- 1. TIPO DE DOCUMENTO: Trabajo de grado para optar por el título de INGENIERO MECATRÓNICO
- 2. TÍTULO: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA MÓVIL LOCALIZADORA DE UNA FUENTE SONORA
- 3. AUTORES: Hernán Mauricio Cano Galvis y Juan Miguel Fresneda Izquierdo
- 4. LUGAR: Bogotá, D.C.
- 5. FECHA: Junio de 2013
- **6.** PALABRAS CLAVE: Arreglo de micrófonos, Audio, Correlación, Diferencias Interaurales de Tiempo, Filtro IIR, Frecuencia de Operación, Fuente Sonora, Plataforma Móvil y Preamplificación.
- 7. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO: El objetivo principal de este proyecto es el diseño y la construcción de una plataforma móvil localizadora de una fuente sonora, capaz de dirigirse hacia ella evadiendo obstáculos, basado en un estudio profundo del estado del arte a nivel nacional e internacional. Adicionalmente se presenta todos los aspectos ingenieriles del diseño mecánico, electrónico y computacional, los cuales fueron pensados para desarrollar satisfactoriamente el proyecto, siendo este trabajo el primer paso para el trabajo en esta área dentro de la Universidad.
- 8. LÍNEAS DE INVESTIGACIÓN: Línea de investigación de la USB: Tecnologías actuales y sociedad. Sub línea de investigación de la Facultad de Ingeniería: Análisis y Procesamiento de Señales (ASP). Campo Temático del Programa: Robótica.
- 9. FUENTES CONSULTADAS: NAKADAI, Kazuiro; HIDAI, Ken-Ichi; MIZOGUCHI, Hiroshi; OKUNO, Hiroshi y KITANO, Hiroaki. Human-robot interaction through real-time auditory and visual multiple-talker tracking. En: IEEE/RSJ proceedings of international conference on intelligent robots and systems. Maui, Hawaii. Vol. 3. 2001. CELIS, Álvaro; NAVIA, Gustavo y VELÁSQUEZ, Carlos. Sistema acústico de navegación para robots móviles. Trabajo de grado Ingeniería Electrónica. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana.
- 10. CONTENIDOS: Como la mayoría de las personas lo experimentan a diario, el sistema auditivo humano posee la habilidad de percibir la localización sonora, es decir, de determinar la posición espacial de una fuente sonora. Esto se da gracias a la audición biaural que proporciona un par de oídos, y al hecho que cada uno de estos reciba mensajes diferentes. Para los robots móviles, los sensores auditivos pueden llegar a ser un complemento con los sistemas de visión, por ejemplo, la localización de una fuente sonora puede llevar a un robot a dirigir una cámara hacia ella y poder realizar correlaciones entre estas dos fuentes de información, sin embargo es evidente que la precisión de la audición es relativamente baja con respecto a la visual por cuestiones de acústica, pero esta disminución en la precisión se puede contrarrestar con otras características que la audición tiene, tal como la de poder ser omnidireccional, lo que se traduciría en menos actuadores para mover y mayor facilidad para un diseño compacto, otra cosa destacable es que el robot pueda trabajar con baja o en completa oscuridad, y que sea afectada en menor manera que la visión con los obstáculos del ambiente, lo que se traduce en que un robot pueda detectar la fuente que se encuentra detrás de un obstáculo, o que detecte que la fuente sonora viene de una habitación fuera del rango de visión, lo que haría que el robot se dirija a donde percibe el sonido y después termine de localizar la proveniencia del sonido.
- **11. METODOLOGÍA:** Esta investigación tiene un enfoque Empírico-Analítico, con base en diferentes estudios realizados, nacional e internacionalmente.
- 12. CONCLUSIONES: El sistema de localización de la fuente sonora se diseñó para trabajar en un plano 2D, obteniendo resultados satisfactorios con un error relativo de 0.23% en el cálculo del ángulo. Sus limitantes son el estrecho rango de frecuencia que puede detectar, la posibilidad de confundirse con un armónico en el ambiente, en el caso de que éste tenga una componente significativa de 1kHz y la poca precisión del cálculo del ángulo si se presentase una fuente sonora en un plano 3D.

En cuanto al funcionamiento del proyecto, se realizaron pruebas de campo que comprobaron el buen desempeño de los módulos implementados, logrando que la plataforma móvil localizara la fuente sonora, se ubicara frente a ella y se dirigiera hasta su posición, evadiendo los obstáculos que se le presentara durante su trayectoria.

