1.4$ para el aire y los gases diatómicos) y P es la presión del gas. Por lo tanto, la velocidad de las ondas longitudinales en un gas, partiendo de la ecuación del fluido, está dada por la ecuación (5)

$$V = \sqrt[2]{\frac{B}{\rho}} = \sqrt[2]{\frac{\gamma P}{\rho}} \quad (5)$$

Para un gas ideal se puede calcular por medio de las ecuaciones (6) y (7)

$$\frac{P}{\rho} = \frac{RT}{M} \quad (6)$$

$$PV = nRT \quad (7)$$

Donde:

R = constante universal de los gases

T = temperatura absoluta del gas

M = masa molecular del gas

Sustituyendo la ecuación (6) en (5) nos queda

$$V = \sqrt[2]{\frac{\gamma P}{\rho}} = \sqrt[2]{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (8)$$

1.4 Sonido físico y sensación sonora

No todas las ondas sonoras pueden ser percibidas por el oído humano, de acuerdo a la relación $v = \lambda f$, el oído humano es sensible únicamente a aquellas frecuencias comprendidas entre los 20 Hz y los 20 000 Hz. En el aire dichos valores extremos corresponden a longitudes de onda que van desde 16 m hasta 1,6 cm respectivamente. En general se trata de ondas de pequeña amplitud.

Cuando una onda sonora de tales características alcanza la membrana sensible del tímpano, produce en él vibraciones que son transmitidas por la cadena de huesecillos hasta la base de otra membrana situada en la llamada ventana oval, ventana localizada en la cóclea o caracol. El hecho de que la ventana oval sea de 20 a 30 veces más pequeña que el tímpano da lugar a una amplificación que llega a aumentar entre 40 y 90 veces la presión de la onda que alcanza al tímpano. Esta onda de presión se propaga dentro del caracol a través de un líquido viscoso hasta alcanzar otra membrana conectada a un sistema de fibras fijas por sus extremos a modo de cuerdas de arpa, cuyas deformaciones elásticas estimulan las terminaciones de los nervios auditivos. Las señales de naturaleza eléctrica generadas de este modo son enviadas al cerebro y se convierten en sensación sonora. Mediante este proceso el sonido físico es convertido en sonido fisiológico.

1.5 CUALIDADES DEL SONIDO

El sonido se puede propagar en los diferentes medios de forma continua o de forma pulsada, en las Figuras 1 y 2 se pueden ver ejemplos que representan estas dos formas de sonido

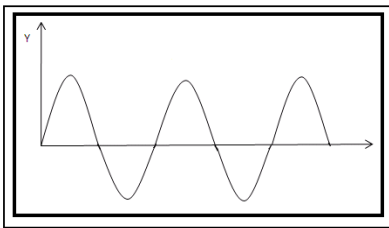


Figura.1 Onda Sonido Continuo

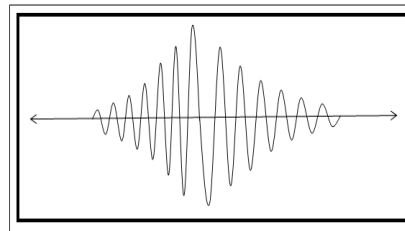


Figura. 2 Onda Sonido Pulsado

Fuente: Los Autores

El oído es capaz de distinguir unos sonidos de otros porque es sensible a las diferencias que puedan existir entre ellos en lo que concierne a alguna de las tres cualidades que caracterizan todo sonido y que son la intensidad, el tono y el timbre. Aun cuando todas ellas se refieren al sonido fisiológico, están relacionadas con diferentes propiedades de las ondas sonoras.

1.6 Intensidad

La intensidad del sonido percibido, o propiedad que hace que éste se capte como fuerte o débil, está relacionada con la intensidad de la onda sonora correspondiente, también llamada intensidad acústica. La intensidad acústica es una magnitud que da idea de la cantidad de energía que está fluyendo por el medio como consecuencia de la propagación de la onda.

Se define como la energía que atraviesa por segundo una superficie unitaria dispuesta perpendicularmente a la dirección de propagación. Equivale a una potencia por unidad de superficie y se expresa en w/m^2 .

La intensidad de una onda sonora es proporcional al cuadrado de su frecuencia y al cuadrado de su amplitud y disminuye con la distancia al foco.

La magnitud de la sensación sonora depende de la intensidad acústica, pero también depende al igual que de la sensibilidad del oído. El intervalo de intensidades acústicas va desde el umbral de audibilidad, o valor mínimo perceptible, hasta el umbral del dolor, la unidad de medida es el decibelio.

Debido a la extensión de este intervalo de audibilidad, para expresar intensidades sonoras se emplea una escala cuyas divisiones son potencias de diez y cuya unidad de medida es el decibelio (dB). Ello significa que una intensidad acústica de 10 decibelios corresponde a una energía diez veces mayor que una intensidad cercana a cero decibelios.

Otro de los factores de los que depende la intensidad del sonido percibido es la frecuencia. Ello significa que para una frecuencia dada un aumento de intensidad acústica da lugar a un aumento del nivel de sensación sonora, pero intensidades acústicas iguales a diferentes frecuencias pueden dar lugar a sensaciones distintas.

1.7 Tono

Junto con la frecuencia, en la percepción sonora del tono intervienen otros factores de carácter psicológico. Así sucede por lo general que al elevar la intensidad se eleva el tono percibido para frecuencias altas y se baja para las frecuencias bajas. Entre frecuencias comprendidas entre 1 000Hz y 3 000 Hz el tono es relativamente independiente de la intensidad.

1.8 Timbre

El timbre es la cualidad del sonido que permite distinguir sonidos procedentes de diferentes instrumentos, aun cuando posean igual tono e intensidad. Debido a esta misma cualidad es posible reconocer a una persona por su voz, que resulta característica de cada individuo.

El timbre está relacionado con la complejidad de las ondas sonoras que llegan al oído. Pocas veces las ondas sonoras corresponden a sonidos puros, sólo los diapasones generan este tipo de sonidos, que son debidos a una sola frecuencia y representados por una onda armónica. Los instrumentos musicales, por el contrario, dan lugar a un sonido más rico que resulta de vibraciones complejas. Cada vibración compleja puede considerarse compuesta por una serie de vibraciones armónicas simples de una frecuencia y de una amplitud determinada, cada una de las cuales, si se considerara separadamente, daría lugar a un sonido puro. Esta mezcla de tonos parciales es característica de cada instrumento y define su timbre.

1.9 Fenómenos Ondulatorios

Las diferentes trayectorias que toma una onda de sonido cuando encuentra una superficie u otro medio diferente de propagación cumple la ley de reflexión de Huygens que establece que la dirección de un rayo de luz cuando este encuentra una superficie se refleja con el mismo ángulo de incidencia, relación (9), también se cumple la ley de refracción de Snell que establece que cuando una onda pasa de un medio de propagación a otro, se cumple la relación (10), ver Figura 3

$$\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha \quad (9)$$

$$N_2 \text{Sen } \alpha_1 = N_1 \text{Sen } \theta_2 \quad (10)$$

donde $N = \frac{c}{v}$ y $C =$ velocidad de la luz en el vacío; $v =$ velocidad de la luz en otro medio de propagación

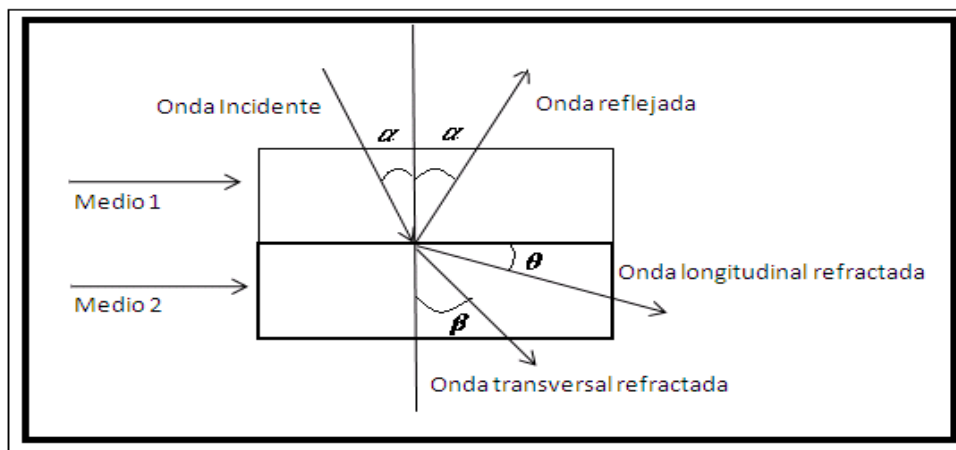


Figura. 3 Onda de Sonido viajando de un medio a otro

Fuente: Los Autores

El estudio de los fenómenos ondulatorios supone la utilización de conceptos tales como período, frecuencia, longitud de onda y amplitud, y junto a ellos el de frente de onda, el cual es característico de las ondas bidimensionales y tridimensionales. Se denomina frente de onda al lugar geométrico de los puntos del medio que son alcanzados en un mismo instante por la perturbación.

Las ondas que se producen en la superficie de un lago, como consecuencia de una vibración producida en uno de sus puntos, poseen frentes de onda circulares. Cada uno de esos frentes se corresponden con un conjunto de puntos del medio que están en el mismo estado de vibración, es decir a igual altura. Debido a que las propiedades del medio, tales como densidad o elasticidad, son las mismas en todas las direcciones, la perturbación avanza desde el foco a igual velocidad a lo largo de cada una de ellas, lo que explica la forma circular y, por tanto, equidistante del foco, de esa línea que contiene a los puntos que se encuentran en el mismo estado de vibración.

Las ondas tridimensionales, como las producidas por un globo esférico que se infla y desinfla alternativamente, poseen frentes de ondas esféricos si el foco es puntual y si el medio, como en el caso anterior, es homogéneo.

1.10 Reflexión y refracción de las ondas

El fenómeno de reflexión y refracción de las ondas es el utilizado para obtener datos que permiten controlar procesos, desgastes, y muchas aplicaciones diversas que ayudan al ser humano a analizar y ver el comportamiento de estas. Las Figuras 4 y 5 muestran este principio de cómo se envía una señal a través de un sensor y como la señal vuelve a este

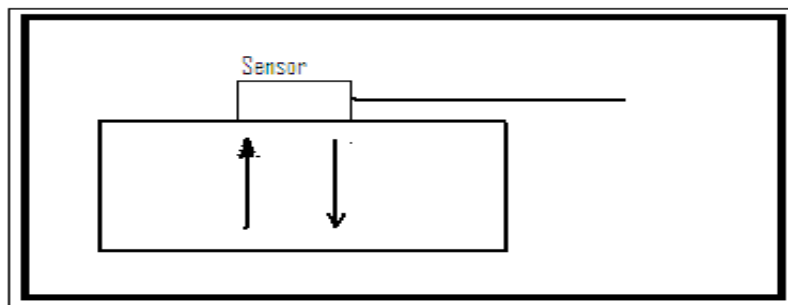


Figura.4 Emision y reflexion de una Onda Sonido

Fuente: Los Autores

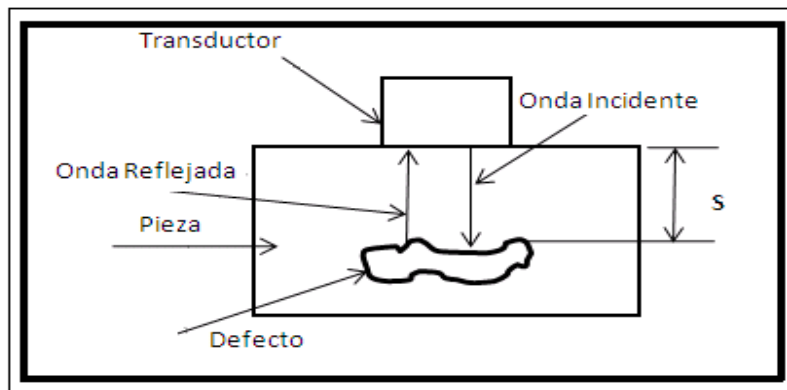


Figura. 5 Onda de Sonido reflejada por defecto en medio

Fuente: Los Autores

Cuando una onda alcanza la superficie de separación de dos medios de distinta naturaleza se producen, en general, dos nuevas ondas, una que retrocede hacia el medio de partida y otra que atraviesa la superficie límite y se propaga en el segundo medio. El primer fenómeno se denomina reflexión y el segundo recibe el nombre de refracción.

En las ondas monodimensionales como las producidas por la compresión de un muelle, la reflexión lleva consigo una inversión del sentido del movimiento ondulatorio. En las ondas bidimensionales o tridimensionales la inversión total se produce únicamente cuando la incidencia es normal, es decir, cuando la dirección, en la que avanza la perturbación es perpendicular a la superficie reflectante. Si la incidencia es oblicua se produce una especie de rebote, de modo que el movimiento ondulatorio reflejado cambia de dirección, pero conservando el valor del ángulo que forma con la superficie límite. Ver Figura 3

En el caso de las ondas sonoras, la reflexión en una pared explica el fenómeno del eco. Si la distancia a la pared es suficiente, es posible oír la propia voz reflejada porque el tiempo que emplea el sonido en ir y volver permite separar la percepción de la onda incidente de la reflejada. El oído humano sólo es capaz de percibir dos sonidos como separados si distan uno respecto del otro más de 0,1 s, de ahí que para que pueda percibiarse el eco la superficie reflectiva debe estar separada del observador 17 metros por lo menos, cantidad que corresponde a la mitad de la distancia que recorre el sonido en el aire en ese intervalo de tiempo ($17 \text{ m} = 340 \text{ m/s} \cdot 0,1 \text{ s/2}$).

En los espacios cerrados, como las salas, el sonido una vez generado se refleja sucesivas veces en las paredes, dando lugar a una prolongación por algunos instantes del sonido original. Este fenómeno se denomina reverberación y

empeora las condiciones acústicas de una sala, puesto que hace que los sonidos anteriores se entremezclen con los posteriores. Su eliminación se logra recubriendo las paredes con materiales, como corcho o moqueta, que absorben las ondas sonoras e impiden la reflexión.

El fenómeno de la refracción supone un cambio en la velocidad de propagación de la onda, cambio asociado al paso de un medio a otro de diferente naturaleza o de diferentes propiedades. Este cambio de velocidad da lugar a un cambio en la dirección del movimiento ondulatorio. Como consecuencia, la onda refractada se desvía un cierto ángulo respecto de la onda incidente.

1.11 Difracción

Las ondas son capaces de traspasar orificios y bordear obstáculos interpuestos en su camino. Esta propiedad característica del comportamiento ondulatorio puede ser explicada como consecuencia del principio de Huygens y del fenómeno de interferencias.

Así, cuando una fuente de ondas alcanza una placa con un orificio o rendija central, cada punto de la porción del frente de ondas limitado por la rendija se convierte en foco emisor de ondas secundarias todas de idéntica frecuencia. Los focos secundarios que corresponden a los extremos de la abertura generan ondas que son las responsables de que el haz se abra tras la rendija y bordee sus esquinas. En los puntos intermedios se producen superposiciones de las ondas secundarias que dan lugar a zonas de intensidad máxima y de intensidad mínima típicas de los fenómenos de interferencias.

Ambos fenómenos que caracterizan la difracción de las ondas dependen de la relación existente entre el tamaño de la rendija o del obstáculo y la longitud de onda. Así, una rendija cuya anchura sea del orden de la longitud de la onda considerada, será completamente bordeada por la onda incidente y, además, el patrón de interferencias se reducirá a una zona de máxima amplitud idéntica a un foco. Es como si mediante este procedimiento se hubiera seleccionado uno de los focos secundarios descritos por Huygens en el principio que lleva su nombre.

1.12 Propagación de ondas y análisis dinámico mecánico [14]

1.12.1 Propagación de ondas

Los ensayos con ondas ultrasónicas están basados en deformaciones variables en el tiempo. Todos los materiales se componen de átomos que pueden forzarse a vibrar alrededor de su posición de equilibrio, generando ondas mecánicas. Cuando las partículas de un material elástico son desplazadas de su punto de equilibrio, surgen fuerzas internas de restauración que junto con la inercia de las partículas originan movimientos oscilatorios en el medio. Las partículas no viajan en el medio, su movimiento es simple y armónico, limitado a las oscilaciones alrededor de su posición de equilibrio.

En este trabajo se consideran las ondas que se propagan a través del volumen en forma longitudinal y transversal, quedan excluidas las ondas de superficie y otras clases de ondas como las ondas de Rayleigh y Lamb.

