

“Empleo del método ultrasónico en la detección del nivel de colmatación de los filtros rotatorios “

Reinaldo Ihosvanny Benítez Montalvo.
Calle 15 esquina 216 Atabey Playa
Centro de Inmunología Molecular
reynaldo@cim.sld.cu

RESUMEN

Con el propósito de determinar el nivel de colmatación de los filtros rotatorios en los fermentadores R1 y R3 se calcula la velocidad de propagación de las ondas ultrasónicas sobre la malla de espesor constante, tomando en cuenta las propiedades mecánicas del material del cual es fabricado (acero inoxidable austenítico), el comportamiento de la onda según la temperatura del medio y la resistencia que se produce al paso de la onda con el incremento de la colmatación de la malla. Esto permitió además obtener con el empleo del método estadístico Startgraphic la ecuación de regresión que permite calcular la velocidad del sonido en el medio de cultivo en función de la temperatura, el comportamiento de la velocidad de propagación de la onda en función del por ciento de porosidad de la malla así como la amplitud de la onda.

1. INTRODUCCIÓN

A pesar de las ventajas del sistema de perfusión con filtros rotatorios externos, la acumulación de células en los agujeros de la malla durante el proceso de filtración provoca que estos se colmaten con cierta frecuencia, disminuyendo su rendimiento y provocando la intervención del personal de mantenimiento en el desmonte y desarme de los mismos para realizar la limpieza de la malla filtrante de manera manual. La decisión de realizar esta acción es determinada por el personal del área que los utiliza, según los volúmenes de cosecha obtenida. Ante esta dificultad se pretende con el empleo del método de ultrasonido, y los parámetros que lo caracterizan **tiempo de tránsito, atenuación, reflexión y frecuencia** y además tomando en cuenta la correlación con los cambios **de las propiedades físicas, dureza, módulo de elasticidad, densidad, homogeneidad, estructura y grano del material**, determinar de manera más precisa en que medida están obstruidos los agujeros de la malla filtrante y requiere ser removida para su limpieza.

Al tomar como base que las ondas sonoras son vibraciones mecánicas que viajan a través de un medio sólido, líquido o, un gas, que la propagación de las mismas a través del medio dado, es a una velocidad específica, dirección predecible y que cuando estas encuentran un límite con un medio

distinto y con diferente impedancia mecánica, se reflejan o se transmiten según reglas conocidas, es que este principio físico se utiliza para la detección de fallas en los materiales.

Al procesar las señales de las ondas sonoras se conoce el comportamiento de las mismas durante su propagación en el interior de la pieza y que dependen de las discontinuidades del material examinado, lo que permite detectar defectos como poros, fisuras, también conocer las propiedades básicas de los líquidos y sólidos como la composición, estructura, y dimensiones (espesor, diámetro, tamaño de la separación, tamaño de la discontinuidad), etc.

MATERIALES

Rotofilter: Dispositivo de filtración externo encargado de la retención de las células a través del método de perfusión, puede ser desmontado, limpiado, reconectado y esterilizado durante el cultivo por ser redundante en el fermentador de ahí su flexibilidad con respecto Spinfilter Consta de un cilindro de diámetro pequeño en comparación con la altura , su movimiento alrededor de su eje central crea la turbulencia necesaria en la vecindad de la malla para retener los sólidos en suspensión , esta última es fabricada de acero inoxidable con varios tamaños de mesh que oscilan entre 2-60 μ m , lo que permite la retención de las células con un 90% de eficiencia . [1]

Palabras Claves

END: El ensayo no destructivo (END) ha sido definido como aquellos métodos de ensayos que comprenden los utilizados para examinar un objeto, material o sistema sin afectar su utilidad futura

Frecuencia (f): Es el número de oscilaciones de una partícula en la unidad de tiempo.

Longitud de onda (λ): Es la distancia entre dos planos en que las partículas se encuentran en el mismo estado de movimiento .Es inversamente proporcional a la frecuencia.

Velocidad acústica (C): Es la velocidad de propagación de la onda.

Velocidad de vibración (v): Es la velocidad propia de la partícula en su movimiento de vibración. Cuando se refiere a su valor máximo se simboliza (V).

Amplitud (A): Es el máximo desplazamiento de una partícula de su posición de equilibrio.

Presión acústica (P): Es la presión que sobre un plano ejercen las partículas en su movimiento oscilatorio.