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA MÓVIL LOCALIZADORA DE UNA FUENTE SONORA

# HERNÁN MAURICIO CANO GALVIS JUAN MIGUEL FRESNEDA IZQUIERDO

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
BOGOTÁ D.C.

2013

# DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PLATAFORMA MÓVIL LOCALIZADORA DE UNA FUENTE SONORA

# HERNÁN MAURICIO CANO GALVIS JUAN MIGUEL FRESNEDA IZQUIERDO

Proyecto de Grado para optar al título de Ingeniero Mecatrónico

Director

Morian Nair Calderón Díaz

Ingeniero Electrónico

UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

PROGRAMA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA

BOGOTÁ D.C.

2013

| Nota de | e Aceptacion                    |
|---------|---------------------------------|
|         |                                 |
|         |                                 |
|         |                                 |
|         |                                 |
|         |                                 |
|         |                                 |
|         |                                 |
|         |                                 |
|         |                                 |
|         |                                 |
|         |                                 |
|         | Firma del Presidente del Jurado |
|         |                                 |
|         |                                 |
|         |                                 |
|         | Firma del Jurado                |
|         |                                 |
|         |                                 |
|         |                                 |
|         |                                 |
|         | Firma del Jurado                |
|         |                                 |

A los precursores de esta gran aventura; mi tío Carlos Galvis Díaz (Q.E.P.D.) y a su esposa Estela Quintero, quienes con su apoyo y positivismo lograron darme fuerzas y valor para culminar esta etapa de mi vida.

#### Hernán Mauricio Cano Galvis

No logro procesar en mi cabeza toda la información que atravesó mi existencia para llegar a este momento; pero como no puedo desligar mi vida de mi oficio, porque eso sería amputarle mi cuerpo a mi alma, quiero dedicarle unos instantes – al igual que el robot se detiene para reconocer el objetivo de su búsqueda-, para destinar todo este proceso a una reflexión de mi travesía por el mundo, fluyendo alrededor de una gran multiplicidad de personas, experiencias y devenires, y poder advertir las distintas transiciones que acompañaron la creación de este trabajo.

En el proceso llegué a sentir que mi oficio estaba muerto, al igual que las máquinas que rodean mi cotidianidad, todo aquello que construye lo que soy; así nació la pregunta: ¿cómo darle vida a este ser-técnico? Aquella inquietud me llevó a reflexionar sobre la cualidad del sonido, aquello que expresa la singularidad de algo, que puede enunciar la presencia de un aliento de piedra, que en la montaña se arropa con el canto de los pájaros para anunciar el amanecer venidero.

Al experimentar y mezclar mi saber con mi pasión, revelé en mi horizonte *otra orilla* que relacionaba mi experiencia con mi quehacer; en este espacio pude mirar hacia atrás y ver que en la velocidad, con la que recuerdo mi historia, brotan reflexiones del mundo.

Ahora recuerdo: destinarle un espacio a la memoria. Alguna vez pensaba que era un robot, incapaz de compartir mis emociones con un gesto, imposibilitado a ser lo que mi entorno calculaba que fuera mi camino. Pero aquel falso sol atardeció y el canto de las cigarras abrió mi discernimiento, que se amplió como un caleidoscopio donde cada movimiento sensorial condensaba una percepción distinta del mundo.

Redescubrí lo importante de la creación: el amor por lo que se hace, una oportunidad de construir algo que puede proyectar no sólo conocimiento, sino también una experiencia de vida. El exceso dejó de ser un límite prohibido y se transformó en un espacio para compartir y reconocerse en el otro.

Quiero dedicarle este trabajo al mismo robot que, al recibir la facultad de la escucha, me recordó que para seguir el camino debo ser capaz de parar unos segundos, escuchar y seguir el sonido de mis palpitaciones para poder construir mi siguiente destino.

Juan Miguel Fresneda Izquierdo

#### **AGRADECIMIENTOS**

A mi mamá por enseñarme que las cosas hay que hacerlas con pasión, dedicación y responsabilidad, por sus palabras sabias en los momentos que no me sentía capaz de continuar y sobre todo por todo su apoyo durante estos 5 años.

A mi amigo, compañero y confidente; Juan Miguel Fresneda Izquierdo, por todos estos años de trabajo conjunto, su paciencia, su entrega, su terquedad y su sabiduría en cada reto que asumíamos para lograr los mejores resultados. Pero sobre todo por comprenderme y aceptarme tal como soy, por su amistad incondicional y sus sabios consejos. También debo agradecer a sus padres que me acogieron como parte de la familia.

