



Separación de Partículas Suspendidas en una Mezcla de Gases por Medio de Ondas Mecánicas.

Jesús Amado Bogado Velázquez

Universidad Nacional de Asunción - Facultad Politécnica

Paraguay

RESUMEN

Este trabajo se está realizando para simular, con un Programa Informático, un proceso de filtrado mediante el uso de ondas mecánicas. El objetivo es buscar un método físico renovable de bajo costo, alta eficiencia y fácil implementación en sistemas de producción industrial existentes, o en ambientes contaminados que requieran el filtrado o separación de partículas útiles o nocivas, que estén suspendidas en el aire o en una mezcla de gases.

El sistema simula utilizar ondas mecánicas, procurando separar o extraer las partículas sólidas suspendidas en una mezcla de gases. A esta mezcla se le aplica una determinada velocidad y presión, que son dos de las variables que el sistema de control busca controlar para obtener resultados óptimos. Se considera que la mezcla fluye vertical u horizontal en un ducto de sección circular de chapa metálica, siendo este ducto de cierta longitud con ambos extremos abiertos.

La metodología para el filtrado usa ondas mecánicas en el rango de audibles o no audibles, aplicadas a una placa circular metálica delgada. Esta placa está montada en el extremo de otro tubo de diámetro menor, instalado en posición coaxial dentro del primer ducto por donde circula el gas. La placa está en un plano perpendicular al flujo del gas. El generador de ondas alternante, cuya frecuencia y amplitud se varían y se controlan, crea líneas y zonas de nodos-antinodos de vibración sobre esta placa circular metálica delgada. Se considera a la placa vibrante instalada con un contorno perimetral fijo. Al impactar las partículas del flujo de gas en esta placa, las mismas se detienen en las líneas o zonas nodales, y entonces pueden extraerse del seno de gas que las contiene.

Se diseñará una red neuronal artificial (RNA) para automatizar el control del proceso, procurando una solución en tiempo real. Se controlarán las variables y se harán cambios de los parámetros en uso, que intervienen en el proceso de filtrado de partículas. También se realizará el correspondiente modelo matemático, que refleje el problema con las soluciones en su totalidad. Los resultados obtenidos se analizarán para determinar la cantidad de partículas filtradas, y ver el resultado de la depuración del gas. El análisis de resultados teóricos y la conclusión permitirán construir posteriormente un modelo físico a escala, con fines prácticos para una efectiva implementación.

PALABRAS CLAVES

Separador de partículas en gases con ondas mecánicas. Filtro acústico de partículas en gases.

1. INTRODUCCIÓN

El inicio de la era industrial en la economía mundial de nuestro planeta, también inició la producción de todo tipo de desechos sólidos, líquidos y gaseosos provenientes no solo de estas industrias, sino del consumo masivo de productos y la combustión incompleta de auto-vehículos, que se denominan smog. Los desechos en forma de partículas, suspendidas en el aire, es uno de los mayores problemas existenciales que la humanidad enfrenta hoy y en un futuro inmediato.

Ante la problemática generada por la contaminación del aire por partículas e impurezas en suspensión; este trabajo, como objetivo general busca encontrar una solución que sea accesible y eficaz para recuperar productos industriales valiosos y/o separar las impurezas de los gases, que contaminan el aire.

Los materiales a separar considerados en el estudio, son el cemento portland, carburo de silicio y polvo urbano. El cemento portland y el carburo de silicio son productos finales de industrias electrointensivas, y tienen la peligrosa tipología de "cancerígenos". Si se liberan por el motivo que fuere en el ambiente laboral o zonas vecinas a la industria, permaneciendo en el ambiente respirable por tiempo prolongado, pueden resultar nocivos para la salud de operarios no protegidos o de pobladores de zonas vecinas a la fábrica de producción.

Y el polvo urbano afecta la rigidez dieléctrica al depositarse en los aisladores de alta tensión de las Subestaciones Transformadoras cubiertas, que se construyen a nivel de terreno en los centros urbanos con alta densidad de población. Estas Subestaciones Transformadoras cubiertas requieren de un ambiente limpio para tener un prolongado período de uso, evitando los eventos de fuera de servicio por descargas eléctricas operativas al haber reducción de la rigidez dieléctrica de los aisladores. También es conveniente, que durante los cortes programados para mantenimiento, estos aisladores requieran un tiempo mínimo de limpieza, para cumplir con los programas de Mantenimiento Predictivo de una Subestación Transformadora.