Impedancia acústica (Z): Es la resistencia que opone un medio a la vibración de las partículas.

Ondas longitudinales: Son las ondas en que las partículas vibran en la misma dirección en que se propaga la onda.

Ondas transversales: Son las ondas en que las partículas vibran en dirección transversal a la dirección de propagación de la onda

Ondas superficiales: Son un tipo especial de ondas transversales que se propagan por la superficie del material

Superficie límite: Toda frontera que separa dos medios que presentan diferencias

Colmatar: Rellenar una hondonada o depresión mediante sedimentación de materiales transportados por un fluido.

Área efectiva (Ae): Porcentaje de la superficie de todas las aberturas de mallas en el área de tamizado total o bien proporción entre el cuadrado de la luz de la malla (w) y el cuadrado de la dimensión nominal de la malla (p), redondeado a un valor porcentual sin decimales.

Área abierta de un filtro o área efectiva del medio filtrante, es la sumatorio de todos los orificios que contienen la malla del filtro.

Luz: Distancia entre dos alambres contiguos de urdimbre o trama, medida en proyección plana y en el centro de la malla en sus propiedades.

Mesh: Número de malla por pulgada inglesa [9], [11]

2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

TIPOS DE ONDAS. MODOS

Existen diferentes modos de vibración que dan lugar a diferentes tipos de ondas ultrasónicas que por su naturaleza tienen comportamientos diferentes al propagarse por un material, y esto determina su aplicación en dependencia de los objetivos del ensayo.

- Ondas longitudinales
- Ondas transversales
- Ondas superficiales

Selección del tipo de onda

Atendiendo a que la malla filtrante posee un espesor entre 20-30 μm y que lo que se quiere es monitorear la superficie de la misma en busca de irregularidades (que constituirían los agujeros libres), de los tipos de ondas existentes, son las ondas superficiales o de chapas las que mejor se ajustan para el estudio que se pretende realizar.

Caracterización de las Ondas Superficiales

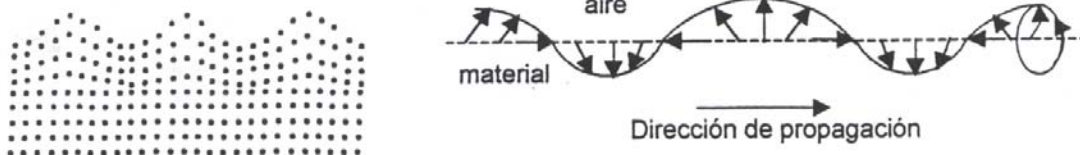


Fig. 1 Onda superficial

Son un tipo especial de ondas transversales que se propagan por la superficie del material. Estas ondas son también conocidas como ondas de *Rayleigh* se propagan por la superficie siguiendo las irregularidades y contorno de la misma.

A medida que crece la profundidad medida desde la superficie, la amplitud de la oscilación decrece rápidamente de manera que a una profundidad de una longitud de onda, las partículas están prácticamente en reposo. En estas ondas el movimiento de las partículas es elíptico.

En los materiales con espesor muy reducido, tal que este en el mismo orden de la longitud de onda, la onda puramente superficial no puede existir, ya que todo el espesor del material participa del

movimiento oscilatorio. En este caso la onda que se propaga haciendo vibrar todo el espesor del material se denomina onda de *Lamb*, también conocidas como onda de *chapa*.

Las ondas de Lamb se presentan en dos formas básicas que se diferencian por la forma en que vibran las partículas dentro del espesor de material (Figura 2). a) Onda simétrica o de dilatación
b) onda asimétrica o de flexión

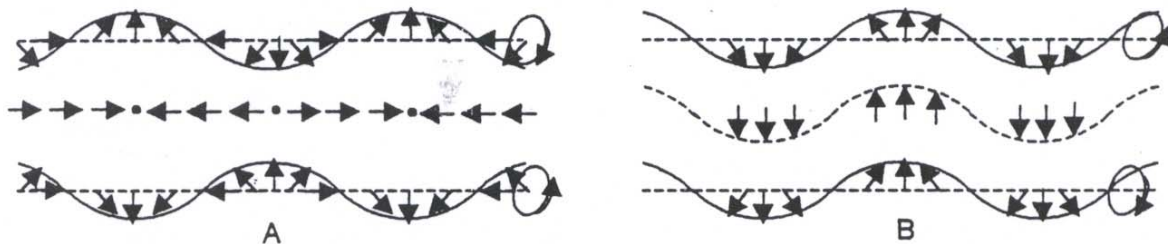


Fig. 2 Diferentes tipos de las ondas de Lamb.