La propagación de las ondas longitudinales involucra oscilaciones de las partículas en la dirección que ocurre la propagación de la onda, generando zonas de compresión y expansión en sólidos, líquidos y gases ver la Fig. 6 (superior), en las ondas transversales o de cizalladura, las oscilaciones de las partículas ocurren en dirección perpendicular a la dirección de propagación de la onda; las ondas transversales o de corte solo pueden viajar en sólidos ver Figura 6 (inferior).

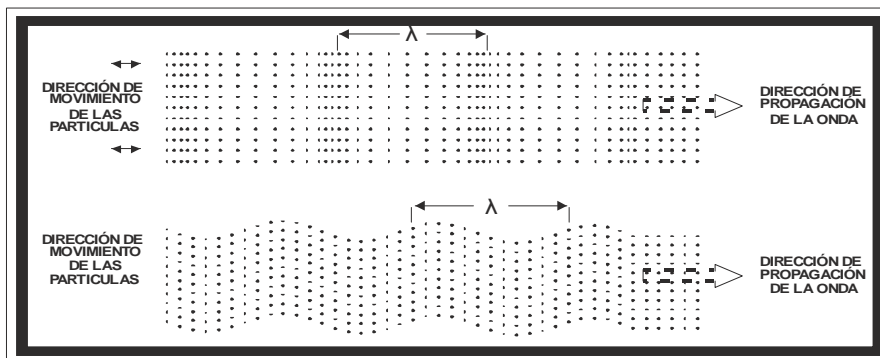


Figura 6: Propagación de onda longitudinal superior, Propagación de onda transversal inferior [14]

La deformación y la inercia son propiedades fundamentales en la transmisión de ondas mecánicas. Si el medio no fuese deformable, ninguna parte de éste experimentaría una perturbación en la forma de una fuerza interna. Similarmente, si el medio no tuviese inercia, no habría retardo en el desplazamiento de las partículas y la perturbación afectaría instantáneamente a todas ellas. La perturbación de un medio elástico por una onda de ultrasonido se caracteriza por la inducción de movimientos oscilatorios en un material, generando ondas mecánicas con un rango de frecuencias comprendidas entre los 20KHz y 100MHz. Normalmente, esta generación se lleva a cabo por medio de un material piezoeléctrico, el cual puede ser deformado cuando es expuesto a un voltaje determinado. Este fenómeno permite generar la vibración del material piezoeléctrico, el cual, al ser acoplado a un medio elástico, induce o transmite los movimientos oscilatorios al material elástico.

La generación de estos movimientos oscilatorios en un medio determinado se presenta en conjunto debido a dos fenómenos importantes en la transmisión de ondas mecánicas en un medio no ideal: La dispersión y la atenuación. El primero está asociado a la dependencia de la velocidad de propagación en función de su frecuencia y el segundo a la disipación de la energía de la onda en el medio. Cuando la velocidad de una onda no depende de la frecuencia de propagación, se

dice que el medio es no dispersivo, en cambio, si lo contrario ocurre, se dice que el material si presenta esta característica, y las ondas con diferentes frecuencias se propagan con diferentes velocidades. En este trabajo se considerará el caso de materiales no dispersivos.

Una onda puede representarse como el movimiento simultáneo de un número infinito de partículas o pequeñas masas, cada una comportándose como la masa en un oscilador simple. Cada elemento interactúa con otro elemento mediante fuerzas elásticas y viscosas, de una manera determinada por las propiedades del medio y su entorno. Se debe distinguir cuidadosamente entre la velocidad de una partícula, que se designará con la letra v , y la velocidad de propagación de la onda a través del medio, que se designa como c . La relación básica distancia versus velocidad de una onda es: distancia = velocidad c por tiempo t . Tomando la longitud de onda λ como distancia se obtiene: $\lambda = ct$, donde $t = 1/f$ y f como la frecuencia, de lo anterior se obtiene $c = f \lambda$, donde c es la velocidad del sonido en un cuerpo elástico sin dispersión.

1.12.2 Oscilaciones mecánicas y teoría de ondas

Las ondas mecánicas requieren un medio para transferir su energía. Tanto el movimiento de ondas ultrasónicas como el análisis dinámico mecánico son gobernados por leyes basadas en oscilaciones armónicas, en este caso basadas en una fuerza aplicada variando sinusoidalmente con el tiempo.

El movimiento armónico simple es típicamente el movimiento de una masa conectada a un resorte cuando está sometida a una fuerza lineal elástica gobernada por la ley Hooke. La ecuación de su movimiento se puede definir usando una onda seno o coseno de una específica frecuencia o longitud de onda.

Visualizar el ultrasonido comportándose como una onda mecánica en un material elástico con constantes elásticas, puede ser el cálculo de un concepto muy abstracto; por esta razón la presente deducción del modelo de comportamiento del ultrasonido desde una ecuación de onda se centra mas en una explicación física que en una teoría matemática.

Al considerar el movimiento de una onda sobre una cuerda, una partícula de la misma se moverá verticalmente con movimiento armónico simple, el desplazamiento "y" representa la variable que cambia cuando la onda pasa a través del material, por ejemplo el desplazamiento de un elemento en la dirección x en un tiempo particular t.

Esto significa que "y" es una función de (x, t). La ecuación de onda de una cuerda indica el desplazamiento "y" de un oscilador simple en una distancia x en un tiempo t. Esta ecuación puede expresarse en términos de la segunda ley de Newton $F = ma$ donde $F =$ Fuerza, $m =$ Masa y $a =$ Aceleración; usando la forma derivativa se obtiene: ecuación (11)

$$T \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (11)$$

En el término derecho ρ es la densidad lineal (masa por unidad de longitud) de un segmento elemental de la cuerda y la aceleración en un tiempo t , la fuerza de restauración requerida o tensión T es proporcional a la curvatura de la cuerda, el término T/ρ tiene las mismas unidades de la velocidad del sonido al cuadrado c^2 por lo cual se puede expresar la ecuación (11) en términos de la velocidad del sonido como sigue:

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{T}{\rho} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad \text{donde } C^2 = \frac{T}{\rho} \left[\frac{\frac{mkg}{s^2}}{\frac{kg}{m}} = \frac{m^2}{s^2} \right] \Rightarrow$$

$$\frac{\partial^2 y}{\partial x^2} = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} \quad (12)$$

De otra forma el movimiento armónico simple de un oscilador "y de amplitud a en una posición x y un tiempo t puede ser expresado usando la formulación típica de la oscilación armónica, ecuación (13):

$$y = a \sin(\omega t - \theta) \quad (13)$$

θ representa la fase de retraso con respecto a la posición x_0 del oscilador. Se dice que dos puntos están en fase si se comportan exactamente igual, esto es, si ellos están en una parte que es un múltiplo de la longitud de onda; ahí θ tendrá valores cero o 2π correspondientes a una oscilación completa.

Los parámetros de medición acústica incluyen la velocidad del sonido y la atenuación de la onda debido a la disipación de la energía en el medio de propagación, por tanto, la solución anterior debe ser reescrita para incluir dichas variables. Ecuación (14)

Fase de retraso

$$\theta = \frac{2\pi x}{\lambda}, \quad \omega = \frac{2\pi c}{\lambda} = 2\pi f; \text{ tambien } K = \frac{2\pi}{\lambda}$$

$$y(x, t) = a \sin(\omega t - \theta)$$

$$y(x, t) = a \sin k(ct - x)$$

$$y(x, t) = a \sin \frac{2\pi}{\lambda} (ct - x) \quad (14)$$

Cualquier relación en la cual x y t se combinen en la forma $(ct + x)$ o $(ct - x)$ en las cuales c es la velocidad del sonido de la onda, pueden ser empleadas para resolver la ecuación de onda (11). El término entre paréntesis tiene la dimensión de longitud y para las funciones seno o coseno el argumento debe tener dimensión en radianes, por lo cual el signo menos en el paréntesis significa movimiento de la onda a la derecha y x debe ser multiplicado por el factor k que indica el número de onda. Ecuación (15)

$$y(x, t) = a \sin \frac{2\pi}{\lambda} (ct - x) \quad (15)$$

$$y(x, t) = a \sin(\omega t - kx)$$

Esta ecuación en radianes puede ser empleada para resolver la ecuación de onda (11), así la ecuación (14) puede incluir los parámetros de la onda en términos de el módulo elástico.

Otra solución puede expresarse con funciones seno y coseno como también en forma exponencial como se muestra en la ecuación (16):

$$y = a(\sin(\omega t - kx) + i \cos(\omega t - kx)) = a e^{i(\omega t - kx)} \quad (16)$$

Esta solución es suficiente para un material elástico que obedece la ley Hooke, por ejemplo: $-KY = Ma$ donde K es la constante de un resorte y Y el desplazamiento de una masa hasta la mayor deformación del resorte, sin embargo en la realidad la fricción entre las partículas tiene un efecto amortiguador de la energía de la onda por lo cual estos efectos combinados están representados por un módulo compuesto M^* el cual tiene una parte real M' correspondiente a el comportamiento elástico y una parte imaginaria iM'' correspondiente a la amortiguación de la onda por efectos de dispersión lo cual se puede expresar como: $M^* = M' + iM''$ este término debe ser integrado a la ecuación (11) así:

$$\rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = M^* \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} \quad (17)$$

$$\rho \frac{\partial^2 y}{\partial t^2} = M' \frac{\partial^2 y}{\partial x^2} + iM'' \frac{\partial^2 y}{\partial x^2}$$

La reducción en la amplitud de la oscilación se describe típicamente por un factor $e^{-\alpha x}$ y expresa la rata a la cual decrece la amplitud de la onda en el material, el término α es el coeficiente de atenuación de la energía de la onda debido a la inelasticidad del medio, que al incluirlo en la solución de la ecuación de onda, la ecuación (18) se transforma en:

$$y = a(\sin(\omega t - kx) + i \cos(\omega t - kx))e^{-\alpha x} \quad (19)$$

1.13 Piezoelectricidad

1.13.1 Efecto piezoeléctrico

El efecto piezoeléctrico es una propiedad que existe en muchos materiales. El nombre consta de dos partes: *Piezo*, derivado de la palabra griega presión y *electric*, de electricidad. Por lo tanto, la traducción es efecto de presión y electricidad

1.13.2 Definición de efecto piezoeléctrico:

La aparición de un potencial eléctrico entre ciertas caras de un cristal cuando éste es sometido a presión mecánica, e inversamente, cuando se aplica un campo eléctrico en ciertas caras del cristal, éste experimenta una deformación mecánica. El efecto se desarrolla por el desplazamiento de iones en cristales que tienen una célula asimétrica (el más simple poliedro que hace posible la estructura de cristal) ver Figura 7.

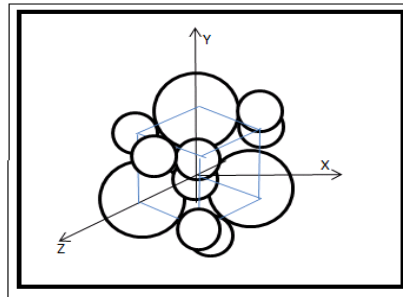


Figura. 7 Estructura cristalina del cuarzo en estado normal [9]

Cuando el cristal se comprime los iones de cada célula se desplazan causando la polarización eléctrica de la unidad celular. Debido a la regularidad de la estructura cristalina, estos efectos se acumulan causando la aparición de una diferencia de potencial eléctrico entre ciertas caras del cristal. Cuando un campo eléctrico externo se aplica al cristal, los iones en cada célula se desplazan por las fuerzas electrostáticas, dando por resultado la deformación mecánica del cristal entero. Debido a su capacidad para convertir la deformación mecánica en tensiones eléctricas y las tensiones eléctricas en movimiento mecánico, los cristales piezoeléctricos se utilizan en dispositivos tales como transductores, micrófonos, etc. Los cristales piezoeléctricos también se utilizan como resonadores en osciladores electrónicos y amplificadores de alta frecuencia.

El efecto piezoeléctrico no es propio de todos los cristales y sólo se produce en determinadas condiciones. El ejemplo más conocido es el cuarzo. Un cristal de cuarzo natural tiene una forma determinada, siempre recurrente, que se describe

con ayuda de los ejes cristalográficos, designados ejes X, Y y Z, igual que en un sistema de coordenadas cartesianas normales, ver Figura 8.

El efecto piezoeléctrico sólo se consigue en el cuarzo si la lámina de cuarzo ha sido cortada del cristal perpendicularmente al eje X o al eje Y.

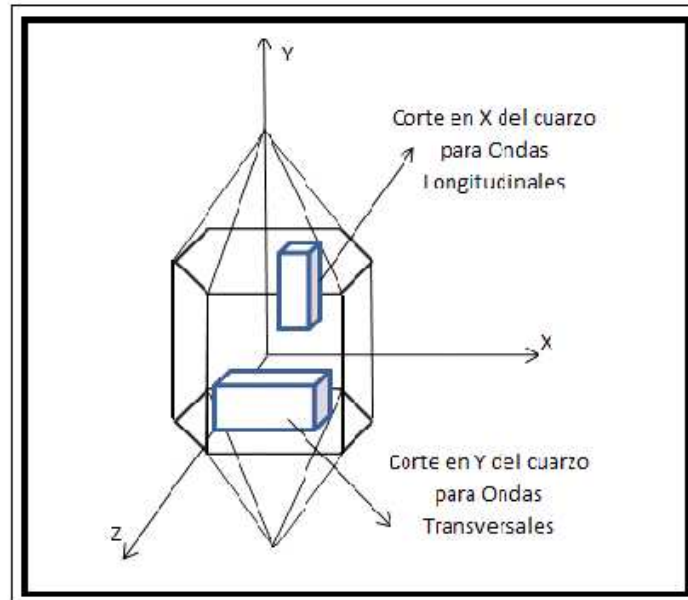


Figura. 8 Cristal de Cuarzo [9]

En la Figura 8 se muestran los diferentes cortes que se pueden realizar en un cristal de cuarzo dependiendo de la clase de ondas que se desean obtener, en el caso de ondas longitudinales se debe realizar un corte a lo largo del eje X, ver efectos en la figura 9, si se desean ondas transversales se debe realizar un corte del cristal a lo largo del eje Y, ver efectos en la figura 10; En el primer caso, la deformación mecánica del cristal tiene lugar en la misma dirección del campo eléctrico; en el segundo caso, perpendicularmente a ella.

Los cristales actúan como filtros que resuenan en una frecuencia particular y eliminan todas las otras frecuencias. La amplitud eléctrica generada por los cristales de cuarzo no es muy elevada, su ventaja reside en la exactitud y estabilidad de la frecuencia de resonancia.

	CAUSA	EFEECTO	ESQUEMA
EFECTO PIEZOELÉCTRICO DIRECTO	COMPRESION SOBRE EL CRISTAL	VOLTAJE POSITIVO SOBRE LAS CARAS	
	TRACCIÓN SOBRE EL CRISTAL	VOLTAJE NEGATIVO SOBRE LAS CARAS	
EFECTO PIEZOELÉCTRICO INVERSO	VOLTAJE POSITIVO SOBRE LAS CARAS	EXPANSIÓN DEL CRISTAL	
	VOLTAJE NEGATIVO SOBRE LAS CARAS	CONTRACCIÓN DEL CRISTAL	

Figura. 9 Efecto piezoeléctrico del cuarzo corte eje X [9]

Se conocen dos clases de efectos piezoeléctricos: el efecto piezoeléctrico directo y el efecto piezoeléctrico inverso.

En el efecto piezoeléctrico directo una fuerza o vibración mecánica en el elemento piezoeléctrico genera una carga o voltaje entre sus terminales, ver figura 9.

El efecto piezoeléctrico inverso como su nombre lo indica, es lo contrario del efecto piezoeléctrico directo, aplicando un campo eléctrico o voltaje al elemento piezoeléctrico se produce un cambio dimensional o deformación, ver figura 10

	CAUSA	EFEECTO	ESQUEMA
EFECTO PIEZOELÉCTRICO DIRECTO	ESFUERZO DE CORTE DEFORMA EL CRISTAL A LA IZQUIERDA	VOLTAJE POSITIVO SOBRE LAS CARAS	
EFECTO PIEZOELÉCTRICO INVERSO	VOLTAJE POSITIVO SOBRE LAS CARAS	DEFORMA EL CRISTAL A LA DERECHA	
	VOLTAJE NEGATIVO SOBRE LAS CARAS	DEFORMA EL CRISTAL A LA IZQUIERDA	

Figura 10 Efecto piezoeléctrico del cuarzo corte eje Y [9]

La polaridad de esta carga depende de la orientación del esfuerzo comparado con la dirección de polarización en el elemento piezoeléctrico. Durante el proceso de fabricación, el polarizado (poling) o aplicación de un alto campo eléctrico de DC del orden de 45KV/cm al cristal, establece la dirección de polarización.