Como objetivo específico, se investiga el uso de ondas mecánicas variando la amplitud y frecuencia de onda, el material de propagación de las ondas, la geometría del equipo filtrador, y la variación de la velocidad de flujo del gas contaminado que entra al proceso de filtrado.

Para ello se diseña un simulador de un controlador automático, se investiga el efecto y la incidencia de las variables y parámetros utilizados por el controlador RNA; se evalúa cada caso estudiado para determinar la relación que pueda existir entre estas variables y parámetros.

La evaluación del rendimiento o eficiencia del filtrado se hace en función a valores máximos y mínimos permitidos, de la concentración de partículas en el aire (unidad de peso por unidad de volumen de aire [mg/m^3]), estipulados por normas internacionales de calidad del aire para ambientes de trabajo con cemento portland y carburo de silicio en grano, y cantidad de partículas permitidas en el aire de los centros urbanos poblacionales.

2. METODOLOGIA.

El aire a filtrar se conduce por un ducto que tiene en su interior otro ducto de sección menor, en uno de cuyos extremos se coloca un material circular vibrante sujeta en su perímetro. Las partículas en el gas chocan contra el material vibrante, que varía de frecuencia y amplitud. En este material se forman líneas nodales y anti-nodales [1], y las partículas al chocar se detienen en estas líneas.

En la Figura 1 siguiente se aprecia el esquema básico de funcionamiento, y se definen las variables que intervienen en el proceso de filtrado:

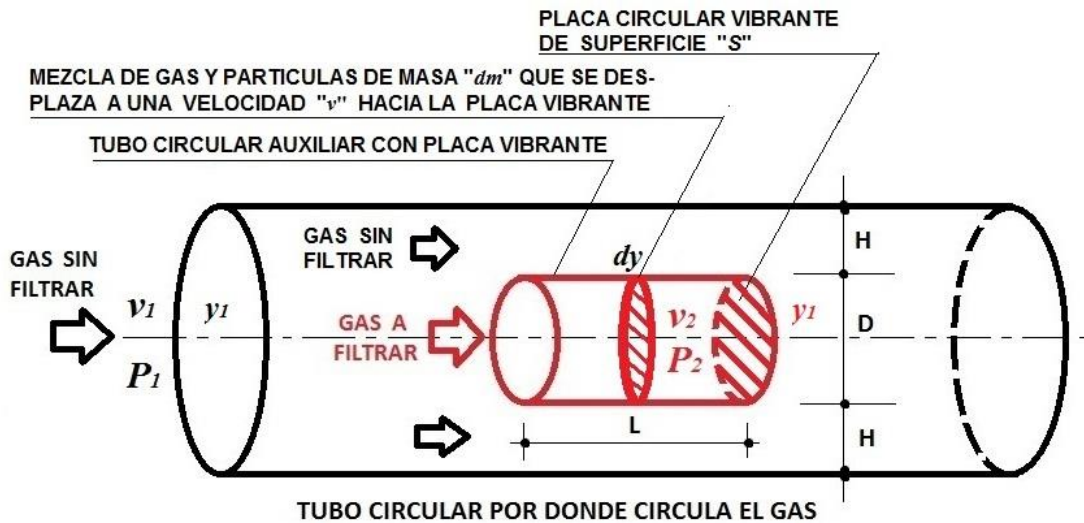
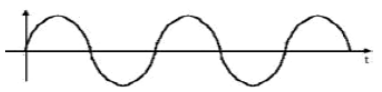

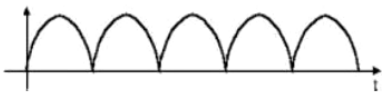




Figura 1: Esquema básico de funcionamiento del proceso de filtrado.

dm la masa diferencial de partículas que impactan contra el material vibrante, dV el volumen diferencial que impacta contra el material vibrante, S la superficie del material vibrante, v la velocidad con la que circula el gas que contiene a las partículas, P la presión del gas que circula conteniendo las partículas, A la amplitud de vibración de la onda aplicada al material vibrante, f la frecuencia de vibración aplicada al material vibrante, ϵ_p la cantidad de partículas extraídas del gas por unidad de volumen filtrado, Q la potencia a la cual vibra la membrana o placa. La expresión matemática que relaciona estas variables entre sí es:

$$\epsilon_p = \frac{2}{Sv^3} \cdot Q \quad [1]$$

Las ondas aplicables a la placa vibrante son la senoidal, la cuadrada y la diente de sierra [2], cuyas características principales se observan en el siguiente Cuadro I:

ITEM	ONDA	ECUACION	VALOR EFICAZ	DIAGRAMA
1	Senoidal	$A \cdot \text{sen}(2\pi ft)$	$\frac{A}{\sqrt{2}}$	
2	Senoidal media onda rectificada	$\frac{A}{\pi} + \frac{A}{2} \cdot \text{sen}2\pi ft - \frac{2A}{\pi} \left(\frac{\cos4\pi ft}{3} + \frac{\cos8\pi ft}{15} + \dots \right)$	$\frac{A}{\sqrt{2}}$	
3	Senoidal onda completa rectificada	$\frac{2A}{\pi} - \frac{4A}{\pi} \left(\frac{\cos4\pi ft}{3} + \frac{\cos8\pi ft}{15} + \dots \right)$	$\frac{A}{\sqrt{2}}$	
4	Onda cuadrada	$\frac{4A}{\pi} \left(\text{sen} 2\pi ft + \frac{\text{sen} 6\pi ft}{3} + \frac{\text{sen} 10\pi ft}{5} + \dots \right)$	A	
5	Diente de sierra	$\frac{2}{\pi} \left(\text{sen} 2\pi ft - \frac{\text{sen} 4\pi ft}{2} + \frac{\text{sen} 6\pi ft}{3} - \dots \right)$	$\frac{A}{\sqrt{3}}$	

Cuadro N° I: Tipos de ondas aplicables a la placa vibrante.

El controlador elegido, una Red Neuronal Artificial RNA, es un modelo computacional basado en sistemas nerviosos de seres vivos. La RNA se adoptó debido a las características del Cuadro II [3]. Se seleccionó una Red Neuronal Multicapa con algoritmo de aprendizaje Backpropagation, y este trabajo actualmente está en proceso de calcular la cantidad de neuronas a usar en las diferentes capas, y el tipo de función de activación óptima para el sistema de control. Ver el Cuadro III [3]. Las tres variables, que el controlador RNA debe variar, procesar y decidir el uso óptimo, son: v la velocidad con la que circula el gas que contiene a las partículas, A la amplitud de vibración de la onda aplicada al material vibrante, f la frecuencia de vibración aplicada al material vibrante. En la siguiente figura se nota un esquema básico de la Red Neuronal Artificial Multicapa adoptado:

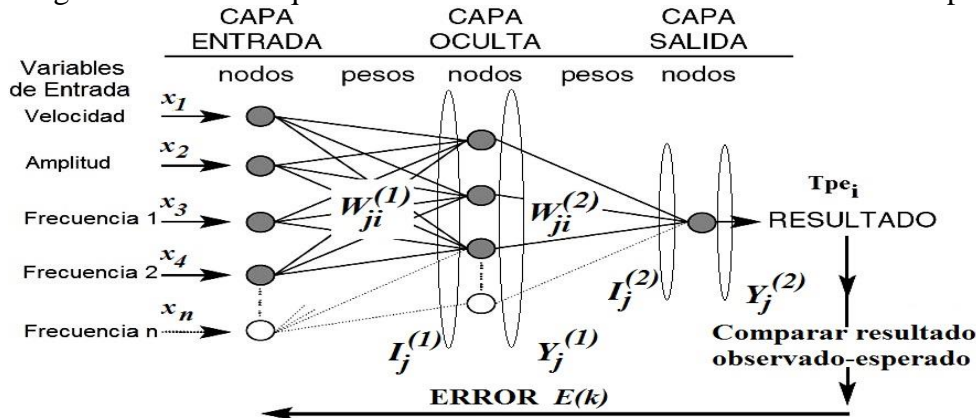


Figura 2: Diagrama de Red Neuronal Artificial Multicapa

El flujo de datos en el controlador RNA desde la entrada hacia la salida se rige por las ecuaciones:

$$I_j^{(L)} = \sum_{i=0}^n W_{ji}^{(L)} \cdot X_i \quad [2]$$

$$Y_j^{(L)} = g \left(I_j^{(L)} \right) \quad [3]$$

$$E(k) = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^{n_3} [d_j(k) - Y_j^{(1)}(k)]^2 \quad [4]$$

