

# Detección de una Fuente Sonora Aplicada en Robots Móviles

Collazo Cuevas José Iván<sup>1</sup>, Gorrostieta Hurtado Efrén<sup>2</sup>, Jesús Carlos Pedraza Ortega<sup>2</sup>, Ubaldo Geovanni Villaseñor Carrillo<sup>1</sup>, Rubén Alejandro Romero Torres<sup>1</sup> y Marco Antonio González Aguirre<sup>1</sup>

Universidad del Valle de México<sup>1</sup> (UVM) Campus Querétaro Boulevard Villas del Mesón No. 1000 Col. Juriquilla, Querétaro, México. Centro de Investigación en Informática y Telecomunicaciones (CIDIT) Facultad de Informática de la Universidad Autónoma de Querétaro (UAQ), Av. De las Ciencias sin número, Querétaro México<sup>2</sup>

## Resumen

*El presente trabajo es una propuesta para la ubicación de una fuente acústica mediante el empleo de 4 micrófonos en un robot móvil de dos ruedas con tracción diferencial la ubicación de la fuente se realiza midiendo el desfase en tiempo existente entre las señales provenientes de los micrófonos y el empleo de una red neuronal con algoritmo de aprendizaje de retropropagación.*

**Palabras clave:** fuente acústica, robot móvil, trabajo cooperativo, detección de fase, redes neuronales, retropropagación.

## 1. Introducción

El diseño de robots móviles responde a la necesidad de extender el campo de aplicación de la Robótica. Se trata también de incrementar la autonomía misma del robot limitando todo lo posible la intervención humana.

La ubicación de las fuentes de sonido normalmente se obtiene con la detección de la diferencia de amplitud el desfaseamiento de la señal. En este proyecto se presenta una alternativa que considera las ventajas del trabajo cooperativo entre robots y la detección por desfaseamiento de la señal. La ventaja del método propuesto con respecto a los otros es que se puede obtener la ubicación relativa de la fuente de sonido respecto a los robots cuando se mueven en un medio incierto.

## 2. Metodología

Se plantean de manera general el proceso de tomara el diseño cinemático, dinámico y electromecánico de un robot móvil[1] de dos ruedas con tracción diferencial. Posteriormente se

desarrollan las metodologías de detección de la fuente acústica, cuyas partes son:

- Modelo matemático de un robot móvil de dos ruedas con tracción.
- Selección del micrófono a emplear.
- Metodología de detección (por diferencia en amplitud, por diferencia en fase)
- Redes Neuronales (Redes con algoritmo de aprendizaje de retropropagación).
- Método propuesto (Detección por diferencia en fase mediante robots cooperativos).

En las metodologías de detección por diferencia de amplitud y fase, se plantean los criterios de diseño electrónico, (selección de micrófono, uso de micro controlador y acondicionamiento de señales), en la última sección de detección de fase mediante robots móviles su ubicación espacial mediante la diferencia en fase.

## 3. Modelado Matemático

La estructura del robot es una plataforma de base circular con un radio de 6cm, la disposición de los motores con la rueda es como se muestra la Figura 1

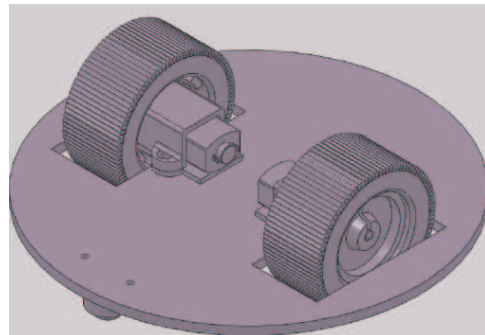
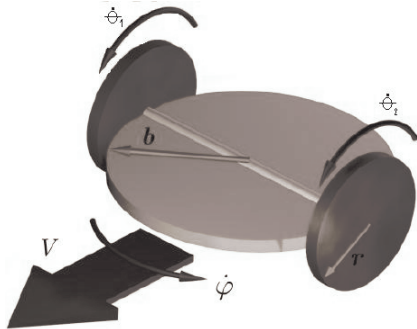


Figura 1: Diseño del Robot

Al desarrollar las ecuaciones cinemáticas del robot mostrado en la Figura 2 obtenemos sus