A Jeremy Burque por su paciencia durante todo este proceso, por su colaboración inmensa en estos 5 años y por sus palabras de apoyo que cada día hicieron que me motivará a hacer las cosas bien, porque como una vez me dijo: las cosas buenas no son las más fáciles de hacer.

A mi director de tesis; el Ing. Morian Calderón Díaz, por el empeño que le puso a nuestro proyecto de grado, desde el primer momento cuando nos ayudó a hacer la propuesta. Por la cantidad de veces que nos revisó el documento y por todos los problemas que nos ayudó a solucionar durante este largo proceso.

A la Universidad y a algunos docentes que hicieron en mí no sólo un mejor profesional, sino una mejor persona. A la Ing. Mariana Medina Sánchez, al Ing. Carlos Andrés Lozano y al Ing. Camilo Téllez Villamizar por su amistad, sus consejos y por su esfuerzo en enseñarme algo más, que simplemente matemáticas.

A la Rama Estudiantil IEEE de la Universidad, por guiarme hacia un mejor futuro, por todas las oportunidad que me brindó y por los excelentes e inolvidables amigos que hice. A estos amigos, con los cuales no sólo compartí noches locas, sino experiencias de vida inimaginables. A Mariana Botero y a José Cuida, que con su sabiduría aportaron muchos granitos de arena para la realización de este proyecto.

Por último a mi familia Cano Salazar y Galvis Díaz, sobre todo a mis abuelos, por su apoyo incondicional en cada paso que doy en mi vida, por su comprensión cuando fallo y por sus elogios cuando triunfo.

### **Hernán Mauricio Cano Galvis**

Por todo aquello que trasciende más allá de las palabras y un simple agradecimiento:

Papá • Mamá • Mariana • Jose • Mauricio • Juaco

Por toda la ayuda con el proyecto:

Morian Calderón • Darío Páez

Juan Miguel Fresneda Izquierdo

# CONTENIDO

pág.

| INTRODUCCIÓN                                      | 19 |
|---|----|
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA                     | 22 |
| 1.1 ANTECEDENTES                                  | 22 |
| 1.2 DEFINICIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA         | 25 |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN                                 | 26 |
| 1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN                 | 28 |
| 1.4.1 Objetivo General                            | 28 |
| 1.4.2 Objetivos Específicos                       | 28 |
| 1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO          |    |
| 1.5.1 Alcances del Proyecto                       | 29 |
| 1.5.2 Limitaciones del Proyecto                   |    |
|   |    |
| 2. MARCO TEÓRICO                                  | 30 |
| 2.1 ROBÓTICA                                      | 30 |
| 2.1.1 Clasificación de los robots                 | 30 |
| 2.2 LOCALIZACIÓN DE FUENTES SONORAS               | 37 |
| 2.2.1 Fundamentos del sonido                      | 37 |
| 2.2.2 Psicoacústica y percepción                  | 44 |
| 2.2.3 Audio (representación eléctrica del sonido) |    |
| 2.2.4 Filtros                                     |    |