$$E_M = \frac{1}{p} \sum_{k=1}^p E(k) \quad [5]$$

L es la cantidad de capas de neuronas de la red, j es la j -ésima neurona de una capa L , I es el vector de entrada ponderada a una determinada neurona, i es la i -ésima neurona de una capa $(L-1)$, W es la matriz de peso sináptico, X_n es la señal n -ésima de entrada, Y es el vector de salida de una neurona determinada, g es la función de activación continua diferenciable (parcial o total) en todo su dominio según Cuadro IV [3], k es la k -ésima muestra de entrenamiento, $E(k)$ es el error cuadrático de la muestra k , n_3 es la cantidad total de neuronas en la capa de salida, d es el valor deseado a obtener en una determinada muestra, p es la cantidad de muestras que componen un grupo de entrenamiento, E_M es el error cuadrático medio del desempeño de la RNA entre muestras.

El sistema de control RNA realizará la extracción de partículas, siendo el Total de Partículas a Extraer Tpe_i en función al tiempo, expresada por la ecuación siguiente

$$Tpe_i = V_{filtrar} \cdot C_{pa} - K_i \cdot T \cdot \epsilon_{p.eficaz} \quad [6]$$

$$K_i = 3.600 \frac{s}{hr} \cdot 24 \frac{hr}{día} \cdot D \text{ días} = 86.400 \cdot D \quad [7]$$

Siendo los parámetros y variables que intervienen en las fórmulas:

$V_{filtrar}$ Volumen total constante de gas o del ambiente a ser filtrado

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

- C_{pa} Concentración actual de partículas medida en el gas o en el ambiente.
 K Múltiplo entero de período de la onda vibrante.
 T Período de la onda vibrante.
 $\epsilon_{p.eficaz}$ Tasa de extracción promedio o eficaz en un período de onda, por unidad de volumen de gas que pasa por el filtro o extractor de partículas.
 D Cantidad de días que se hace funcionar el sistema de filtrado.

La comparación de un valor Tpe_i respecto a un valor anterior $Tpe_{(i-1)}$, permite conocer el Proceso de Convergencia de la solución final, y esta diferencia se expresa como un error ξ_i según la ecuación

$$\xi_i = Tpe_i - Tpe_{(i-1)} \quad [8]$$

Se debe definir un valor admisible de ξ_{adm} , y el proceso de búsqueda de soluciones para el filtrado se efectuará hasta que se cumpla la condición

$$\xi_{adm} \geq \xi_i \quad [9]$$

CUADRO N° II
CARACTERÍSTICAS Y VENTAJAS DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES.

ITEM	CARACTERÍSTICAS	DESCRIPCIÓN
A	ADAPTACIÓN POR EXPERIENCIA	Las adaptaciones de los parámetros internos de la red, sus pesos sinápticos se ajustan a partir de la presentación sucesiva de ejemplos relacionados al comportamiento del proceso, adquiriendo el conocimiento por experiencia.
B	CAPACIDAD DE AUTO-APRENDIZAJE ADAPTATIVO	Por la aplicación de un método de entrenamiento, la red consigue extraer el relacionamiento existente entre las diversas variables que componen la aplicación. Es ideal para procesos de variables múltiples.
C	HABILIDAD DE GENERALIZACION	Después del proceso de entrenamiento de la red, se puede realizar la organización interna de todas las particularidades en común.
D	ORGANIZACIÓN DE DATOS	Se basa en las características intrínsecas que envuelven a un determinado conjunto de datos con respecto a un proceso; la red es capaz de realizar su organización interna pudiendo hacer el agrupamiento de patrones que se presentan.
E	TOLERANCIA A FALLAS	Por el elevado nivel de interconexiones entre neuronas artificiales, la red neural se torna un sistema tolerante a fallas, si parte de su estructura interna tiene fallas.
F	ALMACENAMIENTO DISTRIBUIDO	El conocimiento respecto al comportamiento de un tipo de proceso, dentro de una arquitectura neural, se realiza de forma distribuida entre las diversas sinapsis de las neuronas artificiales, permitiendo un incremento de arquitectura robusta ante eventuales neuronas inoperantes. Las interconexiones y dispositivos son no lineales. Es una estructura de cálculo distribuido.
G	FACILIDAD PARA MODELAR Y OBTENER PROTOTIPO	La implementación de la mayoría de las arquitecturas neurales puede ser fácil, dependiendo de la aplicación específica, modelada en hardware o software, y después del proceso de entrenamiento, los resultados se obtienen por operaciones matemáticas simples.