**Figura 2: variables involucradas en el movimiento del robot**

$$x(t) = x(0) + \int_0^t r \frac{(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)}{2} \cos(\varphi(\tau)) d\tau \quad (1)$$

$$y(t) = y(0) + \int_0^t r \frac{(\dot{\theta}_1 + \dot{\theta}_2)}{2} \sin(\varphi(\tau)) d\tau \quad (2)$$

$$\varphi(t) = \varphi(0) + \int_0^t r \frac{(\dot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2)}{2b} d\tau \quad (3)$$

Y al desarrollar sus ecuaciones dinámicas se obtienen La siguiente matriz[1]:

$$\begin{bmatrix} \tau_1 \\ \tau_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2r^2}{b} (M + 4m) & \frac{Mr^2}{b} \\ \frac{Mr^2}{b} & \frac{2r^2}{b} (M + 4m) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (4)$$

Para agregar más exactitud al modelo incluimos el roce dinámico en cada rueda y se obtiene la siguiente Ecuación[1]:

$$\begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{2r^2}{b} (M + 4m) & \frac{Mr^2}{b} \\ \frac{Mr^2}{b} & \frac{2r^2}{b} (M + 4m) \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} K_1 G_1 \tau_1 \\ K_1 G_1 \tau_2 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \mu \dot{\theta}_1 \\ \mu \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} \quad (5)$$

Ahora para completar el modelo del robot se introducirá información de los motores empleados, generando una relación entre la corriente consumida y el torque entregado por los motores, así como la relación de voltaje y velocidad angular de los mismos obtenidos en sus ecuaciones electromecánicas[2]:

$$V = L \frac{di}{dt} + Ri + k_e G \dot{\theta} \quad (6)$$

$$\tau = k_t i + Gi \quad (7)$$

#### 4. Selección del Micrófono a Emplear

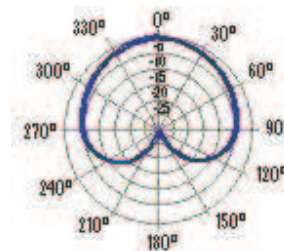
En la etapa de censado del sonido se emplearan micrófonos, para este propósito existen dos clasificaciones principales [4]:

**MICRÓFONO OMNIDIRECCIONAL:** La ganancia está al máximo para cualquier dirección del sonido que incide sobre el micrófono[4][5]. Estos micrófonos tienen como principales características

ecuaciones cinemáticas como se muestra en las ecuaciones 1,2 y 3.[2]

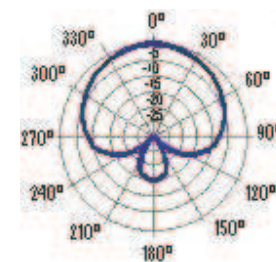
una mínima incidencia del aire y una amplia frecuencia de respuesta

**MICRÓFONO DIRECCIONAL:** Como su nombre indica, se trata del micrófono[4][5] que capta el sonido que proviene de una zona o ángulo determinado, atenuando sobremanera los procedentes de otros ángulos. Los micrófonos direccionales, se dividen a su vez en micrófonos cardiodes, super cardiodes e híper cardiodes Cardiode[4][5]. Denominado así por su patrón de sensibilidad que se asemeja un poco a la forma de un corazón. Los cardiodes son sensibles a los estímulos sonoros en un rango amplio al frente del micrófono, pero relativamente insensibles a los sonidos detrás del mismo. Estos tienen la desventaja que cuando se encuentra colocado a 2 o más metros pueden registrar sonidos incidentales no deseados su patrón de recepción se muestra en la Figura 3.



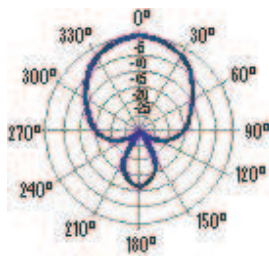
**Figura 3: Patrón de recepción micrófono cardiode**

**Súper cardiode:** es más direccional que el patrón sensible del cardiode[4][5]. Cuando este tipo de micrófono es apuntado hacia una fuente sonora, la interferencia de los sonidos fuera del foco de percepción es eliminada su patrón de recepción se muestra en la Figura 4.



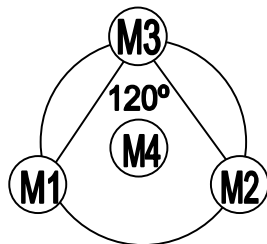
**Figura 4: Patrón de recepción micrófono Súper cardiode**

**Híper cardiode:** su estrecho ángulo de respuesta significa que los sonidos fuera del rango serán eficientemente eliminados, esto también implica que deben ser precisamente apuntados a la fuente sonora[4][5] su patrón de recepción se muestra en la Figura 5.