A-) Simétricas o de dilatación

B-) Asimétricas o de flexión.

En el caso del modo simétrico, las partículas de la zona media o fibra neutra se comportan según oscilaciones puramente longitudinales, y en el caso de la onda de flexión según oscilaciones puramente transversales. Las demás partículas del medio material oscilan en una combinación de ambos modos de vibración que da como resultado una forma elíptica.

Parámetros que caracterizan las ondas ultrasónicas

Frecuencia, longitud de onda y velocidad acústica:

$$f\lambda = C \tag{1}$$

Impedancia acústica y velocidad acústica:

$$Z = \rho \times C \tag{2}$$

Impedancia y la velocidad de propagación.

$$p = \frac{Z}{V} \tag{3}$$

Velocidad acústica y constantes elásticas

$$C_s = \frac{0.87 + 1.12 \mu}{1 + \mu} \sqrt{\frac{E}{2\rho(1 + \mu)}} \tag{4}$$

Para el caso de ondas de Lamb, es difícil el cálculo de la velocidad acústica pues esta no depende solamente de las constantes elásticas, sino también del espesor de chapa y de la frecuencia.

[9]

Cálculo de la velocidad acústica en la malla

A partir de los valores de E , ρ y μ para el acero inoxidable austenítico material empleado para la elaboración de la malla y del espesor de la misma según Tabla I Anexo I, se emplean la ecuación (4) y (2) para el cálculo de la velocidad acústica en la malla obteniéndose como resultado los datos que se muestran en la Tabla 2. Anexo II. [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [11]

Velocidad acústica del medio de cultivo en función de la temperatura

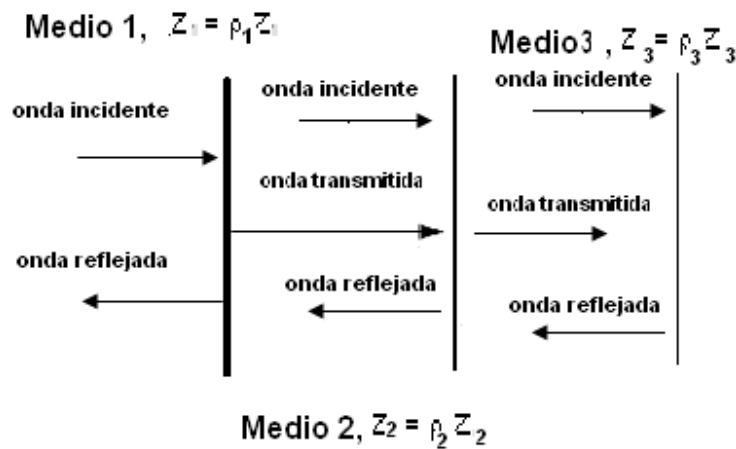
La velocidad del sonido en el agua varía principalmente según la presión, temperatura y salinidad. [10] debido a las dimensiones de la carcasa donde se colecta el medio, se decide excluir el efecto de la presión hidrostática en la velocidad del sonido al igual que la salinidad considerándose solamente el efecto de la temperatura y la densidad.

Debido a que no existen diferencias significativas entre la densidad del medio a las temperaturas a las cuales se trabaja y la del agua se decide tomar como patrón para el cálculo la densidad del agua.

Conociendo que la velocidad del sonido en el agua a 15°C es de 1450 m/s y a 25 °C es 1493 [10] se obtiene a través del Stargraphic una ecuación de regresión a partir de la cual se obtiene los valores de velocidad del sonido del medio en función de la temperatura.

$$vel = 1385.5 + 4.3 * temp$$

Ver figura 3. Comportamiento de la onda ultrasónica en los diferentes medios por el que viaja



- Medio 1: Acero
- Medio 2: Medio de cultivo
- Medio 3: Malla

Figura 3. Comportamiento de la onda ultrasónica en los diferentes medios por el que viaja Balance de presiones acústicas.

$$Z_1 = Z_3 = 53.316.226 kg \frac{m^2}{s} \text{ Acero inoxidable austenítico 316L.}$$

Tabla 2. Velocidad acústica para la malla de acero inoxidable 316L de espesor 0.0203 mm, según su área efectiva.