1.13.3 Base Teórica

Con el fin de comprender el comportamiento en circuito de los sensores piezoeléctricos, es interesante abordar teóricamente un modelo simple unidimensional al que responden con bastante aproximación los cristales tallados prismáticamente cuando funcionan en régimen de compresión-tracción que, por otra parte, es el usual en muchos de los transductores basados en esta clase de sensores

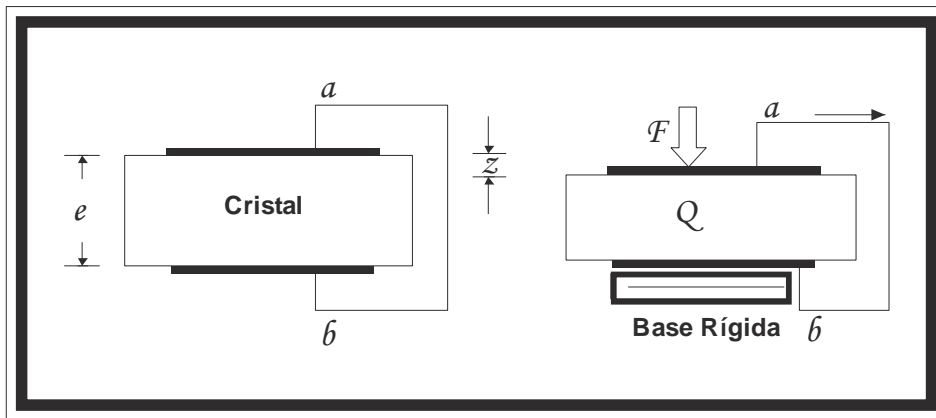


Figura 11 Efecto piezoeléctrico [15]

En la Figura 11 se representa esquemáticamente un cristal piezoeléctrico en forma de lámina con electrodos metálicos depositados sobre las caras opuestas. En la misma figura se ilustra el equilibrio dinámico del cristal sometido a una fuerza F de compresión, de modo que se produce una disminución z en su espesor. Los terminales del cristal aparecen cortocircuitados, es decir no existe diferencia de potencial entre ellos y no se tiene en cuenta, por lo tanto, la fuerza debida a la reversibilidad del efecto piezoeléctrico.

La deformación genera una carga Q cuyo valor es aproximadamente proporcional al acortamiento unitario del espesor del cristal, para deformaciones muy pequeñas, o sea:

$$Q = K \frac{z}{e} \quad (19)$$

donde K es una constante que depende del material y de la dirección de la talla y e es el espesor del cristal antes de la deformación.

Si, en el caso más general, se supone que z está variando con el tiempo a una velocidad dz/dt y una aceleración d^2z/dt^2 , considerando el sentido positivo de z indicado en la Figura 11 derivando la expresión (19) Se obtiene:

$$i = \frac{dQ}{dt} = \frac{K}{e} \frac{dz}{dt} \quad (20)$$

Donde se ha considerado que el espesor e permanece constante. Existe pues una corriente de desplazamiento interno de cargas proporcional a la velocidad de deformación, que circularía por el conductor de cortocircuito entre terminales.

Por otra parte, como se indica en la Figura 11, intervienen en el caso más general, además de la fuerza F aplicada, otras sollicitaciones que definen el equilibrio dinámico del sistema y que pueden expresarse del modo siguiente en función de z y sus derivadas.

$m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2}$ Fuerza de inercia de la masa m equivalente del cristal.

$r \frac{dz}{dt}$ Fuerza asociada a las resistencias pasivas (del tipo de rozamiento viscoso, Proporcional a la velocidad)

$\frac{1}{C_m} Z$ Fuerza de reacción elástica, proporcional a la deformación, donde C_m , es la llamada capacidad mecánica, inversa de la elastancia mecánica del cristal para el modo de deformación considerado.

El equilibrio dinámico se expresará indicando balance de fuerzas que actúa sobre el sistema:

$$F = m \frac{\partial^2 z}{\partial t^2} + \frac{dz}{dt} + \frac{1}{C_m} Z \quad (21)$$

Y teniendo en cuenta la ecuación (19) resulta

$$F = \frac{me}{K} \frac{di}{dt} + \frac{e}{k} \frac{1}{C_m} \int i dt \quad (22)$$

1.13.4 Circuito Equivalente de un cristal piezoeléctrico

Considérese ahora el esquema de la Figura 12 que representa un circuito R,L,C en serie alimentado por un generador de tensión $v(t)$.

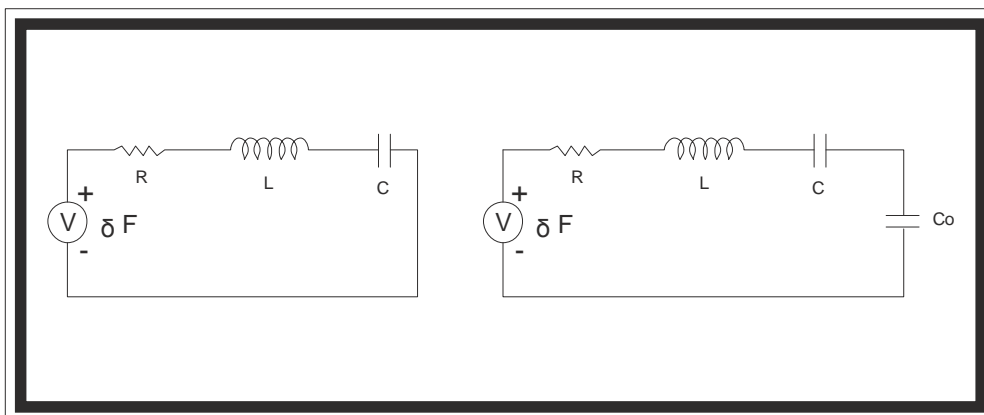


Figura 12 Circuito eléctrico equivalente de un sensor piezoeléctrico. [15]

De acuerdo con la teoría de circuitos, la relación entre $v(t)$ e $i(t)$ estará dada por la ecuación:

$$v(t) = L \frac{di(t)}{dt} + R_i(t) + \frac{1}{C} \int i(t) dt \quad (23)$$

Dado que los términos funcionales de los segundos miembros de las ecuaciones (22) y (23) son idénticos, puede establecerse una equivalencia entre ambas expresando la proporcionalidad entre las funciones de los primeros miembros y entre los coeficientes correspondientes del segundo, o sea

$$\frac{u(t)}{F} = \frac{LK}{me} = \frac{RK}{re} = \frac{KC_m}{C_e} = \delta \quad (24)$$

Donde δ sería el factor de proporcionalidad.

De la ecuación anterior, se deducen las expresiones

$$u(t) = \delta F \quad \therefore \quad L = \frac{e\delta}{K} m \quad \therefore \quad R = \frac{e\delta}{K} r \quad \therefore \quad C = \frac{K}{e\delta} C_m \quad (25)$$

Resulta así que puede establecerse una analogía entre el cristal en su equilibrio dinámico y un circuito resonante serie con amortiguamiento, donde son válidas las siguientes relaciones:

- La tensión de alimentación es proporcional a la fuerza.
- La resistencia es proporcional al coeficiente representativo del efecto del Amortiguamiento mecánico del sistema.
- La inductancia es proporcional a la masa equivalente del cristal.
- La capacidad eléctrica es proporcional a la capacidad mecánica.

Estas conclusiones son de gran utilidad para el estudio de circuitos con cristales piezoeléctricos, ya que el cristal puede ser sustituido por un circuito L, R, C equivalente alimentado por un generador de tensión proporcional a la fuerza aplicada, ver Figura 12 (izquierda).

Si se abre el corto circuito entre los terminales físicos del cristal, quedará intercalado en el bucle el condensador C_0 correspondiente a la disposición de los dos electrodos separados por el propio cristal (dieléctrico) y, en este caso, la corriente $i(t)$ no podría ser medida físicamente ya que estaría formada por el desplazamiento interno de cargas que se almacenarían, en definitiva, en dicho condensador. El circuito equivalente completo es el representado en la derecha de la Figura 12, donde los puntos a y b corresponden a los terminales físicos del sensor en la Figura 11.

En aplicaciones como sensor, donde el funcionamiento tiene lugar a frecuencias muy inferiores a la de resonancia mecánica del cristal (obviamente coincidente con la resonancia eléctrica de su circuito equivalente), tanto las velocidades como las aceleraciones tienen valores tan bajos que es posible despreciar los términos

asociados a estas magnitudes, con lo cual el circuito equivalente se reduce al ilustrado en el lado izquierdo de la Figura 12.

En el lado derecho de dicha figura se muestra una configuración aun más simplificada que resulta de la anterior aplicando el teorema de Thevenin entre los terminales, en donde el Generador corresponde al original afectado del coeficiente $\delta = C/(C + C_0)$ del divisor de tensión capacitivo y la impedancia interna está formada por los dos condensadores en paralelo.

Puede decirse que el cristal piezoeléctrico, dentro de las aproximaciones indicadas, equivale a un generador de tensión proporcional a la fuerza aplicada en serie con un condensador que corresponde aproximadamente al definido físicamente por la geometría del sensor (es decir, el condensador C_0), siempre referido al modelo de la Figura 12.

El estudio de la respuesta de los cristales piezoeléctricos a sollicitaciones estáticas proporciona interesantes relaciones entre los parámetros que se están manejando y otros dependientes de las propiedades elásticas del material y de su geometría.

1.13.5 Materiales Piezoeléctricos

Entre los materiales naturales que manifiestan el fenómeno piezoeléctrico están los cristales de cuarzo y turmalina, y entre los materiales sintéticos que se comportan del mismo modo pueden citarse la sal de Rochelle, fosfato dihidrogenado de amonio (ADP) y el sulfato de litio (LS). Otra clase de materiales que poseen estas propiedades son las cerámicas piezoeléctricas polarizadas, clasificadas como materiales ferro eléctricos de estructura poli cristalina, las más comunes son: zirconato titanato de plomo (PZT), titanato de bario, titanato de plomo y metaniobato de plomo. Deben su nombre a la analogía entre los dominios eléctricos, concepto que se utiliza en la interpretación teórica de sus propiedades, y los “dominios magnéticos” a los que se hace referencia en la teoría del ferromagnetismo. Durante el proceso de fabricación, se “polarizan” calentándolos por encima del punto Curie y se dejan enfriar lentamente en presencia de un fuerte campo eléctrico. El efecto piezoeléctrico puede, sin embargo, perderse por despolarización cuando se excede la temperatura de Curie.

Los dispositivos que utilizan materiales ferro eléctrico se caracterizan por su gran robustez y capacidad para soportar grandes esfuerzos. Se emplean además frecuentemente como actuadores y, en especial, en sistemas de generación de ultrasonidos.

Recientemente se están utilizando también los polímeros ferro eléctricos entre los cuales se destaca el fluoruro de polivinilideno, material de alta sensibilidad piezoeléctrica y piro eléctrica que sirve de base para algunos sensores modernos experimentales de diversas magnitudes mecánicas, eléctricas y ópticas. Actualmente se estudia su aplicabilidad en la detección táctil en robots y en prótesis de miembros.

En aplicaciones como sensores, se destacan los cristales de cuarzo tallados según determinadas direcciones preferentes en forma de láminas sobre cuyas caras opuestas se depositan electrodos metálicos (generalmente de oro o de plata). Dependiendo de la dirección del corte, se consiguen láminas sensibles a deformaciones por compresión, esfuerzo cortante o flexión.

1.14 Clases de Transductores Piezoeléctricos

1.14.1 Transductores de contacto.

Se coloca directamente en la superficie de prueba aplicando presión y un medio de acoplamiento. Se fabrica para inspecciones de haz recto. Para proteger el transductor de la abrasión, se cubre con un material duro como el óxido de aluminio.

1.14.2 Transductores de haz recto.

Emite ondas longitudinales con frecuencias de 0,5 a 10 MHz. Se emplea generalmente para la inspección de piezas en las que se puede colocar directamente la unidad de prueba sobre el área de interés, las discontinuidades son paralelas a la superficie de contacto. También es útil en la detección de discontinuidades y en la medición de espesores.

1.14.3 Transductores de incidencia angular.

Genera ondas de corte, de superficie y de placa. Se construye acoplando una unidad de haz recto a una de las caras de una zapata de plástico, la cual presenta determinado ángulo de refracción. Se emplea en los equipos de pulso eco y su aplicación es casi exclusiva en la detección de discontinuidades orientadas perpendicularmente a la superficie de prueba.

1.14.4 Tipos de Transductores angulares.

De acuerdo a su tamaño frecuencia, forma, tipo e intercambiabilidad de la zapata. Tienen marcado en la zapata el ángulo de refracción del sonido dentro del material de prueba, los ángulos comerciales para el acero son 35, 45, 60, 70, 80, 90 grados.

2 CAPÍTULO II

2.1 INSTRUMENTACIÓN ORIENTADA AL ULTRASONIDO [8]

2.1.1 Marco histórico

En la tierra, los cinco sentidos de los seres vivos (vista, oído, tacto, olor, y sabor) juegan papeles complementarios. Dos de éstos, la vista y el oído, son esenciales dentro de un gran rango de alcance, mientras los otros tres tienen la funcionalidad esencialmente de corto alcance.

Las cosas son diferentes bajo el agua; la vista pierde verdaderamente todo su significado como una capacidad de gran alcance, ante esta carencia, los seres que viven bajo el agua, han desarrollado un sistema de comunicación infrasónico y ultrasónico, debido a que las ondas sonoras son percibidas con mayor alcance bajo el agua. Las ballenas, delfines y murciélagos tienen un sofisticado sistema de comunicación de infrasonido y ultrasonido altamente evolucionado.

El desarrollo tecnológico del ultrasonido, empezó realmente durante la Primera Guerra Mundial, con la creación de transductores sumergibles en agua. El agua es un medio natural para la transmisión eficaz de ondas acústicas a grandes distancias, para el caso de transmisión de señales en medios sólidos u opacos, el ultrasonido es el más indicado.

Después del hundimiento del Titanic en 1912, causado por la colisión con un iceberg, los esfuerzos humanos fueron orientados hacia el desarrollo de la detección de objetos bajo el agua, impulsando el desarrollo del ultrasonido. Esto guió el trabajo pionero de Paul Langevin (París, 1872 - 1946) físico francés, quien generalmente es acreditado como el padre del ultrasonido.

El estímulo inmediato para su trabajo, era la amenaza submarina durante la primera guerra mundial. El Reino Unido y Francia, prepararon un programa conjunto para el descubrimiento submarino, y es en este contexto que Langevin preparó un tanque de inmersión experimental en la Escuela de Física y Química de París, también dirigió los experimentos a gran escala, a más de 2 km longitud, en el Río Sena. El transductor empleado en esa época fue reemplazado por un elemento de cuarzo, produciendo una mejora espectacular en su desempeño, y detectando señales a una distancia de 6 km.

La recepción humana normal cubre las frecuencias de 20 Hz a 20 kHz, aunque con la edad, el límite superior está significativamente reducido. Tanto para la luz como para el sonido, la banda de percepción humana es sólo una parte diminuta del ancho de banda total. En cada caso el ancho de banda puede describirse por la teoría de las ondas electromagnéticas para la óptica y la teoría de las ondas mecánicas en distintos medios para la acústica.

El ultrasonido está definido como la banda arriba de 20 kHz hasta 1 GHz. Por encima de este valor se denomina el régimen del hipersonido.