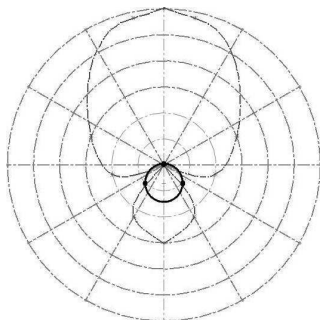
**Figura 5: Patrón de recepción micrófono hiper cardiode**

Ahora viene la selección del micrófono a emplear, se empleara una configuración de 4 micrófonos para la detección con lo cual no solo se puede inferir la orientación horizontal sino que también su orientación con la vertical entre el "centroide" del robot y la fuente acústica, como muestra la Figura 6, seleccionando el micrófono que cubra en su totalidad el medio, buscando que la incidencia entre ellos sea lo menor posible



**Figura 6: Disposición de los Micrófonos**

Haciendo un análisis de la capacidad de percepción de cada uno de los sensores se obtiene que el micrófono que más se ajusta a las necesidades del proyecto es el tipo hiper cardiode, como se puede apreciar en la Figura 7, con el rango de percepción de uno de los micrófonos.



**Figura 7: Rango de percepción con micrófonos Híper cardiodes**

Habiendo definido el tipo de micrófono a usar definimos la forma de detección del punto focal

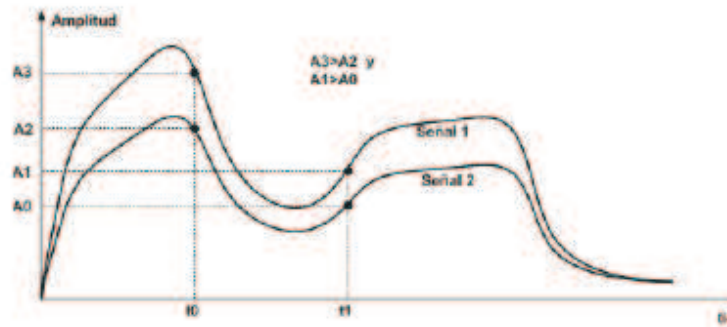
## 5. Metodología de Detección.

Ya teniendo la configuración y tipo de los micrófonos a emplear se procede a la detección de la dirección del punto focal, para lo cual existen dos metodologías, en ambos casos se emplearan convertidores análogo digital para el análisis de las señales

- Detección por amplitud.
- Detección por fase.

### 5.1. Detección por amplitud[6].

Este proceso consiste en cuantificar y codificar las señales provenientes de cada micrófono para luego compararlas, estableciendo la diferencia de amplitud y así la dirección de la fuente de sonido. En la Figura 8 se esquematiza este procedimiento con dos señales, en donde la señal 1 siempre es mayor a la señal 2. Donde la muestra en  $t_0$  toma las amplitudes  $A_3$  y  $A_2$ . La muestra en  $t_1$  toma las amplitudes  $A_1$  y  $A_0$  de las señales 1 y 2 respectivamente.



**Figura 8: Muestreo de señales provenientes de dos micrófonos.**

Desventajas:

- La dependencia entre amplitud y distancia en una onda de sonido no es lineal, más bien es exponencial (como se explicó previamente), conforme una fuente de sonido se aleja del mismo.
- La velocidad de conversión del ADC, es importante, ya que si deseamos comparar magnitudes, estas deben ser tomadas en forma ideal en un mismo instante de tiempo. Esto se puede lograr colocando un ADC independiente para cada micrófono. Otra forma de aproximarse al muestreo ideal es utilizando un ADC "FLASH" con conmutación de canales, el mismo que posee un tiempo de adquisición muy pequeño.

- El desfase existente entre las ondas provenientes de cada micrófono provoca un error considerable al momento de evaluar la amplitud de las mismas.