% Ae	No agujeros	Velocidad / Porosidad (m/s)	μ	ρ (Kg./m ³)	E (Kg./m ²)	Z(Kg. m ² /s)
25	137445000	7.665	0,25	6.026	2,95E+11	46.184.705
20	27489000	7.421	0,25	6.427	2,95E+11	47.699.358
15	4123350	7.200	0,25	6.829	2,95E+11	49.167.373
10	412335	6.997	0,25	7.231	2,95E+11	50.592.810
5	20616,75	6.810	0,25	7.632	2,95E+11	51.979.171
0	0	6.638	0,25	8.034	2,95E+11	53.329.504

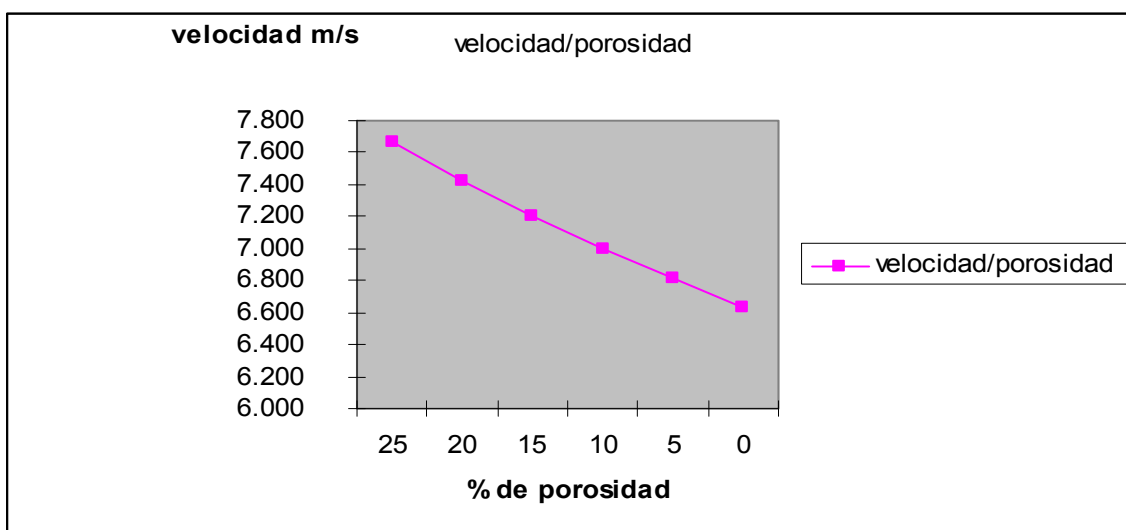


Figura 4. Gráfico que representa el comportamiento de la velocidad acústica de la malla en función del área efectiva o porosidad.

Z_2 = Depende de la temperatura del medio ver Figura 5. Gráfico del comportamiento de la velocidad acústica del medio en función de la temperatura