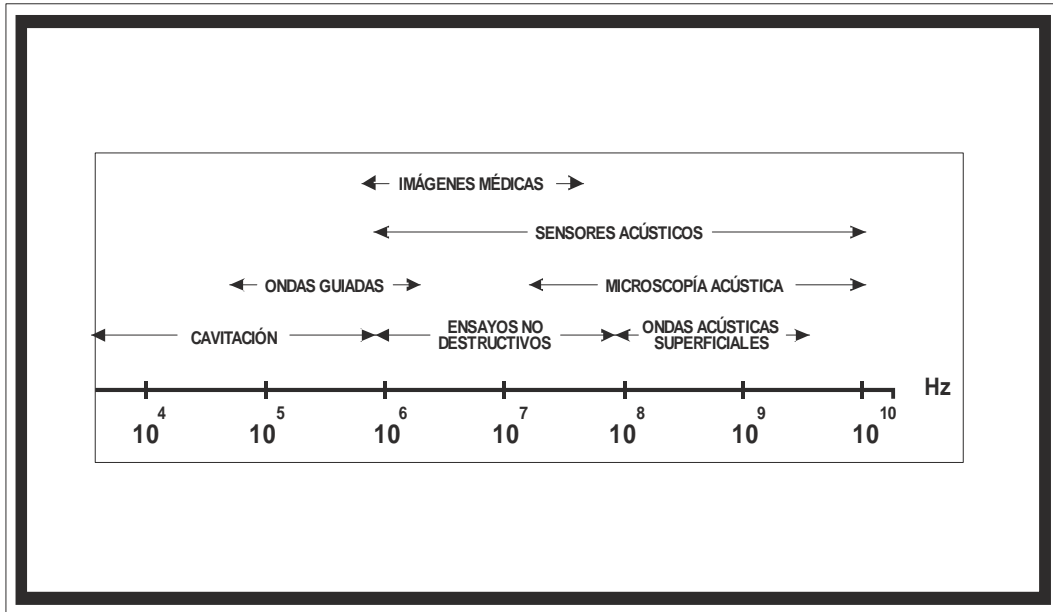


Figura. 13 Aplicaciones del ultrasonido según su frecuencia de onda [8]

El espectro total se muestra en Figura 13, donde se indican los rangos típicos para los fenómenos de interés de acuerdo a la relación $v=\lambda f$. La mayoría de las aplicaciones tiene lugar en el rango de 1 a 100 MHz, donde las longitudes de onda en un sólido típico son aproximadamente de 1mm a 10m y la velocidad media del sonido es aproximadamente 5000 m/s. En el agua el valor de la velocidad del sonido utilizado es 1500 m / s, con longitudes de onda del orden de 3 mm a 30 m. [1]

La razón para estudiar el ultrasonido, se debe a las muchas aplicaciones en la química, la física, la ingeniería, la biología, la industria de alimentos, la medicina, la oceanografía, la sismología, y muchas más. Casi todas estas aplicaciones son basadas en las dos siguientes características:

Las ondas ultrasónicas en sólidos o medios opacos viajan despacio, aproximadamente entre 3000 m/s a 5000 m/s., lo que implica 10.000 veces más lentamente que las ondas electromagnéticas que viajan a 300.000 K/s. Esto permite contar con un lapso de tiempo para la captación de la señal reflejada.

Las ondas ultrasónicas, pueden penetrar los materiales opacos fácilmente, mientras que muchos otros tipos de radiación como la luz visible o las ondas electromagnéticas no pueden.

Estas características ocurren en la mayoría de las aplicaciones ultrasónicas, su importancia se destaca en:

- Aplicaciones médicas, como las imágenes fetales que se han vuelto una parte normal de diagnóstico y control médico, hay muchas áreas en la medicina donde un sistema acústico no invasivo del cuerpo es inestimable, tal como el cardíaco, urológico y el de imágenes oftalmológicas.
- Aplicaciones militares en los campos de la aviación y la marina.
- En la industria electrónica, de alimentos, metalmecánica, etc.

A continuación se enumeran los principales desarrollos desde el siglo XIX hasta aproximadamente 1950 época en la cual el tema tomo un gran impulso debido al desarrollo de nuevos materiales.

1. La rueda del físico Frances Felix Savart (1791-1841) ideada en 1830 puede considerarse que fue el primer generador ultrasónico. Funcionó a aproximadamente a 24 kHz. Figura 14.

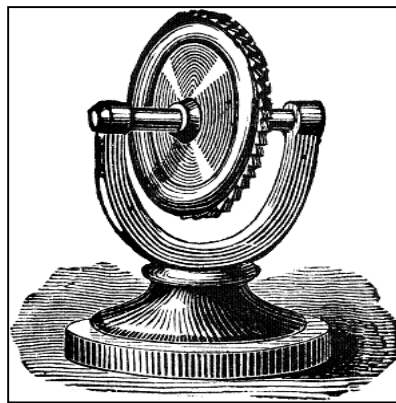


Figura. 14 La rueda Felix Savart [8]

2. Uno de los eventos importantes que llevaron directamente al avance del ultrasonido fue el descubrimiento de la piezoelectricidad por los hermanos Pierre y Jacques Curie en 1880; ellos establecieron ambos efectos, el directo y el inverso, es decir, la conversión de una señal eléctrica a una mecánica y viceversa.

3. En el siglo XX Lord Rayleigh (John W. Strutt), Físico británico. (1842 - 1919) publicó La Teoría del Sonido en 1889, lo que era esencialmente el principio de la acústica.

El hundimiento del Titanic y la amenaza de ataques de los submarinos alemanes llevaron a los experimentos de Langevin en París en 1915, fecha en la cual se considera el nacimiento real del ultrasonido. Por un lado, su trabajo demostró la viabilidad de funcionamiento del sistema eco pulso para la detección de objetos a frecuencias altas (150 kHz). Las señales eran tan grandes que los peces murieron inmediatamente cuando entraban en el haz ultrasónico. Por otro lado, la

introducción de transductores de cuarzo compuestos y empaquetados (acero-cuarzo-acero) condujo al primer uso práctico y eficaz de transductores piezoeléctricos. Sorprendentemente, casi ninguno de los trabajos de Langevin de ultrasonido fue publicado. Su trabajo fue seguido por el profesor de física de la universidad de Wesleyan en Middletown, Walter Guyton Cady (1874-1973) quien desarrolló osciladores de cristal controlados, basados en cuarzo.

En la década de los 60 empezó a ser utilizado en las diferentes industrias el ultrasonido, para la detección de fallas en piezas metálicas y para controlar el espesor en paredes de tanques y tuberías

El período de 1940-1955, se caracterizó por aplicaciones diversas, algunas de las cuales incluyen:

1. Nuevos materiales, los cerámicos para la transducción.
2. Mecanizado por ultrasonido
3. Limpieza ultrasónica; General Electric produjo una unidad comercial en 1950
4. Soldadura ultrasónica, adelantos hechos por los alemanes
5. Emulsificación: La dispersión de pigmentos en la pintura, productos cosméticos, tintes, pulimento de calzado, etc.,
6. Procesos metalúrgicos, incluso las fusiones de la desgasificación.
7. Deseccación de lodos en la extracción de minerales
8. Lavado de textiles
11. Deshidratación de alimentos

2.2 Equipo básico

La mayoría de los equipos de inspección por ultrasonido incluyen el siguiente equipo básico:

- Un generador electrónico de señal que produce ráfagas de voltaje alternadas.
- Un transductor que emite un haz de ondas ultrasónicas cuando las ráfagas de voltaje alternado son aplicadas.
- Un acoplador para transferir la energía de las ondas de ultrasonido a la pieza de trabajo.
- Un acoplador que transfiere la salida de las ondas de sonido (energía acústica) de la pieza al transductor.
- Un transductor (puede ser el mismo que el transductor que inicia las ondas ultrasónicas o puede ser otro diferente) para aceptar y convertir la ondas de ultrasonido de salida de la pieza de trabajo, en ráfagas de voltaje. En la mayoría de los sistemas un transductor simple actúa como emisor y receptor.
- Un dispositivo electrónico para amplificar y modificar las señales del transductor.

- Un dispositivo de salida que muestre la información resultante y la proyecte ya sea impresa o en pantalla.
- Un reloj electrónico o un cronómetro para controlar la operación de varios componentes del sistema.

2.3 Diseño propuesto

La necesidad en el país, de una tecnología para la Medición de espesores y el costo de importación, dio como resultado el surgimiento de la motivación a investigar experimentalmente un prototipo importado, en busca de implementar tecnologías aisladas y desarrolladas por otros, con el fin de combinarlas y obtener un equipo que preste las mismas funciones.

Del análisis de los circuitos del prototipo importado, y el estudio de los fundamentos de ondas ultrasónicas, se pudo concluir que está conformado de los siguientes módulos:

- Fuente de corriente
- Módulo de generación y transmisión de la señal ultrasónica
- Módulo de recepción de la señal ultrasónica
- Módulo de control de ganancia
- Módulo de adquisición y presentación de datos

3 CAPÍTULO III

3.1 ANÁLISIS Y DESCRIPCIÓN DE UN EQUIPO IMPORTADO [16],[17] y [18]

Como punto de partida se analiza un equipo de medición de espesores por ultrasonido CHECK LINE de ELECTROMATIC referencia TI-10 ver figuras 15 y 16

Bulletin UT812

CHECK·LINE®
BY ELECTROMATIC

ULTRASONIC THICKNESS GAUGES

TI-10

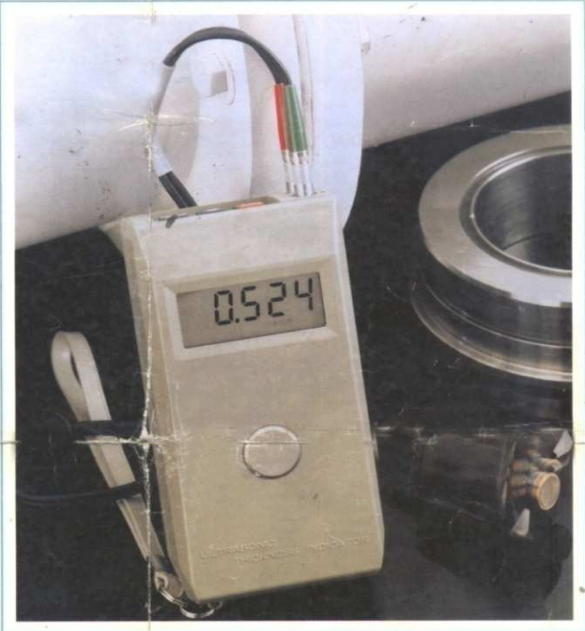
0.060" to 3.000"
(1.5 to 80.0mm)

Measures the thickness of walls and corrosion from one side—**ULTRASONICALLY**

For use on all metals, ceramics, rigid plastics, glass, etc.

The new CHECK·LINE TI-10 features an easy-to-read, back-lighted LCD display for accurately measuring the thickness of sheet stock, plates, bulkheads, ships hulls, structural shapes, storage tanks, pressure vessels, boilers and pipe.

The TI-10 can also be used to detect laminar flaws, blow holes, corrosion extent and similar defects in uniformity.



Special Purpose Models

TI-7H for high ambient and material temperatures.

TI-7P for small bore pipe wall and general use.

Specifications are shown on the reverse side.

Special Models (not shown)

TI-7S for extended range (0.040"-8.000").

TI-20 for thin walls (0.016"-0.600").

FEATURES

- Hand-held, battery-operated, fits in a pocket.
- Easy set up & calibration. Zero and calibrating sonic velocities are automatically set or are easily determined.
- Display symbols alert the user to poor coupling and low battery voltage.
- 300-hour life from an ordinary 1½volt AA alkaline battery plus automatic shut-off after 3 minutes of non-use.
- Memory holds last reading for 3 minutes or until next measurement is made.
- English and metric readings in one instrument, switch-selectable.
- All models include the basic instrument (body), probe with connecting cable, spare battery, coupling fluid, instruction book and fitted carrying case.

Figura 15 Catálogo de presentación equipo a estudiar



Figura 16 Equipo a estudiar despiezado

Las siguientes son las características del equipo:

- Principio de operación: Pulso-eco
- Rango: 1,5 a 80 mm
- Mínimo tamaño en tuberías: 1" de diámetro y espesor superior a 1,5 mm
- Materiales de prueba: Acero, Aleaciones de acero, Hierro maleable, Aluminio, Cobre, Bronce, Acero Inoxidable, Titanio, Zinc, etc. Con recubrimientos de pinturas en buen estado que no superen espesores de 0,3 mm
- Exactitud: +/- 0,5% de la lectura o +/- 0,1 mm
- Resolución: 0,1 mm
- Rango de velocidad: 1000 a 12000 m/seg
- Frecuencia de operación: 5 MHz

Del análisis del prototipo importado, y el estudio de las ondas ultrasónicas, se pudo concluir que está conformado por los siguientes módulos:

- Fuente de corriente
- Módulo de generación y transmisión de la señal ultrasónica
- Módulo de recepción de la señal ultrasónica
- Módulo de control de ganancia
- Módulo de adquisición y presentación de datos

A continuación se describen los módulos

3.1.1 Módulo fuente de corriente

Este módulo está compuesto de dos baterías, la primera es una pila de Litio de 3,5V CC, para mantener latente un microcontrolador L7AO114, (desconocido no comercial), mientras está apagado el equipo, cuando se pulsa la tecla ON-OFF, se activa el microcontrolador que gobierna un inversor alimentado con la segunda

pila de 1,5 V CC. El inversor entrega dos salidas: Una de 6 V AC, y otra de 150 V AC; la corriente de 6 V AC pasa por el diodo rectificador 1N 4148 de 100 mA y se filtra con 1000 μ F 6V para obtener 6 V DC luego, se estabiliza a 5 V DC con un regulador de tecnología CMOS, referencia S8123OAG, de 200 mA; con esta fuente alimentan el microcontrolador y los circuitos de los diferentes módulos. La salida de 150 V AC, es rectificadas con un diodo 1N4148 de 100 mA y filtrada con 1 μ F a 160 V, con el fin de alimentar el circuito de excitación del cristal piezoeléctrico de 5MHz que emite de la señal ultrasónica.

3.1.2 Módulo de generación y transmisión de la señal ultrasónica

La periodicidad de las señales ultrasónicas emitidas por el cristal piezoeléctrico se desconocen, estas están programadas desde el microcontrolador, que da la orden al circuito integrado U2, MC4538 (monoestable redispensible) para dar inicio a la generación de la señal que activa el circuito del módulo de transmisión y activa al mismo tiempo el reloj interno del microcontrolador para la medición del tiempo de vuelo de la señal ultrasónica, ver plano del circuito en la Figura 17; téngase en cuenta que el astable U1 reemplaza la función del microcontrolador que determina la periodicidad de la señal de transmisión. La señal que sale del monoestable redispensible, debe ser amplificada en corriente con el transistor Q2 A733 para alimentar el transistor Q1 C2230 y permitir el paso de los 150 VDC, que excitan el cristal piezoeléctrico emisor de la señal ultrasónica.

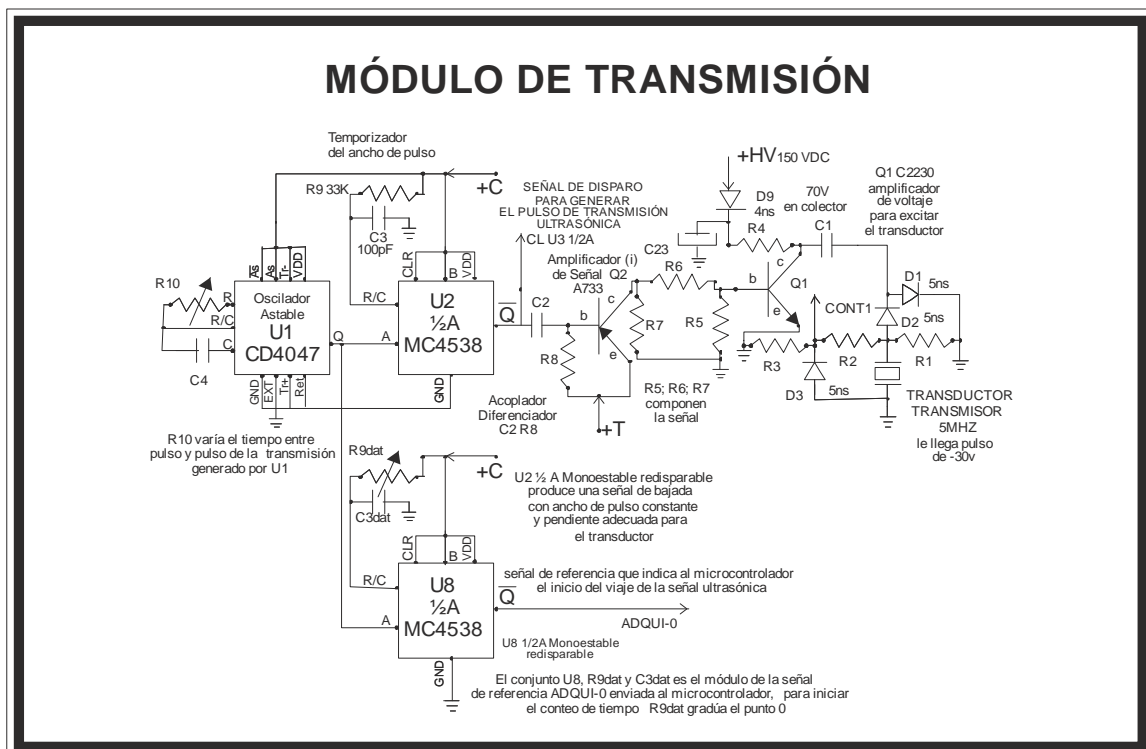


Figura 17 Módulo de generación y transmisión de la señal ultrasónica

Fuente: Los Autores

3.1.3 Módulo de recepción de la señal

La señal del Eco recibida por el cristal receptor es muy débil y debe ser transportada por una señal portadora generada por un tanque oscilador o variante de Pierce. Verplano Figura 18.