### 5.2. Detección por fase[6]

Consiste en medir el desfase existente entre señales provenientes de micrófonos, y a partir de este valor determinar la dirección del punto focal. El sistema de detección por fase se explica mediante la siguiente figura, en la cual se analizan dos señales idénticas provenientes de micrófonos:

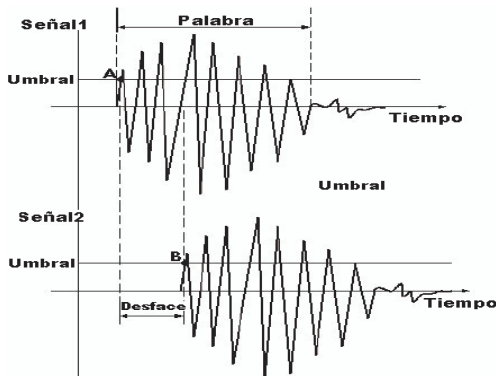


Figura 9: Desfase entre 2 señales

Para contabilizar el desfase existente entre las dos señales se requiere que la señal sobrepase un “umbral”. Se toma en cuenta al primer pico de cada señal que sobrepasa este umbral para encontrar los puntos A y B.

Para este sistema de detección se requiere “digitalizar” la señal proveniente de cada uno de los Micrófonos, en primer lugar eliminamos la parte negativa de la misma, para luego compararla con un voltaje de umbral o referencia que determina si es un “1” o un “0” lógico. Si la señal rectificadora es mayor al voltaje de umbral, la señal digitalizada es un “1” y si es menor al voltaje de referencia, entonces es un “0”.

El proceso que se llevara en la detección es el siguiente:

1. Captar cual es el primer micrófono que se activa superando el umbral de referencia.
2. Lanzar un contador .
3. Esperar a que pase el umbral un segundo micrófono para parar el contador.
4. Dependiendo de los micrófonos que hayan activado y del valor que tiene el contador (desfase) se deberá determinar la dirección en la que se encuentra la fuente de sonido.

Ahora para ejemplificar la detección de la dirección del punto focal, se pondrá que se activa

en primer lugar MIC3 y luego MIC2, en donde  $\Delta t$  es el desfase en tiempo existente entre los dos micrófonos contiguos, de modo que:

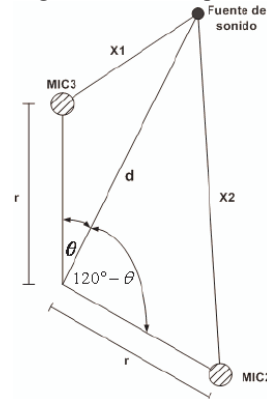


Figura 10: Desfase en el tiempo a partir de dos micrófonos contiguos

$$V_s = 331 \frac{m}{s} + (0.6 \frac{m}{s} \cdot ^\circ C) \quad (19)$$

$$t_1 = \frac{x_1}{V_s} \quad t_2 = \frac{x_2}{V_s} \quad (20)$$

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{x_2 - x_1}{V_s}, x_2 \geq x_1 \quad (21)$$

En donde:

$$x_1 = \sqrt{r^2 + d^2 - 2rd \cos \theta} \quad (22)$$

$$x_2 = \sqrt{r^2 + d^2 - 2rd \cos(120 - \theta)} \quad (23)$$

Donde la velocidad del sonido a 0°C es de  $331 \frac{m}{s}$  con un incremento de  $0.6 \frac{m}{s}$  por grado centígrado.

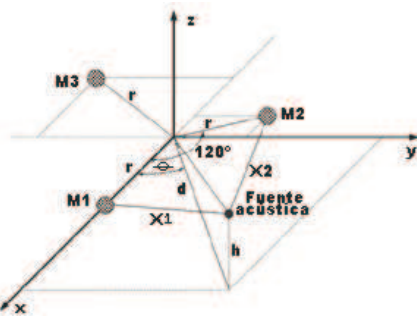
Es importante remarcar que en la Figura 10

el valor de  $\theta$  está entre 0 y 60°, ya que para valores

superiores significaría que el micrófono M2 se activo primero.

Analizando un intervalo de 0 a 60°, implícitamente se analiza los 360° de cobertura, ya que para los otros cinco intervalos restantes lo que cambia es solamente los micrófonos que se activan así como el orden de activación, pero los desfases para un radio (r), distancia (d) y ángulo ( $\theta$ ) determinados, son los mismos.

Ahora faltaría considerar que la fuente acústica no se encuentre en el mismo plano que el robot, por lo que se analizara el mismo caso de la Figura 10 en 3 dimensiones como se muestra en la Figura 11.