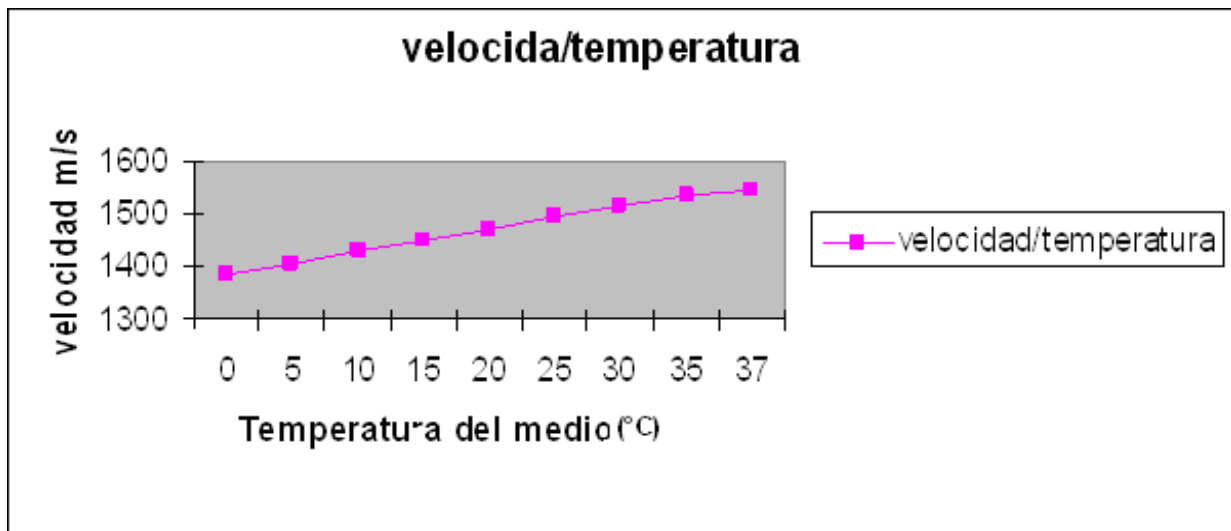


Figura 5. Gráfico del comportamiento de la velocidad acústica del medio en función de la temperatura.

De los resultados expuestos se puede ver que una onda que viaja del acero hacia el medio tendrá una transmisión muy pobre, pero ocurre lo contrario cuando lo hace en sentido contrario. Como la impedancia acústica del medio es mucho menor que la del acero las ondas que inciden sobre este último se reflejarán en su totalidad por lo que las superficies límites pueden considerarse como contornos en el vacío o superficies libres.

Desde el punto de vista energético, la intensidad de la onda en el acero es mucho menor que en el medio, pero la presión acústica (que no es energía) es mayor. Esto es de suma importancia ya que en los ensayos ultrasónicos la representación en pantalla de las señales es un reflejo de la presión acústica. [10]_ver figura 6 presión acústica /área efectiva.

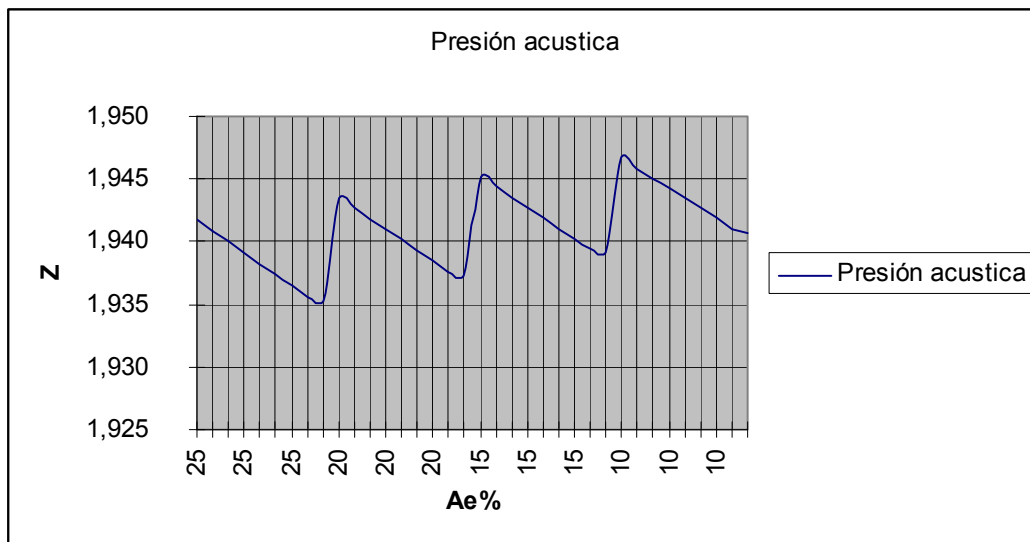


Figura 6. Presión acústica /área efectiva

La figura 7, muestra un esquema del rotfilter y las partes que la integran así como el límite de cada medio por el cual debe pasar la onda.

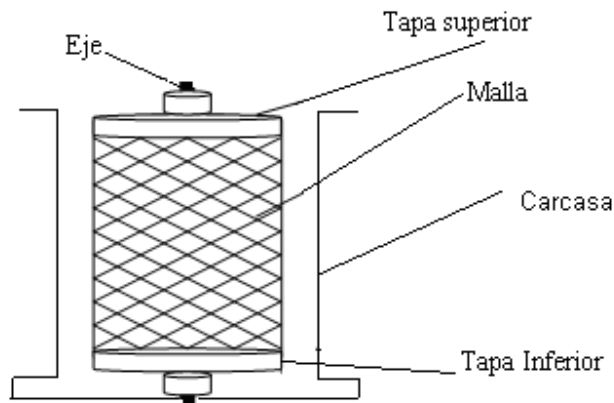


Figura 7. Rotofilter

Obtención de la ecuación de regresión múltiple para obtener la amplitud de la onda en función del número de poros de la malla y de la temperatura del medio por método estadístico.