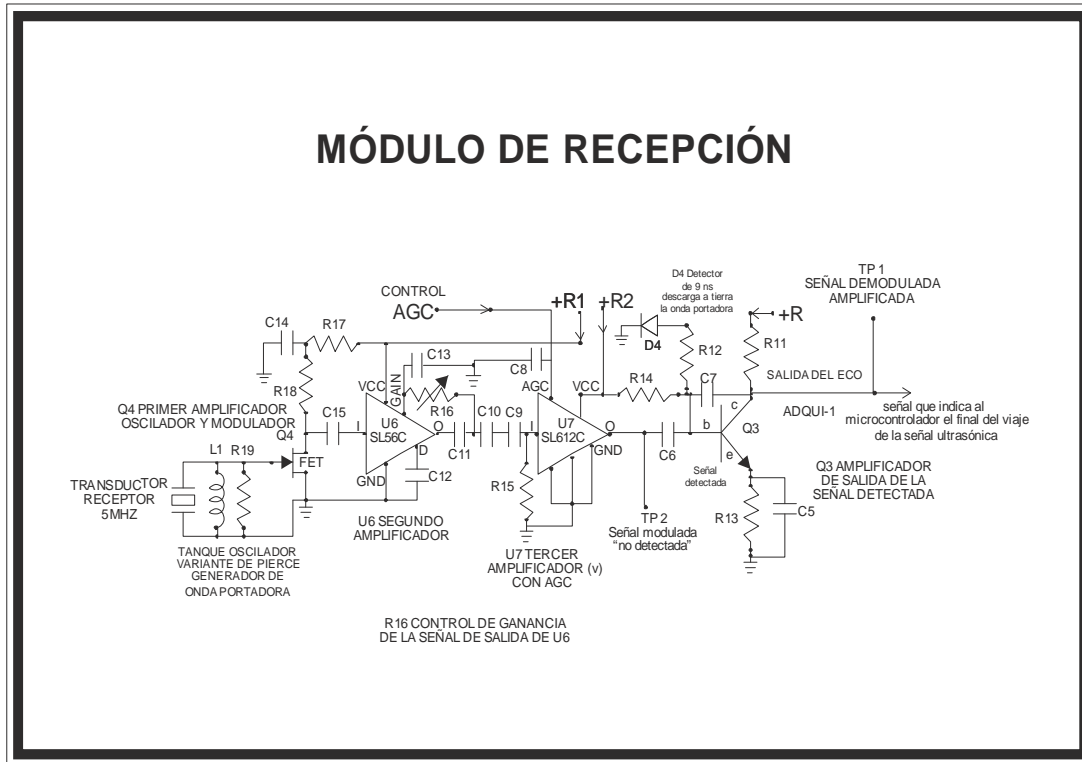


Figura 18 Módulo de recepción de la señal ultrasónica

Fuente: Los Autores

La señal modulada por el Eco es amplificada en voltaje en un transistor FET Q4, luego se hace una segunda amplificación en voltaje en el amplificador operacional U6 (SL561C) de ganancia controlada manualmente por R16, posteriormente, se amplifica en voltaje en el circuito integrado U7 amplificador operacional SL612C, de ganancia inversa controlada por el Módulo de Control de Ganancia. La señal que entrega U7, es detectada por el diodo D4 de 4 ns, que descarga a tierra la parte positiva de la onda modulada, la parte negativa es amplificada en voltaje y corriente e invertida en el transistor amplificador Q3, que envía por el colector una señal de bajo al microcontrolador, para que detenga el tiempo del viaje del vuelo de la onda.

3.1.4 Módulo de control de ganancia

Debido a la cercanía entre el cristal receptor y el cristal emisor de la señal ultrasónica, en el momento de la emisión de la señal, el receptor recibe parte de

esa señal la cual debe ser anulada y mantener inactivo el módulo de recepción, de tal forma que el microcontrolador no vaya a recibir una falsa señal de finalización del conteo del tiempo, que ya ha comenzado a contar en el momento de la emisión de la señal del cristal piezoeléctrico. En el plano del módulo de control de ganancia sobre recepción, Figura 19, el nivel de voltaje AGC que entrega U5 se controla manualmente con R23 para que actúe en la recepción sobre U7 que posee ganancia de lógica negativa, de esta forma, si el voltaje de entrada AGC en U7 es alto, la ganancia de U7 es baja para atenuar la señal captada de la emisión; en el caso de que AGC sea baja, U7 amplifica la señal de recepción que capta el segundo eco y envía la señal de parar el conteo del tiempo al microcontrolador. El módulo de control de ganancia recibe órdenes por el CLEAR del FLIP-FLOP U3 1/2A que viene del inicio del generador de transmisión del emisor, desde Q negado de U2, y recibe orden de la transmisión en el momento de la emisión del cristal, en el punto intermedio entre R3 y R2, indicado en el plano del módulo de transmisión de la señal con la salida cont1, los tiempos coordinados de estas dos señales recibidas determinan el momento en que se hace efectiva la ganancia de U7 en la recepción, R19g en el módulo de control de ganancia, ajustado manualmente, hace que U4 y el Flip-Flop U3 determinen dicho momento, el monoestable U2 determina el ancho del momento en ns, definido por $T=R37(51000) * C20(10pF) = 510 \text{ ns}$; U5 determina el nivel de Voltaje AGC del momento.

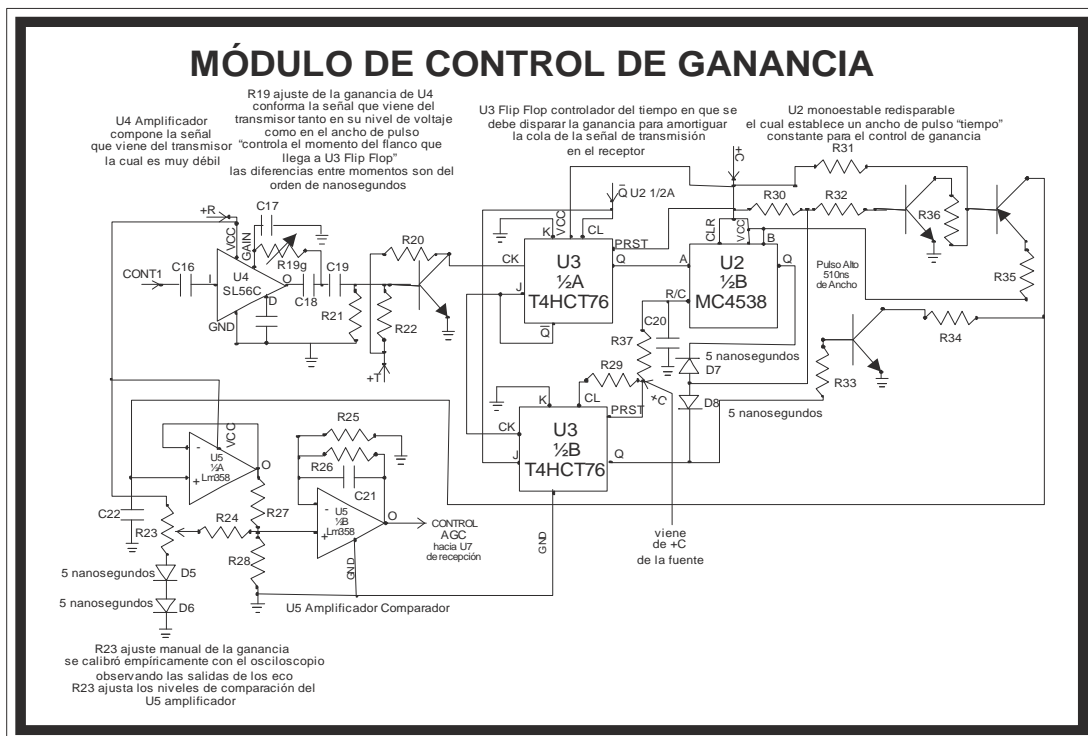


Figura 19 Módulo de control de ganancia

Fuente: Los Autores

3.1.5 Módulo de adquisición y presentación de datos

La adquisición, proceso y presentación de datos del equipo importado, se hace por intermedio de un microcontrolador L7AO114 y software desconocidos, hechos por el fabricante del equipo; el software permite capturar señales de inicio y fin del conteo del tiempo de vuelo de la señal ultrasónica, como también el proceso y la presentación de datos.

4 CAPÍTULO IV

4.1 DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO PROTOTIPO

La necesidad en el ámbito nacional, de una tecnología para la Medición de Espesores y el costo de su importación, hace necesaria la implementación de tecnologías conocidas y desarrolladas, con el fin de combinarlas y obtener un equipo que preste las mismas funciones. El prototipo desarrollado se muestra en las figuras 20 y 21.

4.1.1 Prototipo Desarrollado

Se desarrollaron los módulos Fuente de corriente y el módulo de adquisición, procesamiento y presentación de datos con componentes electrónicos de adquisición nacional, ver Figura 20. Los Módulos de generación y transmisión de la señal ultrasónica, Módulo de recepción de la señal ultrasónica y el Módulo de control de ganancia, fueron descifrados, adaptados e implementados en el prototipo, ver Figura 21.

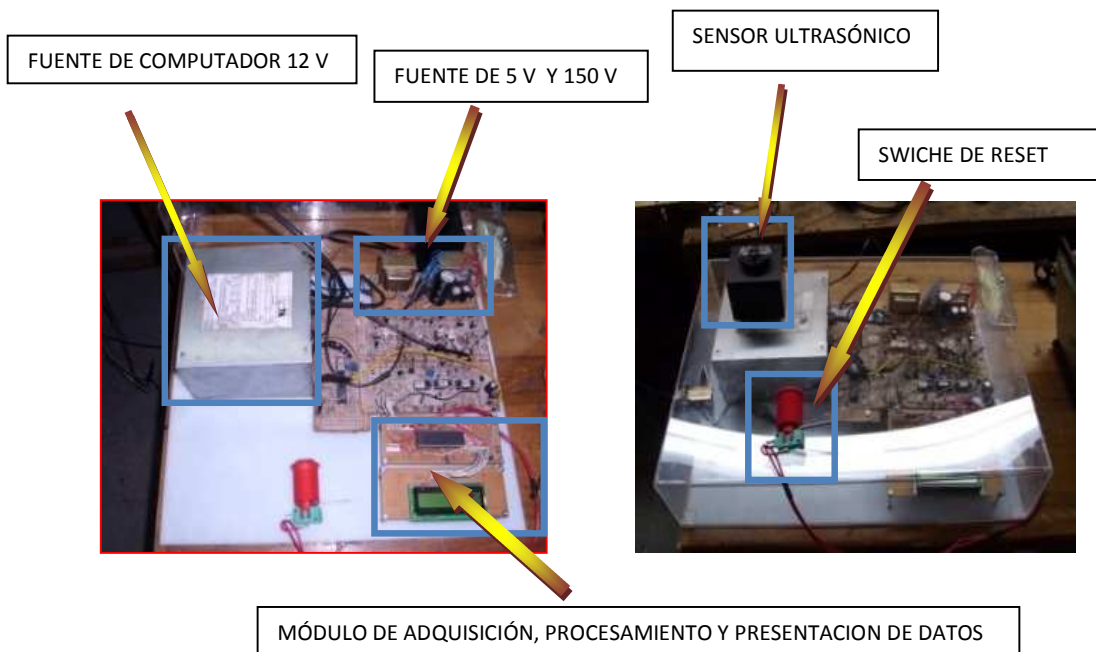
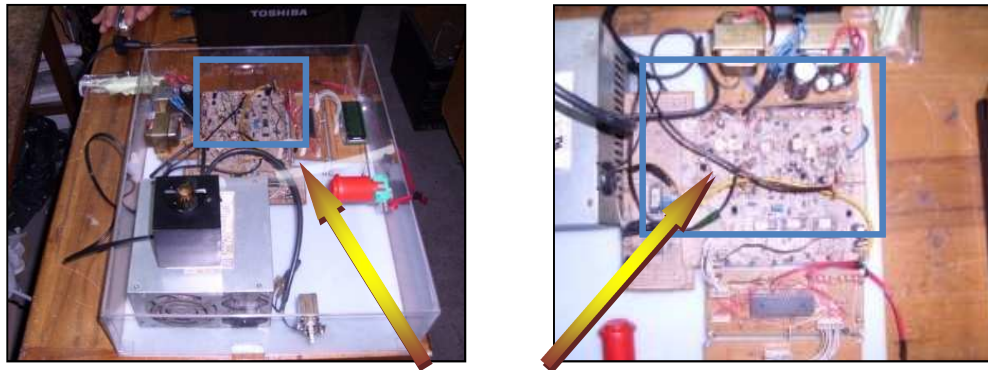


Figura 20 Prototipo módulos desarrollados



MÓDULOS DE GENERACION, RECEPCION y CONTROL DE GANANCIA

Figura 21 Prototipo módulos adaptados

4.1.2 Fuente de corriente

La fuente ideal de un equipo portátil es un inversor que permite un equipo compacto y de bajo peso; desarrollar este módulo es objeto de un proyecto aparte, por tanto, se elige provisionalmente una fuente de swicheo de 12 V, usada en computadores para alimentar los diferentes módulos componentes del prototipo a desarrollar. Los 12 V se regulan a 5 V DC, con un regulador 7805 de 1A y con filtro en la salida de 1000 μ F a 16 V, debido a que uno igual estaba en el original y el regulador es de 200 mA.

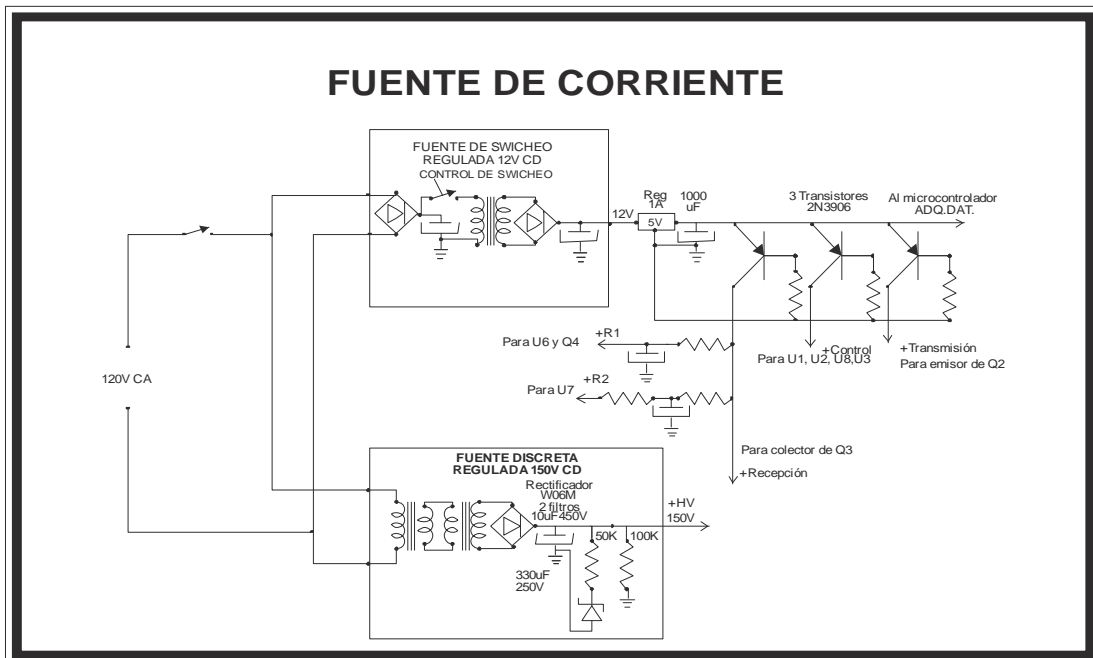


Figura 22 Fuente de corriente

Fuente: Los Autores

El filtro de 1000 μ F 16V, acumula suficiente carga para el consumo de corriente de los circuitos que es muy poco por tanto, alcanza a alimentar todos los módulos sin agotarse; el consumo de corriente de todo el equipo es 50 mA. Posteriormente los 5 V DC se subdividen para independizar la corriente de cada módulo de transmisión, control, recepción y adquisición de datos, a través de transistores 2N3906, evitando así que los transientes de la corriente repercutan entre ellos. Ver plano de Fuente de Corriente Figura 22.