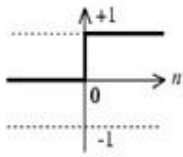
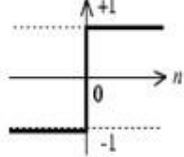
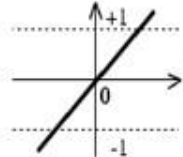
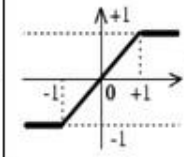
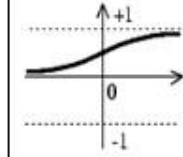
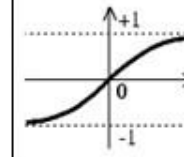
XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

CUADRO N° III
ARQUITECTURAS DE REDES NEURONALES ARTIFICIALES

ITEM	NOMBRE	DISPOSICIÓN			FLUJO DE INFORMACIÓN	RELACIÓN SALIDAS / NEURONAS	USO	TIPOS	ALGORITMO DE APRENDIZAJE Y ENTRENAMIENTO	ESQUEMA TOPOLOGICO
		CAPAS ENTRADA	CAPAS OCULTAS	CAPAS DE SALIDA						
1	Feedforward	SIMPLE	0	m	Unidireccional $n \neq m$	$m/neuronas = 1$	Clasificación de patrones	Perceptron capa simple	Regla de Hebb	
2	Feedforward	MULTIPLE	n1 ; n2	m	Unidireccional con retropropagación	$m/neuronas = 1$	a) Clasificar patrones b) Identificar sistemas c) Optimizac. d) Robótica e) Control de procesos	Perceptron multi capa (MLP) Red de base radial (RBF)	Regla Delta generalizada Regla Delta/competitiva	
3	Recurrente o Retroalimentación	MULTIPLE	n1	m	Salidas con retroalimentación		Proceso dinámico de información Sistemas Variables en el tiempo: precisión de series temporales, optimizar e identificar sistemas, control de procesos	Red de Hopfield Perceptron multi capa con retroalimentación entre neuronas de diferentes capas	Minimización de funciones de energía Regla Delta generalizada	
4	Estructura reticulada	n (no igual a n1)		m	Unidireccional		Problemas de agrupamiento	Red de Kohonen	Proceso competitivo	

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

CUADRO N° IV: FUNCIONES DE ACTIVACION

ESCALON	BI-ESCALON	LINEAL	RAMPA	LOGARITMO	TANG. HIPERB.
					
$y = 1 (n \geq 0)$ $y = 0 (n < 0)$	$y = 1 (n > 0)$ $y = +/- 1 (n = 0)$ $y = -1 (n < 0)$	$y = n$	$y = 1 (n > 1)$ $y = n (-1 \leq n \leq 1)$ $y = -1 (n < -1)$	$y_i = \frac{1}{1 + e^{-\beta n}}$	$y_i = \frac{1 - e^{-\beta n}}{1 + e^{-\beta n}}$

3. RESULTADOS.

El Cuadro V siguiente ilustra los resultados preliminares obtenidos al procesar los parámetros y variables, usando una Planilla MS Excel, variando tipo de onda, velocidad, amplitud y frecuencia.