El Análisis de la Regresión múltiple

La variable dependiente: Amplitud

T normal

El Error de Estimación de parámetro el P-valor Estadístico

CONSTANTE	0,950171	0,00018359	5175,52	0,0000
porosidad	-0,00033907	0,00000902201	-37,5825	0,0000
temp	-0,000167143	0,0000040851	-40,9153	0,0000

El análisis de Variación

La Suma de la fuente de Cuadrados la Media de Df el P-valor de la F-proporción Cuadrado

Modelo	0,000283838	2	0,000141919	1558,88	0,0000
Residual	0,00000291324	32	9,10389E-8		

El total (Corr.) 0,000286751 34

R-cuadrado = 98,9841 por ciento

R-cuadrado (ajustó para d.f.) = 98,9206 por ciento

El Error normal de Est. = 0,000301726

El error absoluto = 0,00015352

Durbin-Watson la estadística = 1,84289 (P=0,2240)

autocorrelation residual = 0,0767087

El StatAdvisor

El rendimiento muestra los resultados de ajustar un múltiplo lineal modelo de la regresión para describir la relación entre Amplitud y 2 las variables independientes. La ecuación del modelo es:

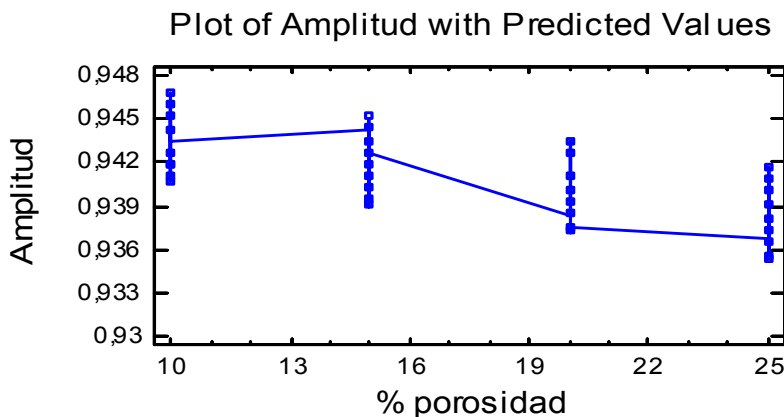
$$\text{Amplitud} = 0,950171 - 0,00033907 \cdot \text{porosidad} - 0,000167143 \cdot \text{temperatura}$$

Como el P-valor en la Tabla ANOVA está menos de 0.01, hay un relación estadística significativa entre las variables con un 99% nivel de confianza.

La estadística R-cuadrada indica que el modelo es bueno y explica 98,9841% de la variabilidad en Amplitud. Los ajustamos Estadística R-cuadrada que es más conveniente para comparar a modelos con los números diferentes de variables independientes, es 98,9206%. La norma el error de la estimación muestra la desviación normal de los residuos a sea 0,000301726. Este valor puede usarse para construir los límites de la predicción para las nuevas observaciones seleccionando la opción de los Informes del texto el menú. El error absoluto (MAE) es de 0,00015352 el promedio es el valor de los residuos. El Durbin-Watson (DW) las pruebas estadísticas de los residuos para determinar si hay cualquier correlación significativa basada en el orden en que ellos ocurren en su archivo de los datos.

Como el P-valor es mayor que 0.05, no hay ninguna indicación de autocorrelation de serie en los residuos.

Como el P-valor de la tabla ANOVA es menos de 0.01, el orden más alto, el término es estadísticamente significativo con un nivel de confianza de 99%.