Para alimentar el circuito que activa el cristal emisor ultrasónico del transductor de 5 MHz, se producen 150 V DC, regulados a partir de un sistema de dos transformadores de aislamiento. Cuando se obtiene corriente a partir de corriente alterna de 120 V AC, es necesaria una buena línea a tierra, para que la referencia no tenga ruidos. La acometida de 120 V AC, se transforma a 6 V AC con lo que se alimenta otro transformador de 6 V AC que transforma a 120 V AC; con esto se independiza la referencia de la energía suministrada de la referencia de los circuitos electrónicos. Enseguida se rectifica y se duplica a 240 V DC mediante un puente rectificador de 4 diodos referencia W06M y dos filtros de 10 μ F 50 V luego, se regula con cinco zener de 30 V y un filtro de 330 μ F 450 V lo cual entrega 150 V DC, para suministrar la corriente al cristal emisor ultrasónico.

4.1.3 Módulo de generación y transmisión de la señal ultrasónica

Para definir la periodicidad de la señal que genera la emisión ultrasónica del cristal piezoeléctrico se adaptó la norma ASTM E 1324-00, que indica períodos de 107.778 μ s, se recurrió al integrado CD4047 (astable) cuya frecuencia es regulable con mucha facilidad con el reóstato R10 que garantiza anchos de pulso altos y bajos iguales, ver plano de módulo de la señal ultrasónica, figura 23.

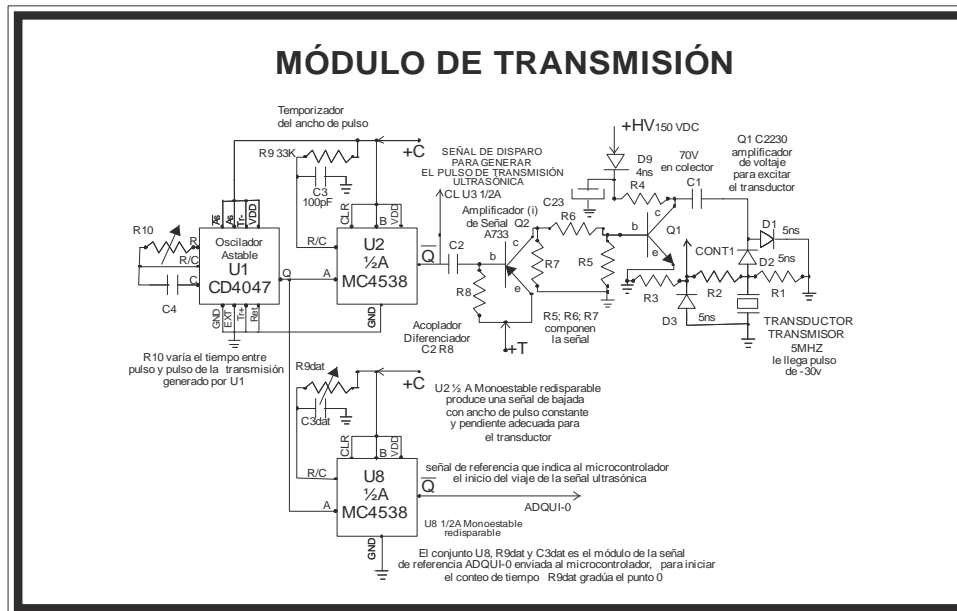


Figura 23 Módulo de generación y transmisión de la señal ultrasónica

Fuente: Los Autores

4.1.4 Forma del pulso

La alimentación del cristal Transmisor Ultrasónico según la norma ASTM E 1324, debe ser un pico negativo, ver Figura 24

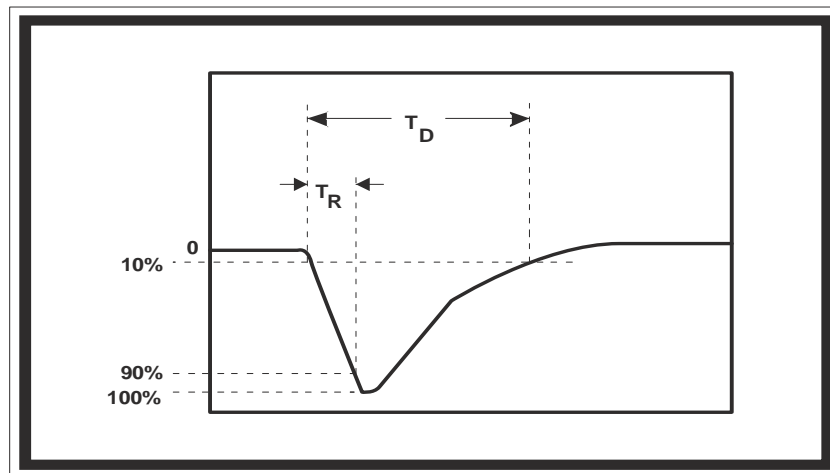


Figura 24 Forma del pulso teórico de un instrumento [10]

4.1.5 Tiempo de bajada

Es el intervalo de tiempo que tarda el pulso generado en pasar del 10% de su amplitud máxima al 90% de la misma T_R del orden de 13.6 ns [10] Ver figura 24

4.1.6 Duración del pulso

Es el intervalo de tiempo entre el 10% de la amplitud máxima en el flanco de bajada y el mismo valor en el flanco de subida T_D del orden de 111.6 ns [10] Ver figura 24.

Este tiempo tiene incidencia sobre la duración del pulso generado por el transductor. Si es muy corto, el pulso generado puede llegar a ser de baja amplitud y si es muy largo el pulso ultrasónico puede deformarse y extenderse innecesariamente, lo que se traduce en una pérdida de resolución axial.

En la realidad, el ancho de pulso es para excitar el amplificador de corriente Q2 referencia A733, a través de un acoplador diferenciador C2-R8.

4.1.7 Módulo de recepción de la señal ultrasónica

Tal como en el equipo original de muestra, la señal del Eco recibida por el cristal receptor es muy débil y debe ser transportada por una señal portadora generada por un tanque oscilador o variante de Pierce, formado por el cristal piezoeléctrico y una bobina, ver plano Figura 25.

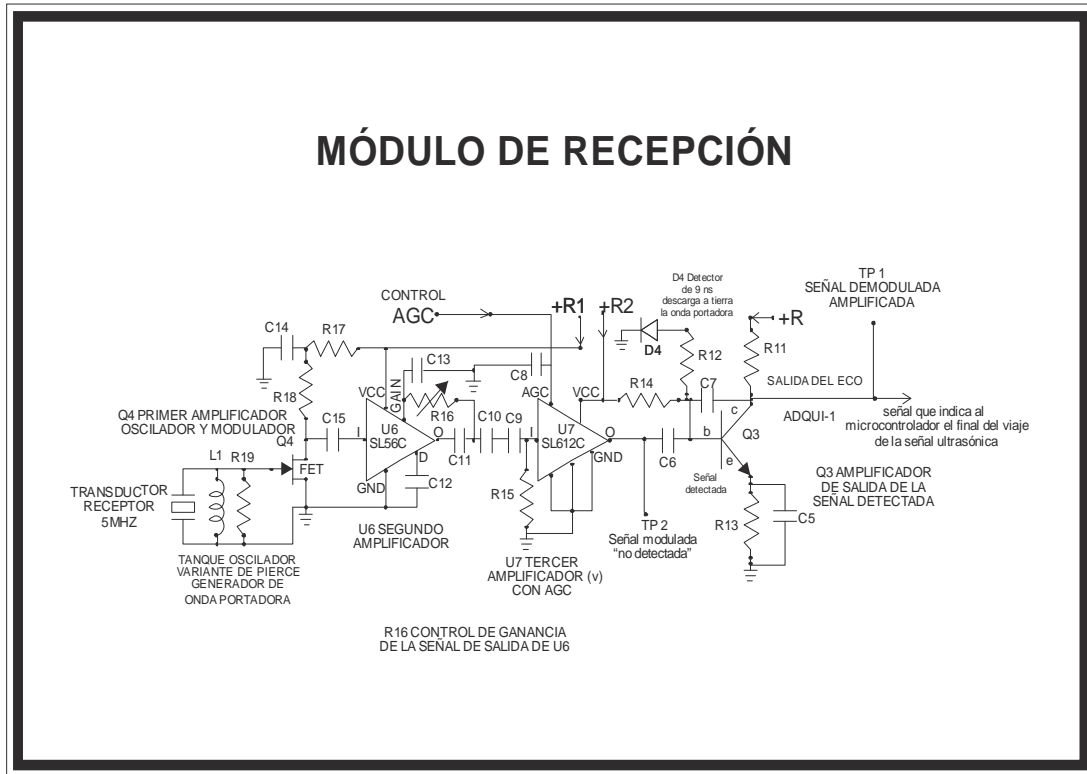


Figura 25 Módulo de recepción de la señal ultrasónica

Fuente: Los Autores

Cuando la señal ultrasónica llega al transductor, modula la señal portadora. La señal modulada por el Eco es amplificada en voltaje en un transistor FET Q4, luego se hace una segunda amplificación en voltaje en el amplificador operacional U6 (SL561C) de ganancia controlada manualmente por R16, posteriormente, se amplifica en voltaje en el circuito integrado U7 amplificador operacional SL612C, de ganancia inversa controlada por el Módulo de Control de Ganancia.

La señal que entrega U7, es detectada por el diodo D4 de 4 ns, que descarga a tierra la parte positiva de la onda modulada, la parte negativa es amplificada en voltaje y corriente e invertida en el transistor amplificador Q3, que envía por el colector una señal de bajo al microcontrolador, para que detenga el tiempo del viaje de la onda.

4.1.8 Módulo de control de ganancia sobre recepción

Tal como en el equipo original, la cercanía entre el cristal receptor y el cristal emisor de la señal ultrasónica, en el momento de la emisión de la señal, el receptor recibe parte de esa señal la cual debe ser atenuada, de tal forma que el microcontrolador no vaya a recibir una falsa señal de finalización del conteo del tiempo desde el módulo de recepción.

En el plano del módulo de control de ganancia sobre recepción, Figura 26, el nivel de voltaje AGC que entrega U5 se controla manualmente con R23 para que actúe en la recepción sobre U7 que posee ganancia de lógica negativa, de esta forma, si el voltaje de entrada AGC en U7 es alto, la ganancia de U7 es baja para atenuar la señal captada de la emisión, en el caso de que AGC sea baja, U7 amplifica la señal de recepción que capta el segundo eco y envía la señal de parar el conteo del tiempo al microcontrolador.

El módulo de control de ganancia recibe órdenes por el CLEAR del FLIP-FLOP U3 1/2A que viene del inicio del generador de transmisión del emisor, desde Q negado de U2, y recibe orden de la transmisión en el momento de la emisión del cristal, en el punto intermedio entre R3 y R2, indicado en el plano del módulo de transmisión de la señal con la salida cont1, los tiempos coordinados de estas dos señales recibidas determinan el momento en que se hace efectiva la ganancia de U7 en la recepción; R19g ajustada manualmente, hace que U4 y el Flip-flop U3 determinen el momento de atenuación; el monoestable U2 determina el ancho (tiempo) del momento en ns, definido por $T=R37(51000\Omega) * C20(10pF) = 510 \text{ ns}$; U5 determina el nivel de Voltaje AGC del momento.

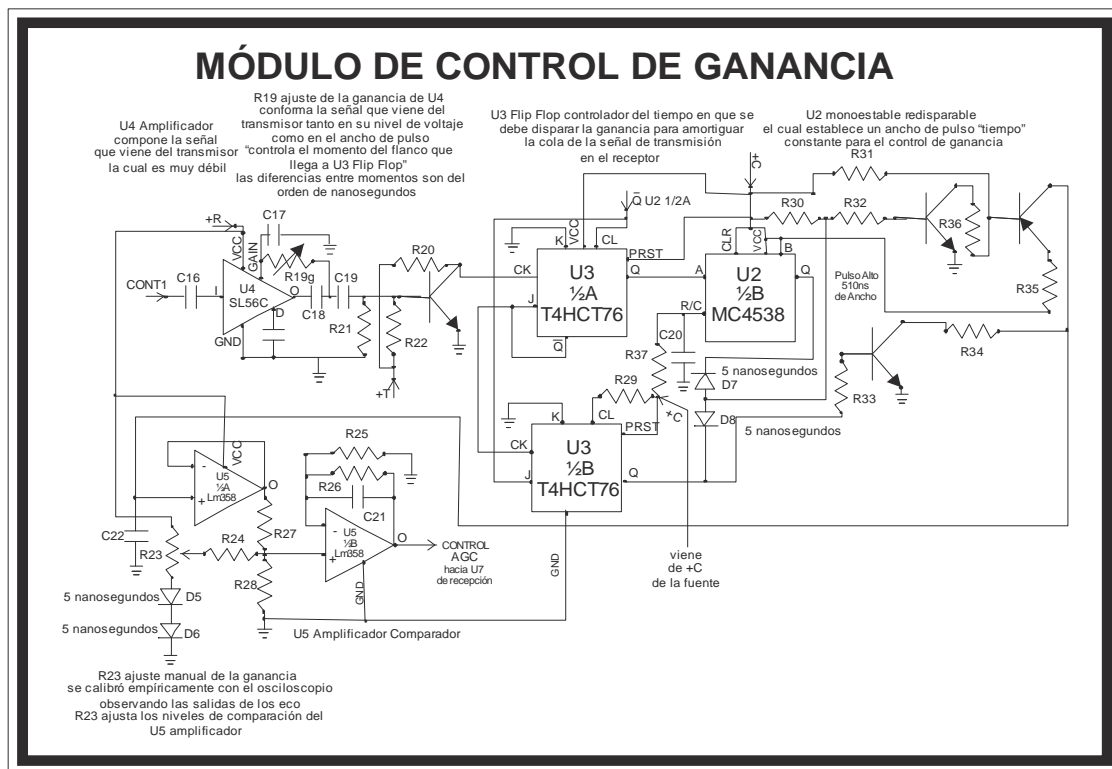


Figura 26 Módulo de control de ganancia
Fuente: Los Autores

4.1.9 Módulo de adquisición de datos

Para medir el Tiempo, se utilizó un microcontrolador 18F452 de 10 MHz, con un cristal externo de 10 MHz y el PLL configurado para 40 MHz, lo que permite capturar la señal de 5MHz del ECO, ver Figura 27.

Con 40 MHz en el reloj TMR0, que trabaja un tiempo real con una frecuencia $f=40 \text{ MHz}/4 \text{ ciclos de máquina} = 10 \text{ MHz}$, lo cual da un período de $0,1 \mu\text{s}$ para capturar la señal del receptor; muestrea dos veces la onda del ECO que tiene una frecuencia de 5 MHz y un período de $0,2 \mu\text{s}$, una longitud de onda de 1,184 milímetros por microsegundo, calculada con la velocidad del sonido en el acero de 5920 m/s ($5,92 \text{ mm}/\mu\text{s}$).

Un patrón de 5,0 milímetros, sería recorrido en $16,9 \mu\text{s}$, así en $0,1 \mu\text{s}$ recorrerá $0,02958 \text{ mm}$, este valor se utiliza en el programa para calcular el espesor de la muestra

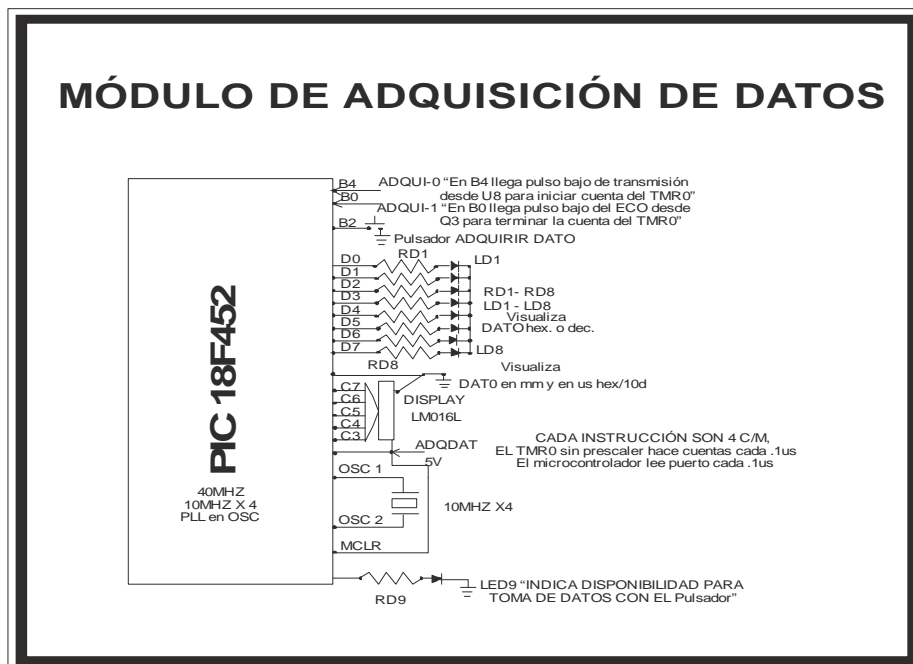


Figura 27 Módulo de adquisición de datos

Fuente: Los Autores

El microcontrolador se prepara a capturar TMR0 de la señal de inicio, colocando el TRM0=0. En el momento del flanco de bajada de la señal de referencia del U8, recibe la señal por el pin RB4, luego se prepara para recibir por el mismo pin RB4, una señal de flanco de subida del U8, que está calibrada con R9 para que coincida con el primer ECO. En este instante el TRM0 graba un valor X e inicia el conteo del tiempo; luego se prepara para recibir un flanco de bajada del segundo ECO por el pin RB0, cuando lo captura hace TRM0= Y y guarda este registro.