PARAMETROS DE LA PLACA VIBRANTE	Material		Acero al carbono		Radio		0,1871	[m]	
	Modulo de Young [Kgr/m2]		20.394.428.242		Espesor		0,0016	[m]	
	Coeficiente de Poisson		0,28		Superficie		0,1100	[m2]	
	Peso específico [kgr / m3]		7.750,33		Frecuencia natural		6,7907	[Hz]	
1	Tipo de onda aplicada		Seno		Fórmula de extracción partículas [mg / m3]		$\epsilon_{p.eficaz} = \frac{2}{Sv^3} \cdot Q_{eficaz}$		
	Valor eficaz de onda		Amplitud / 1,414						
VARIABLES A CONTROLAR DURANTE EL PROCESO	ITEM	VELOCIDAD	AMPLITUD	FRECUENCIA	PERIODO "T"	VALOR EFICAZ DE LA ONDA	MULTIPLIO [K] PERIODO	$\epsilon_{p.eficaz}$	$\epsilon_{p.eficaz} T$
		[m/s]	[m]	[Hz]	[s]		24 hrs.10 días	[mg / m3]	[mg.s / m3]
	1	2,70	0,050	50	0,02000	0,035355	17.280	0,032659	564,345
	2	2,70	0,100	50	0,02000	0,070711	17.280	0,065318	1.128,690
	3	2,70	0,150	50	0,02000	0,106066	17.280	0,097977	1.693,035
	4	2,70	0,200	50	0,02000	0,141421	17.280	0,130635	2.257,380
	5	2,50	0,250	40	0,02500	0,176777	21.600	0,205704	4.443,202
	6	2,50	0,300	40	0,02500	0,212132	21.600	0,246845	5.331,842
	7	2,25	0,350	35	0,02857	0,247487	24.686	0,395042	9.751,883
8	2,25	0,400	25	0,04000	0,282843	34.560	0,451476	15.603,013	
2	Tipo de onda aplicada		Cuadrada		Fórmula de extracción partículas [mg / m3]		$\epsilon_{p.eficaz} = \frac{2}{Sv^3} \cdot Q_{eficaz}$		
	Valor eficaz de onda		Amplitud / 1						
VARIABLES A CONTROLAR DURANTE EL PROCESO	ITEM	VELOCIDAD	AMPLITUD	FRECUENCIA	PERIODO "T"	VALOR EFICAZ DE LA ONDA	MULTIPLIO [K] PERIODO	$\epsilon_{p.eficaz}$	$\epsilon_{p.eficaz} T$
		[m/s]	[m]	[Hz]	[s]		24 hrs.10 días	[mg / m3]	[mg.s / m3]
	1	2,70	0,050	50	0,02000	0,050000	17.280	0,046187	798,105
	2	2,70	0,100	50	0,02000	0,100000	17.280	0,092373	1.596,209
	3	2,70	0,150	50	0,02000	0,150000	17.280	0,138560	2.394,314
	4	2,70	0,200	50	0,02000	0,200000	17.280	0,184746	3.192,418
	5	2,50	0,250	40	0,02500	0,250000	21.600	0,290909	6.283,636
	6	2,50	0,300	40	0,02500	0,300000	21.600	0,349091	7.540,364
	7	2,25	0,350	35	0,02857	0,350000	24.686	0,558673	13.791,246
8	3,00	0,800	25	0,04000	0,800000	34.560	0,538721	18.618,182	

Cuadro V: Resultados obtenidos aplicando diferentes valores de variables.

4. CONCLUSIONES.

- 1.- Los parámetros del controlador se cambian solo con el proceso de control sin funcionar.
- 2.- Las variables del controlador sí se cambian durante el proceso de control funcionando.
- 3.- La frecuencia natural se calcula para evitar la resonancia de la placa, al variar las frecuencias.
- 4.- A una menor superficie, mejora notablemente la tasa de extracción de la partícula.
- 5.- A una menor velocidad y frecuencia, aumenta notablemente la tasa de extracción de la partícula.
- 6.- El valor eficaz tiene incidencia según el tipo de onda, la cuadrada tiene valor eficaz óptimo.
- 7.- El valor $\epsilon_{p.eficaz}$ representa la tasa de extracción promedio en un período completo de onda, por cada unidad de volumen de gas que pasa por el filtro o extractor de partículas.
- 8.- El múltiplo del período representa la extracción a lo largo de un tiempo prolongado definido.
- 9.- La RNA funciona para seleccionar y decidir las variables a modificar optimizando el resultado final del proceso, que se puede incrementar implementando superficies vibrantes en paralelo y en serie. Los resultados preliminares alientan la continuación del estudio en un banco de pruebas.

5. BIBLIOGRAFIA.

- [1] L.E. Kinsler [et al]. Fundamentos de Acústica; Traducción: Ricardo Ruiz Boullosa. México, Editorial Limusa, 1992, 592p. ISBN 968-18-2026-6 (páginas 117 a 139).
- [2] B. Goodwine. Engineering Differential Equations: Theory and Applications, Springer Science+ Business Media, 2011, 761p. ISBN 978-1-4419-7918-6_11 (páginas 485 a 547).
- [3] Nunes. I; Hernane D.; Andrade R., Redes Neuras Artificiais para engenharia e ciências aplicadas. Artliber Editora Ltda., 2010, 399p, São Paulo, Brasil (páginas 21 a 171)