**Figura 11: Disposición en 3 dimensiones de una fuente acústica respecto a los micrófonos**

Por lo que al hacer el análisis en tres dimensiones empleando análisis vectorial se obtienen las nuevas coordenadas de la fuente acústica como se muestran en las Ecuaciones 24 y 25.

$$x1 = \sqrt{r^2 + d^2 + h^2 - 2rd\cos\theta} \quad (24)$$

$$x2 = \sqrt{r^2 + d^2 + h^2 - 2rd\cos(\theta - 30)} \quad (25)$$

En este punto tenemos de incógnitas la distancia(d), la altura(h), las distancias (x1 y x2) y el

ángulo( $\theta$ ), y solo se conoce el desfase en tiempo

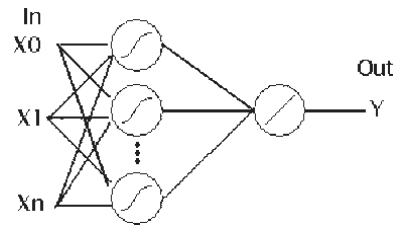
existente entre la activación entre dos micrófonos

## 6. Redes Neuronales.

Las redes neuronales son modelos matemáticos que intentan imitar la estructura y funcionamiento del cerebro. Una red neuronal está formada por un conjunto de elementos simples interconectados, que es capaz de procesar la información disponible para aprender y así clasificar, predecir, discriminar.[7].

### 6.1 REDES NEURONALES CON ALGORITMO DE APRENDIZAJE DE RETRO PROPAGACIÓN.

La estructura de una red con algoritmo de aprendizaje de retropropagación consiste en capas de neuronas donde la salida de una neurona de una capa, alimenta todas las neuronas de la capa siguiente. El aspecto fundamental de esta estructura es que no existen las uniones de retroalimentación. La red como se muestra en la Figura 12



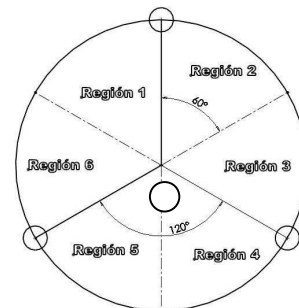
**Figura 11: Estructura básica de una red neuronal unidireccional**

Y la actualización de pesos se realiza mediante el algoritmo de aprendizaje de *Backpropagation* donde Corregiremos primero el error en la capa de salida, para la que supondremos conocido el valor de la señal deseada, y usaremos de forma recursiva los valores conocidos de capas posteriores para actualizar cada una de las capas. Supondremos una vez más una función de coste  $\epsilon(w)$  de la forma  $\epsilon(w) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n e_i^2$  con la particularidad de que nos referiremos siempre a los errores  $e_i$  en la capa de salida, independientemente de la neurona que consideremos[8].

## 7. Propuesta de Detección.

Como se vio en la sección anterior el número de incógnitas no permite obtener la ubicación del punto focal de la fuente, por lo cual se propone utilizar una configuración de 4 micrófonos para obtener la dirección entre el centroide del robot y el punto focal. Empleando una red Neuronal tipo con algoritmo de aprendizaje de retropropagación y para obtener los datos de entrada la detección por diferencia de fase como se explico secciones anteriores.

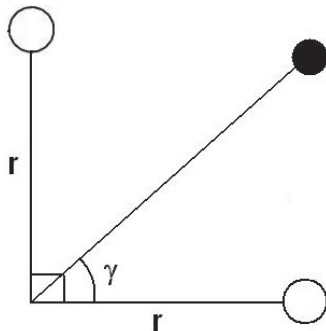
Primero se dividirán los 360° de estudio en 6 grupos de 60° ya que si el ángulo en algún momento fuera superior a los 60° indicaría que el orden en que se activaron los micrófonos es diferente como se muestra en la Figura 12.