Luego calcula el tiempo $T = Y - X$, el resultado lo guarda en un registro, esta operación la realiza 100 veces, calcula el promedio, lo memoriza y lo visualiza con Leds por el puerto D y paralelamente por el puerto C, presenta en un display la medida en sistema decimal y sistema sexagesimal, la cual hay que dividirla por 10. A continuación se presenta el diagrama de flujo del programa, Figuras 28 (a, b y c).

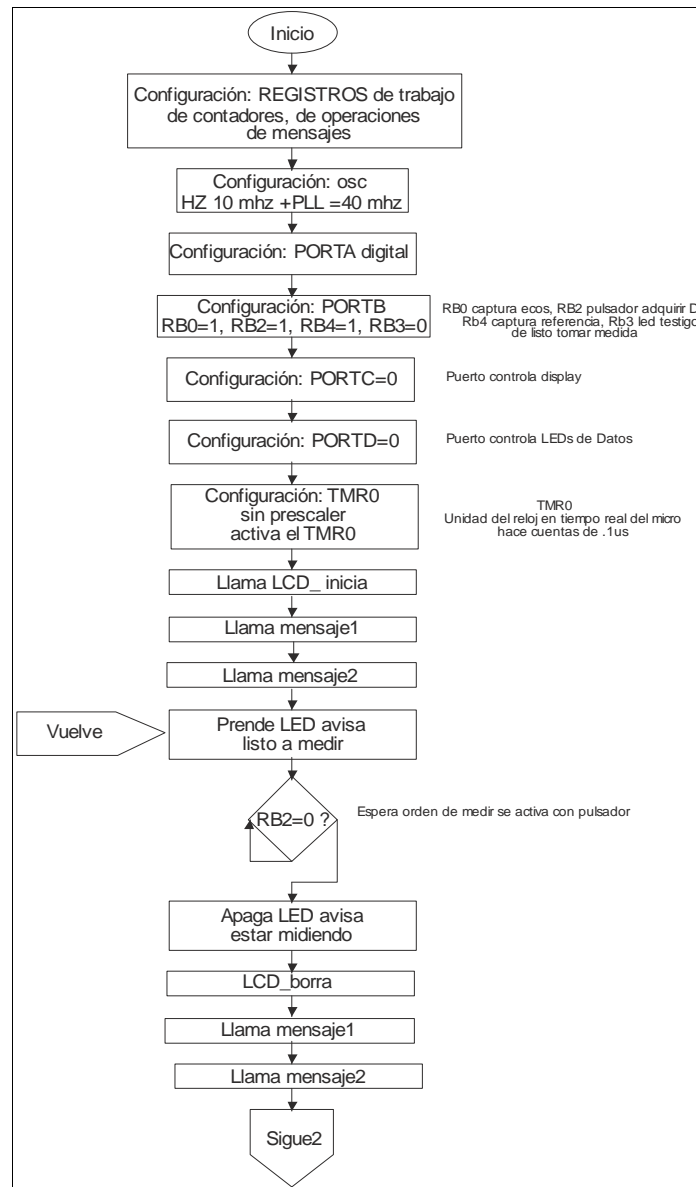


Figura 28a Diagrama de flujo del software

Fuente: Los Autores

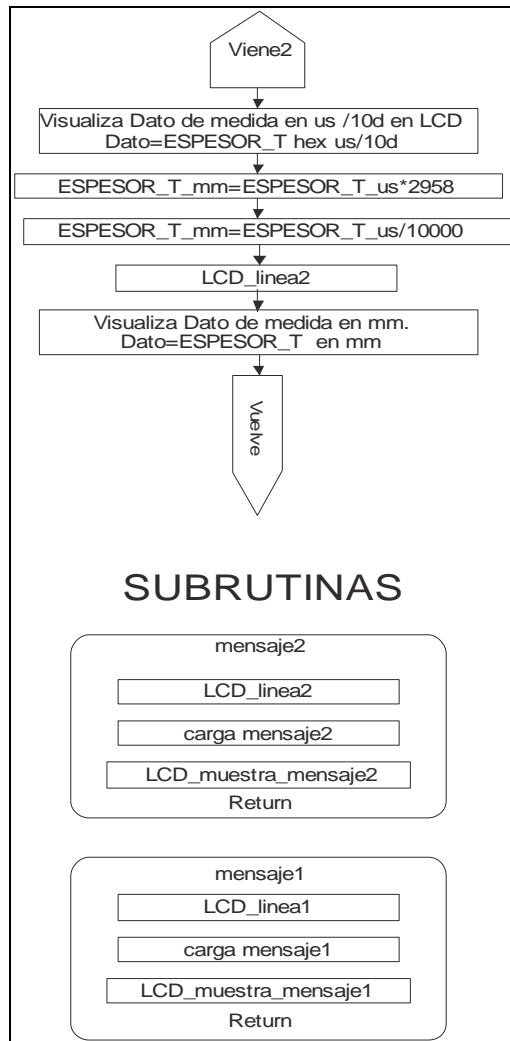


Figura 28c Diagrama de flujo software
Fuente: Los Autores

4.2 PROTOCOLO DE MEDICIÓN

El método de medición de espesores, utilizando señales de sonido ultrasónico emitidas y recibidas por un transductor piezoeléctrico, requiere un buen contacto del transductor con la pieza a medir. Para mejorar la eficiencia del paso de la señal en éste punto, se utiliza como acoplante glicerina carbonatada o en su defecto vaselina.

4.2.1 Pasos a seguir

- 1 Conecte el suministro de corriente.
- 2 Coloque el elemento acoplante sobre la superficie limpia de la pieza a medir.
- 3 Coloque la cara de contacto del transductor sobre el acoplante en la superficie de la pieza a medir haciendo una ligera presión para asegurar el mejor contacto en toda la superficie de la cara de emisión y recepción transductor.
- 4 Oprima el botón de operación del equipo y espere que visualice el resultado de la medición.
- 5 Seleccione el nuevo punto a medir y repita los pasos anteriores.

Debido a que el equipo está calibrado para la velocidad del sonido en acero de densidad $7,86 \text{ gr/cm}^3$, en la Tabla N° 1 se encuentran los coeficientes divisores de compensación para diferentes materiales, con el cual se hace la corrección de la lectura entregada por el equipo.

En el caso de desconocer la densidad de un material, se procede a preparar una muestra del mismo y obtener su dimensión de espesor lo más exacta posible con un micrómetro, luego se mide la muestra con el equipo de ultrasonido, así, el coeficiente divisor para la corrección de la medida se obtiene del cociente de la medida del instrumento ultrasónico y la medida del espesor obtenida con otro instrumento.

El procedimiento de encontrar el coeficiente divisor para la corrección de lecturas en materiales desconocidos es recomendable hacerlo en el momento de instalar equipos a los cuales se les debe hacer un seguimiento de desgaste por su uso.

TABLA N°1 DIVISOR DE CORRECCIÓN EN VARIOS MATERIAL ES¹

MATERIAL	DENSIDAD (gr/cm³)	VELOCI DAD (m/s)	LECTURA EQUIV. 5(mm) ACERO	LECTURA EQUIV. (0,197") ACERO	COEFI CIENTE. DIVISOR CORREC.
ZINC	7,180	4210	3,55	0,140	0,71
ALUMINIO	2,690	6420	5,40	0,213	1,08
EBONITA	1,200	2500	2,10	0,83	0,42
VIDRIO PLANO	2,420	5440	4,60	0,182	0,92
CROMO	7,193	6200	5,25	0,207	1,05
DURALUMINIO	2,790	6320	5,35	0,211	1,07
BRONCE	8,600	4700	4,00	0,158	0,80
CUARZO	2,650	5720	4,85	0,191	0,97
ESTAÑO	7,300	3320	2,80	0,110	0,56
ACERO INOX. 304	7,910	5790	4,90	0,193	0,98
ACERO INOX. 403	7,780	6100	5,20	0,205	1,04
HIERRO		4600	4,00	0,158	0,80
ACERO	7,860	5900	5,00	0,197	1,00
COBRE	8,960	5010	4,25	0,168	0,85
NYLON 66	1,110	2620	2,20	0,087	0,44
POLIETILENO	0,900	1950	1,65	0,065	0,33
PVC	1,350	2400	2,00	0,080	0,40

¹ http://www.engineeringtoolbox.com/speed-sound-d_82.html

5 CAPÍTULO V

5.1 APLICACIONES Y PRUEBAS EN CAMPO

5.1.1 Prueba realizada en el Ingenio Risaralda S.A. (IRISA)

Se llevó a cabo una aplicación experimental en las instalaciones del Ingenio Risaralda, donde se realizaron mediciones en bloques patrón, tanques y tuberías, tanto con el equipo prototipo como también con un equipo moderno de medición por ultrasonido referencia CL5 Krautkramer, perteneciente al Ingenio Risaralda S.A., con lo cual se logró al mismo tiempo establecer una comparación del prototipo con un equipo de referencia de las siguientes características:

- Principio de operación: Puso-eco
- Rango: 0.18 a 25.4 mm
- Materiales de prueba: Acero, Aleaciones de acero, Hierro maleable, Aluminio, Cobre, Bronce, Acero Inoxidable, Titanio, Zinc, etc.
- Exactitud: +/- 0.005% de la lectura o +/- 0.001 mm
- Resolución: 0.001 mm
- Rango de velocidad: 1000 a 19, 000 m/s
- Frecuencia de operación: 15 MHz



Figura 25 Equipo de comparación CL5 Krautkramer (IRISA)

Fuente: [www. Krautkramer.com](http://www.Krautkramer.com)

El uso del sistema de medición por ultrasonido en aplicaciones industriales brinda la ventaja de medir desde un solo lado el espesor de un material y en casos de control de desgaste por corrosión o abrasión en tuberías y tanques, éstos pueden estar en funcionamiento para llevar dicho control.

En la práctica se reemplazan tuberías y tanques cuando el material ha perdido el 50% del espesor original si está sometido a presiones de 350 PSI, si no está

sometido a presiones considerables, es decir del orden de 110 PSI, se admite un 70% de desgaste en el espesor.

En las Tablas 2 y 3 se presentan los resultados de las mediciones de espesores realizadas en bloques patrón y en equipos de las instalaciones del Ingenio Risaralda. Estas tablas son complementadas con fotografías que pueden verse en el Anexo 1.

TABLA N°2 MEDICIÓN DE BLOQUES PATRÓN

Espesor de patrón(mm)	Equipo IRISA(mm)	Equipo Prototipo (mm)
30	30,120	30,270
20	20,090	20,080
10	10,040	10,000
9,5	9,537	9,440
9,0	9,028	9,120
8,5	8,503	8,560
8,0	8,022	8,240
7,5	7,508	7,600
7,0	7,005	7,040
6,5	6,504	6,480
6,0	5,990	6,160
5,5	5,466	5,600
5,0	5,001	5,280
4,5	4,493	4,720
4,0	3,990	4,400
3,5	3,500	3,840
3,0	3,000	3,050

TABLA N°3 MEDICIONES EN EQUIPOS

Equipo	Equipo IRISA(mm)	Equipo Prototipo (mm)
Tubo Acero #1 ac. Inox.	12,208	12,080
Tubo Acero #2 ac. Inox.	5,592	5,770
Tubería filtros ac. #3	5,447	5,600
Tanque Filtro de arena	5,410	5,250
Tapa de carga Filtro de arena	12,430	12,720
Tubo agua Motobomba Acero Inoxidable	6,003	6,160

5.1.2 CALIBRACIÓN DEL EQUIPO PROTOTIPO

El equipo prototipo se sometió a prueba de calibración en el Laboratorio de Metrología Dimensional de la Universidad Tecnológica de Pereira, ver certificado de calibración Anexo 2, en el que se puede destacar que el máximo error es de 0,07 mm y que opera con una Incertidumbre expandida de 5,77 μm y un nivel de confianza del 95% con factor de cobertura $K=2$.

6 CAPÍTULO VI

6.1 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la tabla 4, se observa en la columna de error (comparación con patrones) para el equipo prototipo que la diferencia máxima es de 0,24 mm lo cual permite garantizar que este error no es crítico para el tipo de aplicaciones que motivaron la construcción de este.

En la práctica se reemplazan tuberías y tanques cuando el material ha perdido el 40% del espesor original si está sometido a presiones superiores a 350 PSI, si no está sometido a presiones considerables, es decir del orden de 110 PSI, se admite un 60% de desgaste en el espesor. Siendo estas recomendaciones hechas por fabricantes de tubos y equipos analizadores de espesores.

En el certificado de calibración realizado en el laboratorio de metrología dimensional de la Universidad tecnológica de Pereira se corrobora la anterior apreciación al observar la incertidumbre de medición del equipo la cual es de 5,77 μ m. Ver anexo 2

El costo de este prototipo permite considerar la factibilidad de construir este tipo de equipos en el país, permitiendo ser competitivo el precio de un equipo de estos construido en Colombia vs. Importado

Se encontró dificultad, en el momento de adquirir algunos elementos para la construcción de los módulos y se pudo comprobar que, con los elementos que se consiguen en el mercado y con instrumentos no muy sofisticados se puede construir un prototipo comercial.

TABLA N°4 MEDICIONES CON EQUIPOS PROTOTIPO E IRISA

BLOQUE PATRON (mm)	EQUIPO PROTOTIPO	ERROR EQUIPO PROTOTIPO	EQUIPO IRISA	ERROR EQUIPO IRISA
3,00	3,05	0,05	3,00	0,00
3,50	3,52	0,02	3,50	0,00
4,00	4,08	0,08	3,99	-0,01
4,50	4,40	-0,10	4,49	-0,01
5,00	4,96	-0,04	5,00	0,00
5,50	5,57	0,07	5,47	-0,03
6,00	5,92	-0,08	5,99	-0,01
6,50	6,48	-0,02	6,50	0,00
7,00	7,04	0,04	7,01	0,00
7,50	7,36	-0,14	7,51	0,01
8,00	7,92	-0,08	8,02	0,02
8,50	8,56	0,06	8,50	0,00
9,00	8,88	-0,12	9,03	0,03
9,50	9,44	-0,06	9,54	0,04
10,00	10,00	0,00	10,04	0,04
20,00	19,76	-0,24	20,09	0,09
30,00	29,79	-0,21	30,12	0,12

6.2 CONCLUSIONES

1. Si se puede construir en Colombia un equipo ultrasónico con módulos de generación y recepción de señales ultrasónicas y presentación de datos para Medición de Espesores, de pared en tubos y tanques que permita la toma de decisiones en el mantenimiento de esta clase de piezas de manera confiable.
2. Económicamente es posible construir un equipo ultrasónico para la medición de espesores, todos los componentes son de bajo costo y adquisición nacional excepto el transductor y receptor de señal ultrasónica, elemento más costoso (\$700.000 a \$2.000.000) dependiendo del alcance de señal requerida. Un equipo importado cuesta del orden de \$ 15.000.000.
3. Después de hacer un trabajo de campo en el Ingenio Risaralda, se encontró una diferencia en la medida de patrones entre el prototipo y el equipo del Ingenio Risaralda Referencia CL5 KRAUTKRAMER, de 2 décimas de milímetro en patrones superiores a 2 milímetros y menores de 25 milímetros, diferencia que se considera no perjudicial para las aplicaciones industriales propuestas en este proyecto.
4. De acuerdo con el Certificado de Calibración 000067 realizado por el LABORATORIO DE METROLOGÍA DIMENSIONAL, DE LA UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, la incertidumbre para el medidor de sólidos es de +/- 5,67 μm calculada con un nivel de confianza del 95% utilizando un factor de cobertura de K=2; lo cual indica la alta exactitud del prototipo
5. Una vez confirmada la viabilidad y la factibilidad de construcción del prototipo a nivel científico, tecnológico y comercial, puede desarrollarse una fuente independiente de la red pública, que permita la construcción de un equipo más compacto y portátil, utilizando un sistema de batería e inversor.