Nomenclatura

P: Presión acústica (N/m²)

E: Módulo de elasticidad (Pa)

μ : coeficiente de Poisson (0.25-0.33)

ρ : densidad del material (Kg. /m³): 1000 para el medio, 8030 para el acero inoxidable 316L

Z: impedancia Kg. /m² s

V: velocidad de propagación m/s

R: Coeficiente de reflexión

T: Coeficiente de transmisión
Pi; Presión acústica incidente
PR: presión acústica reflejada
Ae: El área efectiva de una malla (mm²)
S: distancia recorrida por la onda
t: Espesor del material (mm)
ts : Tiempo de viaje de la señal (seg.)
E: Módulo de elasticidad (Kg. /m²):

4. CONCLUSIONES

Se pudo analizar el comportamiento de la onda ultrasónica en los diferentes medios con los cuales interactúa, obteniéndose dos ecuaciones de regresión una que relaciona el comportamiento de la velocidad del sonido con los cambios de temperatura que puede experimentar el medio y otra que tiene en cuenta la dependencia de la amplitud de la onda ultrasónica con la temperatura y el área efectiva de la malla, comprobándose por el método estadístico Stargraphic con un 99% de confianza que las ecuaciones obtenidas pueden ser empleadas para obtener de manera analítica el comportamiento de las variables involucradas. Además de varias tablas que muestran la variación de la impedancia con el por ciento de colmatación del filtro y otra que relaciona área de colmatación y temperatura el comportamiento de la onda al pasar de un medio a otro.

5. BIBLIOGRAFÍA.

1. Hernández L.Y, González A., Bouza J, Mayo O, Kulich E, Riera G. Modelación preliminar del cultivo en perfusión de células de animales en tanque agitado con spinfilter como dispositivo de retención
2. CYCLO. SRL_ PROPIEDADES Y USOS ACEROS INOXIDABLES. Página Web: <http://www.alambres.com/mallas.html>. fecha de consulta 22/06/10
3. Mallas acero Inoxidables-Ying Kai Mo mallas metálicas.S.A Página Web: http://www.china_wiremesh.com/ / ying kaimo_sp/wire-mesh-html/stainless fecha de consulta 22/6/10
4. Procedimiento para el cálculo de área geométrica de empaque. Página Web: <http://www.scielo.cl/scielo.php?pid=s0718-07642006000400014&scrip>
5. Grafitos, crisoles y Cepillos. [http:// www.durgraphite.com/pro_grafito_malla.htm](http://www.durgraphite.com/pro_grafito_malla.htm)
6. Mallas de acero inoxidable <http://www.alambrados.com/mallas.html>.
7. Telas metálicas para Uso Industrial. Página Web: <http://www.aginter.com.ar/TelasMetal.htm>. fecha de consulta 25/06/10
8. Tabla de peso Rodolfo O.Terragni S.R.L Página Web: <http://www.terragnisrl.com.ar/inox-chapa-tabla-peso.html>. fecha de consulta 12/10/2010
9. Flores.N. Curso de Ultrasonido. Centro de estudios ingeniería de Mantenimiento Facultad de Mecánica Instituto Superior politécnico “José a. Echevarria”.
10. ultrasonido \ velocidad del sonido - Wikipedia, la enciclopedia libre.mht
11. <http://www.terminologia.com>. Terminología de Mallas metálicas según DIN/ISO 9044 H/B Chile

Anexos I.

Tabla I. Dimensiones de las mallas de acero inoxidable según su Mesh

Mesh	ds (mm)	W (abertura) mm
2	1,6	11,100
3	1,6	6,858
4	1,22	5,156
6	0,89	5,533
8	0,81	2,362
10	0,81	1,727
12	0,56	1,549
14	0,5	1,295
16	0,46	1,130
18	0,46	0,955
20	0,41	0,864
24	0,35	0,704
30	0,3	0,541
35	0,25	0,742
40	0,25	0,015
50	0,23	0,011
60	0,18	0,009
65	0,18	0,008
80	0,13	0,007
100	0,11	0,006
120	0,11	0,005
150	0,09	0,004
165	0,05	0,004
180	0,05	0,004
200	0,05	0,004
250	0,04	0,002
325	0,0356	0,0432
400	0,0254	0,0254
500	0,0254	0,0254
635	0,0203	0,0203

Anexo II. Velocidad acústica de la malla según el por ciento de porosidad.