**Figura 12: Regiones de estudio del robot**



Después se detectara cuando cualquiera de los 3 micrófonos que se encuentra en la base del robot se active sobrepasando el umbral previamente definido se dispararan 2 contadores deteniendo el primer contador cuando alguno de los otros micrófonos en la base del robot sobrepase el umbral, obteniendo así el desfase en el plano x, y el segundo contador se detendrá cuando el micrófono 4 que se encuentra sobre el centroide del robot se active sobrepasando el umbral obteniendo así el desfase en la altura, como se muestra en la Figura 13

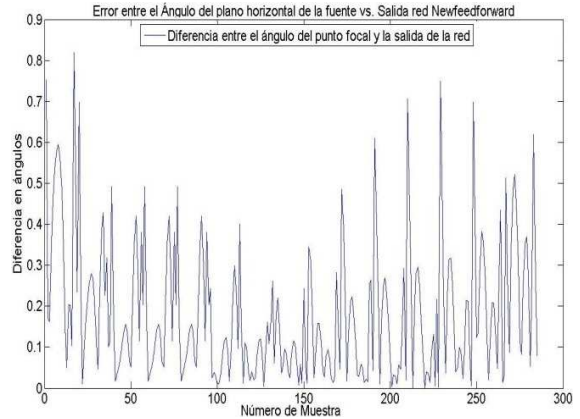


**Figura 13: Diagrama lateral de la disposición de los micrófonos**

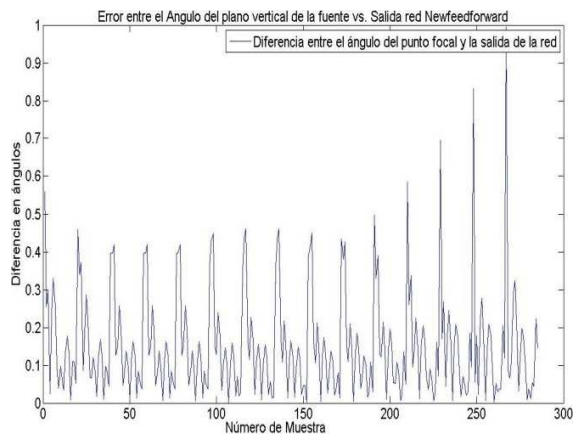
Posteriormente se obtendrá la temperatura ambiental de un LM35 y posteriormente obtener su valor digital mediante un convertidor ADC, para obtener la velocidad del sonido en el momento de la detección, mediante la ecuación 19, posteriormente se procesan los datos en una red Neuronal con algoritmo de aprendizaje de retropropagación teniendo un sistema tipo MIMO (Multiple-Input *Multiple-Output*) con lo cual se obtiene la orientación de la punto focal con el centroide del robot empleando posteriormente estos datos en las ecuaciones de la 1 a la 7 para poder generar su movimiento

## 8. Resultados

Los resultados obtenidos con el método propuesto se probaron con 286 muestras las cuales varían de 0 a 60° a intervalos de 5° para el plano horizontal y de 0 a 89° en intervalos de 5° y con una distancia en el plano vertical, ya que al llegar a los 90° respecto al centroide, debido a que los 3 micrófonos en el plano horizontal se activan al mismo tiempo indeterminando el sistema obteniendo un error cuadrático medio del ángulo en el plano xy de 0.3155% como se muestra en la Figura 14 y en la altura de 0.1875% como se muestra en la Figura 15.



**Figura 14: Error cuadrático medio entre la posición de horizontal de la fuente y la salida de la red**



**Figura 14: Error cuadrático medio entre la posición de horizontal de la fuente y la salida de la red**

## 9. Referencias

- [1] Angeles, J.(1997) Fundamentals of Robotic Mechanical Systems: Theory, Methods and Algorithms. Springer
- [2] Anibal Ollero Baturone “Robótica manipuladores y robots móviles”
- [3] Tesis Doctoral: “Detección y diagnóstico de Fallas en robots móviles Cooperativos” por Rodrigo Arnaldo Carrasco Schmidt Pontificia universidad católica de Chile escuela de ingeniería
- [4] Huber, David Miles. “Microphone Manual: Design and Application”. Indianapolis, IN: Howard W. Sams & Co., 1988.
- [5] Clifford, Martin. “Microphones”. 3rd ed. Blue
- [6] Edyson G, Oscar V. “Diseño y construcción de una mascota digital: Sistema Mecánico y Sensorial”
- [7] Hertz, Krogh y Palmer Introduction to the theory of neural computation - Addison-WesleyS. Haykin

8° Congreso Nacional de Mecatrónica  
Noviembre 26 y 27, 2009. Veracruz, Veracruz.

Neural Networks (2a edición) - Prentice Hall  
International

[8]QUESADA, V. (2000): “Predicción dinámica  
mediante redes neuronales”. *Perspectivas en  
estadística e investigación operativa*. (Pascual, A. y  
Parras, L., eds.) Colección Techné,  
Universidad de Jaén.