6.3 Bibliografía

- [1] Francisco Martínez Pérez, Ciencia y técnica para el mantenimiento editorial Limusa, segunda edición 1997
- [2] Jorge Humberto Yusti Ruiz, Diseño de un sistema de adquisición Conversión y procesamiento de señales ultrasónicas, tesis U.T.P. 2000
- [3] Ramón Pallás Areny, Sensores y Acondicionadores de señal, Ed. Marcombo 1994 3ª ed.
- [4] Vázquez Blanco Alejandro M. Sc.Transformadores piezoeléctricos: Una alternativa para implementar balastos electrónicos compactos, Tesis Maestría Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico cenidet Cuernavaca, Morelos 2002
- [5] Bannister B.R. & Whitehead D.G., "Instrumentación Transductores e interfaz", Ed. Addison-Wesley Iberoamericana, 1994.
- [6] Messineo María G., Eliçabe Guillermo E., Frontini Gloria L. Análisis inverso de señales de ultrasonido para determinar constantes elásticas, Instituto de Investigación en Ciencia y Tecnología de Materiales (CONICET).Departamento de Matemática, Facultad de Ingeniería.gfrontin@fi.mdp.edu.ar Universidad Nacional de Mar del Plata.
- [7] A. Cooper W.D, & helfrick d. "Instrumentación Electrónica Moderna y Técnicas de Medición", Ed. Prentice Hall 1991.
- [8] J. David N. Cheeke, Fundamentals and applications of ultrasonic waves. 2002 CRC series.
- [9] http://fain.uncoma.edu.ar/materias/ensayos_no_destructivos/Catedra_END/6-Ultrasonido/Apunte_US.pdf, Echevarria Ricardo, ULTRASONIDO, Lab.END – F.I. -- Univ. Nac. Comahue año 2002
- [10] <http://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/111.pdf> Alejandro García, Carlos Desimone, Pablo Katchadjian U. A. Ensayos No Destructivos y Estructurales, Comisión Nacional de Energía Atómica, Pablo. Katchadjian@cnea.gov.ar , Caracterización de equipos de END. Ejemplo de aplicación en equipos de Ultrasonido. IV Conferencia Panamericana de END Buenos Aires – Octubre 2007

- [11] <http://www.ndt.net/article/0598/en126681/EN126681.htm> EN 12668-1. Non Destructive Testing – Characterization and Verification of Ultrasonic Examination Instruments.
- [12] ASTM website, www.astm.org ASTM E 1324-00. Standard Guide for measuring some Electronic Characteristics of Ultrasonic Examination Instruments.
- [13] <http://www.ndt.net/article/0598/en126681/en126681.htm> Kenneth A. Fowler, Gerry M. Elfbaum, Karen A. Smith and Thomas J. Nelligan, Theory and application of precision ultrasonic thickness gaging ndtnet - october 1997, vol.2 no.10
- [14] Jarlath Mc Hugh M. Sc., Ultrasound Technique for the Dynamic Mechanical Analysis (DMA) of Polymers BAM-Dissertationsreihe Band 31 Berlin 2008 BAM-Dissertationsreihe , Band 31 Berlin 2008
- [15] Avendaño Luis Enrique M. Sc. Fundamentos de instrumentación Universidad Tecnológica de Pereira 2008.
- [16] Buban Peter, Malbino Albert Paul, Schmit Marshall L. Electricidad y Electrónica, Editorial Mc. Graw Hill 1987.
- [17] Millman J., Halkias C. C., Electrónica Integrada Editorial Hispano Europea 1995.
- [18] Graf F. Rudolf, Encyclopedia of Electrónica Circuits, Editorial Mc. Graw Hill 1985

ANEXO 1

PRUEBAS EN CAMPO INGENIO RISARALDA S. A. (IRISA)



Figura Medición Tubo N°1 Acero Inoxidable (equipo Prototipo)



Figura Medición Tubo N°1 Acero Inoxidable (equipo IRISA)



Figura Medición Tubo N°2 Acero Inoxidable (equipo IRISA)



Figura Planta de agua Tubo N°3 Acero (equipo Prot otipo)



Figura Planta de agua Tubo N°3 Acero (equipo IRIS A)



Figura Tapa filtro planta agua Acero (equipo Prototipo)

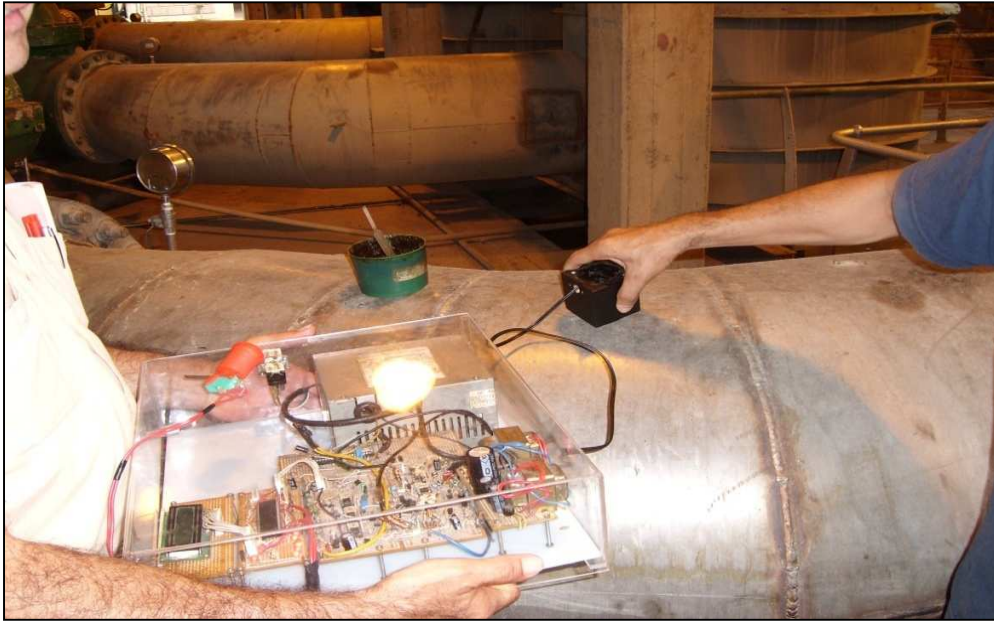


Figura Tubo succión bomba Acero Inoxidable (equipo Prototipo)



Figura Tubo succión bomba Acero Inoxidable (equipo IRISA)

ANEXO 2

CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN



Universidad
Tecnológica
de Pereira



UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
LABORATORIO DE METROLOGÍA DIMENSIONAL

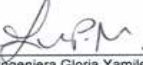
CERTIFICADO DE CALIBRACIÓN

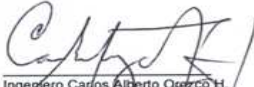
NUMERO: 000067
Number

AREA:	MEDICIONES INDUSTRIALES
Area	
INSTRUMENTO:	MEDIDOR DE SOLIDOS POR ULTRASONIDO
Instrument	
RANGO DE MEDICIÓN:	2 - 25 mm
Measurement range	
SOLICITANTE:	CARLOS ARMANDO SILVA
Customer	
DIRECCIÓN:	UTP Vereda la Julita Pereira
Address	
FECHA DE RECEPCIÓN:	2009/12/09
Date of Reception	
FECHA DE CALIBRACIÓN:	2009/12/10
Date of Calibration	
NÚMERO DE PÁGINAS DEL CERTIFICADO INCLUYENDO ANEXOS:	3
Number of pages of this Certificate and documents attached	

FIRMAS AUTORIZADAS
Authorized signatories


Tecnólogo Johan Andrés Gómez
Realizado por: Calibrate by:


Ingeniera Gloria Yamile Parra
Revisado por: Checked by:


Ingeniero Carlos Alberto Orozco H.
Head in Charge Laboratory

Fecha de emisión: 2009/12/14
Date of issue:

Los certificados en las firmas autorizadas no tienen validez.
El usuario es responsable de la recalibración de sus instrumentos a intervalos apropiados.
The user is responsible for having his instruments calibrated at appropriate intervals.

Este certificado expresa fielmente el resultado de las mediciones realizadas. No podrá ser reproducido parcialmente, excepto cuando se haya obtenido previamente permiso por escrito del laboratorio que lo emite.
This certificate is an accurate record of the performed measurements' results. This certificate may not be partially or totally reproduced, except the issuing laboratory.

Los resultados obtenidos en el presente certificado se refieren al momento y condiciones en que se realizaron las mediciones. El laboratorio que lo emite no se responsabiliza de los prejuicios que pueden derivarse del uso inadecuado de los instrumentos calibrados.
The results of this certificate refer to the moment and conditions in which the measurement were made. The issuing laboratory assumes no responsibility to the misuse of the calibrated instruments.

Pág 1 de 3



Acreditada Institucionalmente de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional
NIT: 891.480.035-9 - Apartado Aéreo: 097 - Tel. Conmutador: (57) (6) 313 7300 - Fax: 321 3206
www.utp.edu.co - Pereira (Risaralda) Colombia



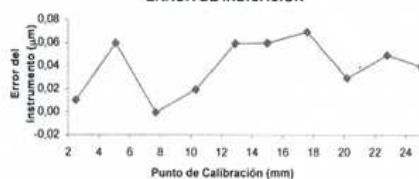
METODO DE MEDICIÓN (CALIBRACIÓN)

Este instrumento fue calibrado por el método de medición por comparación para calibración de micrómetros según el procedimiento LMD-PT-002 y según la norma NTC 4352 (Micrómetros para exteriores. Conceptos, requisitos y Ensayos).

RESULTADOS DE LA CALIBRACIÓN

Punto de Calibración del Medidor de sólidos	Error del instrumento	Incertidumbre Expandida de Medición
mm	μm	μm
2,00	0,06	5,77
2,50	0,01	5,77
5,10	0,06	5,77
7,70	0,00	5,77
10,30	0,02	5,77
12,90	0,06	5,77
15,00	0,06	5,77
17,60	0,07	5,77
20,20	0,03	5,77
22,80	0,05	5,77
25,00	0,04	5,77

ERROR DE INDICACIÓN



INCERTIDUMBRE DE LA MEDICIÓN

La incertidumbre para el Medidor de sólidos es de: $\pm 5,77 \mu\text{m}$
La incertidumbre de medición ha sido calculada con un nivel de confianza de 95% utilizando un factor de cobertura de $K=2$.

TRAZABILIDAD

El Laboratorio de Metrología Dimensional de la Universidad Tecnológica de Pereira - Área de Mediciones Industriales, asegura el mantenimiento de la trazabilidad de los patrones de trabajo utilizados en estas mediciones con los Patrones Nacionales de Referencia. El Laboratorio de Metrología Dimensional de la Universidad Tecnológica de Pereira custodia y mantiene estos patrones los cuales han sido certificados por la DM (División de Metrología) de la Superintendencia de Industria y Comercio según certificados No. 19026.





Universidad
Tecnológica
de Pereira

LABORATORIO DE METROLOGÍA DIMENSIONAL UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
Certificado de Calibración 000067

OBSERVACIONES

Este instrumento fue calibrado a una temperatura de 20,2°C y una humedad relativa de 60,4 %. Los resultados de la medición son válidos únicamente en el momento de la calibración.

Pág 3 de 3



Acreditada Institucionalmente de Alta Calidad por el Ministerio de Educación Nacional
NIT: 891.480.035-9 - Apartado Aéreo: 097 - Tel. Conmutador: (57) (6) 313 7300 - Fax: 321 3206
www.utp.edu.co - Pereira (Risaralda) Colombia

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA MEDIR
ESPEORES EN TUBERÍA Y TANQUES METÁLICOS MEDIANTE LA
UTILIZACIÓN DE SEÑALES DE ULTRASONIDO**

ING. WILLIAM OLARTE CORTES

ING. CARLOS ARMANDO SILVA ORTEGA

UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA

FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS

MAESTRIA EN INSTRUMENTACIÓN FÍSICA

Pereira, Junio de 2010

**DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN DISPOSITIVO PARA MEDIR
ESPEORES EN TUBERÍA Y TANQUES METÁLICOS MEDIANTE LA
UTILIZACIÓN DE SEÑALES DE ULTRASONIDO**

**UNIVERSIDAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA
FACULTAD DE CIENCIAS BÁSICAS
MAESTRIA EN INSTRUMENTACIÓN FÍSICA**

Por:

ING. WILLIAM OLARTE CORTES

ING. CARLOS ARMANDO SILVA ORTEGA

M. Sc. JAIRO ALBERTO MENDOZA VARGAS

Director

**Tesis presentada como requisito para optar al título de Magister en
Instrumentación Física**

Pereira, Junio de 2010

Nota de Aceptación:

Director

Jurado

Pereira, Junio de 2010

DEDICATORIA

Carlos A. Silva O.

Al todo poderoso que me permitió estar aquí y a mis padres que me han ayudado desde que nací.

William Olarte C.

A Dios nuestro señor que ha sido mi acompañante en todos los momentos de mi vida y mi guía.

A mis padres, mi esposa, mis hijos y a todas las personas que me apoyaron en este proyecto.

AGRADECIMIENTOS

Queremos dar un sincero agradecimiento a todos nuestros profesores de la Maestría, quienes con sus conocimientos nos motivaron a la realización de este proyecto.

A nuestro director de proyecto M. Sc. Jairo Mendoza, quien estuvo en el momento oportuno para mostrarnos los errores cometidos.

Al director del programa M. Sc. William Ardilla U., de quien recibimos constante apoyo.

Un agradecimiento muy especial al Economista y Técnico en Electrónica Fernando León Medina Gallego, que con sus conocimientos y apoyo permanente contribuyó al desarrollo de este proyecto.

Tabla de contenido

1. CAPÍTULO I.....	1
1.1 Introducción.....	1
1.1.1 Antecedentes.....	1
1.1.2 Objetivos	2
1.1.3 Objetivo General:.....	2
1.1.3.1 Objetivos Específicos	2
1.2 Producción de una onda sonora.	2
1.3 Velocidad del sonido.....	3
1.4 Sonido físico y sensación sonora	5
1.5 CUALIDADES DEL SONIDO.....	5
1.6 Intensidad	6
1.7 Tono.....	6
1.8 Timbre.....	6
1.9 Fenómenos Ondulatorios	7
1.10 Reflexión y refracción de las ondas	8
1.11 Difracción	10
1.12 Propagación de ondas y análisis dinámico mecánico.....	10
1.12.1 Propagación de ondas.....	10
1.12.2 Oscilaciones mecánicas y teoría de ondas	12
1.13 Piezoelectricidad	15
1.13.1 Efecto piezoeléctrico.....	15
1.13.2 Definición de efecto piezoeléctrico:	15
1.13.3 Base Teórica	19
1.13.4 Circuito Equivalente de un cristal piezoeléctrico.....	20

1.13.5	Materiales Piezoeléctricos	22
1.14	Clases de Transductores Piezoeléctricos	23
1.14.1	Transductores de contacto.....	23
1.14.2	Transductores de haz recto.....	23
1.14.3	Transductores de incidencia angular.....	23
1.14.4	Tipos de Transductores angulares.....	23
2	CAPÍTULO II.....	24
2.1	INSTRUMENTACIÓN ORIENTADA AL ULTRASONIDO.....	24
2.1.1	Marco histórico.....	24
2.2	Equipo básico	27
2.3	Diseño propuesto	28
3	CAPÍTULO III.....	29
3.1	ANÁLISIS Y DESCRIPCIÓN DE UN EQUIPO IMPORTADO	29
3.1.1	Módulo fuente de corriente.....	30
3.1.2	Módulo de generación y transmisión de la señal ultrasónica.....	31
3.1.3	Módulo de recepción de la señal.....	32
3.1.4	Módulo de control de ganancia.....	32
3.1.5	Módulo de adquisición y presentación de datos.....	34
4	CAPÍTULO IV.....	35
4.1	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DEL EQUIPO PROTOTIPO.....	35
4.1.1	Prototipo Desarrollado.....	35
4.1.2	Fuente de corriente	36
4.1.3	Módulo de generación y transmisión de la señal ultrasónica.....	37
4.1.4	Forma del pulso	38
4.1.5	Tiempo de bajada	38

4.1.6	Duración del pulso	38
4.1.7	Módulo de recepción de la señal ultrasónica.....	38
4.1.8	Módulo de control de ganancia sobre recepción	39
4.1.9	Módulo de adquisición de datos.....	41
4.2	PROTOCOLO DE MEDICIÓN.....	45
4.2.1	PASOS A SEGUIR	45
5	CAPÍTULO V.....	47
5.1	APLICACIONES Y PRUEBAS EN CAMPO	47
5.1.1	Prueba realizada en el Ingenio Risaralda S.A. (IRISA).....	47
5.1.2	CALIBRACIÓN DEL EQUIPO PROTOTIPO	49
6	CAPÍTULO VI.....	50
6.1	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	50
6.2	CONCLUSIONES	52
6.3	Bibliografía	53
ANEXO 1	58
ANEXO 2	63