Ae%	Temp. (°C)	Vel (m/s)	ρ (Kg./m ³)	Z(Kg. m ² /s)	Amplitud de la Onda(Coeficiente de reflexión) z_2-z_1/z_1+z_2	Coeficiente de transmisión $2*z_2/z_1+z_2$	Amplitud de la Onda(Coeficiente de reflexión) z_3-z_2/z_3+z_2	Coeficiente de transmisión $2*z_3/z_3+z_2$
25	0	1385,5	1000	1.385.500	- 0,9494	0,0506	0,9417	1,942
25	5	1407	1000	1.407.000	- 0,9486	0,0514	0,9409	1,941
25	10	1428,5	1000	1.428.500	- 0,9478	0,0522	0,9400	1,940
25	15	1450	1000	1.450.000	- 0,9471	0,0529	0,9391	1,939
25	20	1471,5	1000	1.471.500	- 0,9463	0,0537	0,9382	1,938
25	25	1493	1000	1.493.000	- 0,9455	0,0545	0,9374	1,937
25	30	1514,5	1000	1.514.500	- 0,9448	0,0552	0,9365	1,936
25	35	1536	1000	1.536.000	- 0,9440	0,0560	0,9356	1,936
25	37	1544,6	1000	1.544.600	- 0,9437	0,0563	0,9353	1,935
Ae%	Temp. (°C)	Vel (m/s)	ρ (Kg./m ³)	Z(Kg. m ² /s)	z_2-z_1/z_1+z_2	$2*z_2/z_1+z_2$	z_3-z_2/z_3+z_2	$2*z_3/z_3+z_2$
20	0	1385,5	1000	1.385.500	- 0,9494	0,0506	0,9435	1,944
20	5	1407	1000	1.407.000	- 0,0297	0,9703	0,9427	1,943
20	10	1428,5	1000	1.428.500	- 0,9478	0,0522	0,9418	1,942
20	15	1450	1000	1.450.000	- 0,9391	0,0609	0,9410	1,941
20	20	1471,5	1000	1.471.500	- 0,9401	0,0599	0,9401	1,940
20	25	1493	1000	1.493.000	- 0,9411	0,0589	0,9393	1,939
20	30	1514,5	1000	1.514.500	- 0,9419	0,0581	0,9385	1,938
20	35	1536	1000	1.536.000	- 0,9426	0,0574	0,9376	1,938
20	37	1544,6	1000	1.544.600	- 0,9437	0,0563	0,9373	1,937
Ae%	Temp. (°C)	Vel (m/s)	ρ (Kg./m ³)	Z(Kg. m ² /s)	z_2-z_1/z_1+z_2	$2*z_2/z_1+z_2$	z_3-z_2/z_3+z_2	$2*z_3/z_3+z_2$
15	0	1385,5	1000	1.385.500	- 0,9494	0,0506	0,9452	1,945
15	5	1407	1000	1.407.000	- 0,0297	0,9703	0,9444	1,944
15	10	1428,5	1000	1.428.500	- 0,9478	0,0522	0,9435	1,944
15	15	1450	1000	1.450.000	- 0,9391	0,0609	0,9427	1,943
15	20	1471,5	1000	1.471.500	- 0,9401	0,0599	0,9419	1,942

15	30	1514,5	1000	1.514.500	- 0,9419	0,0581	0,9402	1,940
15	35	1536	1000	1.536.000	- 0,9426	0,0574	0,9394	1,939
15	37	1544,6	1000	1.544.600	- 0,9437	0,0563	0,9391	1,939
				15	25	1493	1000	1.493.000
Ae%	Temp. (°C)	Vel (m/s)	ρ (Kg./m³)	Z(Kg. m²/s)	z2-z1/z1+z2	2*z2/z1+z2	z3-z2/z3+z2	2*z3/z3+z2
10	0	1385,5	1000	1.385.500	- 0,9494	0,0506	0,9467	1,947
10	5	1407	1000	1.407.000	- 0,0297	0,9703	0,9459	1,946
10	10	1428,5	1000	1.428.500	- 0,9478	0,0522	0,9451	1,945
10	15	1450	1000	1.450.000	- 0,9391	0,0609	0,9443	1,944
10	20	1471,5	1000	1.471.500	- 0,9401	0,0599	0,9435	1,943
10	25	1493	1000	1.493.000	- 0,9411	0,0589	0,9427	1,943
10	30	1514,5	1000	1.514.500	- 0,9419	0,0581	0,9419	1,942
10	35	1536	1000	1.536.000	- 0,9426	0,0574	0,9411	1,941
10	37	1544,6	1000	1.544.600	- 0,9437	0,0563	0,9407	1,941

- 0,9