| 3. METODOLOGÍA65  | ,                               |
|---|---------------------------------|
| 3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN65   | ,                               |
| 3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN67  | ,                               |
| 3.2.1 Sub-línea de investigación67  | ,                               |
| 3.2.2 Núcleo problemático67   | ,                               |
|   |                                 |
| 4. DISEÑO INGENIERIL  | ,                               |
| 4.1 PLATAFORMA MÓVIL69  | )                               |
| 4.1.1 Selección del sistema de locomoción   | )                               |
| 4.1.2 Diseño del sistema de locomoción70  | )                               |
| 4.1.3 Implementación del sistema de locomoción77  | ,                               |
| 4.1.5 Diseño de la estructura mecánica80  | )                               |
| 4.2 MÓDULO DE LOCALIZACIÓN DE LA FUENTE SONORA81  |                                 |
| 4.2.1 Fuente sonora82   | ,                               |
|   |                                 |
| 4.2.2 Transductor acústico84  |                                 |
| 4.2.2 Transductor acústico  |                                 |
|   |                                 |
| 4.2.3 Amplificación de la señal adquirida por los micrófonos99  | )                               |
| 4.2.3 Amplificación de la señal adquirida por los micrófonos  | )<br>;                          |
| 4.2.3 Amplificación de la señal adquirida por los micrófonos       99         4.2.4 Procesamiento digital de las señales       106         4.2.5 Implementación del módulo de localización de la fuente sonora       119  | )<br>6                          |
| 4.2.3 Amplificación de la señal adquirida por los micrófonos       99         4.2.4 Procesamiento digital de las señales       106         4.2.5 Implementación del módulo de localización de la fuente sonora       119         4.3 MÓDULO DE UBICACIÓN       122  | )<br>)<br>)<br>2                |
| 4.2.3 Amplificación de la señal adquirida por los micrófonos994.2.4 Procesamiento digital de las señales1064.2.5 Implementación del módulo de localización de la fuente sonora1194.3 MÓDULO DE UBICACIÓN1224.3.1 Selección del medidor magnético123   | )<br>)<br>)<br>3                |
| 4.2.3 Amplificación de la señal adquirida por los micrófonos.994.2.4 Procesamiento digital de las señales.1064.2.5 Implementación del módulo de localización de la fuente sonora.1194.3 MÓDULO DE UBICACIÓN.1224.3.1 Selección del medidor magnético.1234.3.2 Algoritmo del módulo de ubicación.123   | )<br>3<br>3<br>4                |
| 4.2.3 Amplificación de la señal adquirida por los micrófonos.994.2.4 Procesamiento digital de las señales.1064.2.5 Implementación del módulo de localización de la fuente sonora.1194.3 MÓDULO DE UBICACIÓN.1224.3.1 Selección del medidor magnético.1234.3.2 Algoritmo del módulo de ubicación.1234.4 MÓDULO DE EVASIÓN DE OBSTÁCULOS.124  | 3334                            |
| 4.2.3 Amplificación de la señal adquirida por los micrófonos994.2.4 Procesamiento digital de las señales1064.2.5 Implementación del módulo de localización de la fuente sonora1194.3 MÓDULO DE UBICACIÓN1224.3.1 Selección del medidor magnético1234.3.2 Algoritmo del módulo de ubicación1234.4 MÓDULO DE EVASIÓN DE OBSTÁCULOS1244.4.1 Selección del sensor de proximidad124  | 1<br>1<br>1<br>1<br>1<br>1<br>1 |
| 4.2.3 Amplificación de la señal adquirida por los micrófonos.994.2.4 Procesamiento digital de las señales.1064.2.5 Implementación del módulo de localización de la fuente sonora.1194.3 MÓDULO DE UBICACIÓN.1224.3.1 Selección del medidor magnético.1234.3.2 Algoritmo del módulo de ubicación.1234.4 MÓDULO DE EVASIÓN DE OBSTÁCULOS.1244.4.1 Selección del sensor de proximidad.1244.4.2 Configuración de los sensores.126 | 1<br>3<br>3<br>3<br>4<br>4      |

| 5. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS                         | 133 |
|---|-----|
| 5.1 PRUEBA DEL MÓDULO DE LOCALIZACIÓN DE LA FUENTE SONORA . | 134 |
| 5.2 PRUEBA DEL SISTEMA INTEGRADO                            | 136 |
|   |     |
| 6. RECOMENDACIONES  | 142 |
|   |     |
| 7. CONCLUSIONES   | 143 |
|   |     |
| BIBLIOGRAFÍA  | 145 |

# LISTA DE TABLAS

pág.

| Tabla 1. Velocidad de propagación de una onda sonora dependiendo de medi         | Ο.   |
|--|------|
| La temperatura es de 20° C, a menos que se indique lo contrario                  | 38   |
| Tabla 2. Clasificación en áreas de la geometría en forma de triángulo equilátero | o.55 |
| Tabla 3. Clasificación en áreas de la geometría en forma de cuadrilátero         | 58   |
| Tabla 4. Especificaciones técnicas de rueda comercial                            | 72   |
| Tabla 5. Coeficientes de fricción estática y dinámica                            | 73   |
| Tabla 6. Especificaciones técnicas del micromotor comercial                      | 76   |
| Tabla 7. Pruebas de corriente de los micromotores                                | 77   |
| Tabla 8. Tabla de verdad de un driver para motor DC                              | 79   |
| Tabla 9. Comparación de los diferentes tipos de baterías                         | 79   |
| Tabla 10. Características técnicas del micrófono Electret POM-2738P-C33-R        | 89   |
| Tabla 11. Comparación de dispositivos con arquitectura DSP                       | .106 |
| Tabla 12. Variables del diagrama de flujo de la correlación cruzada general      | .115 |
| Tabla 13. Variables del diagrama de flujo de la correlación cruzada general      | .117 |
| Tabla 14. Hoja de especificaciones del sensor de localización de una fuente      |      |
| sonora   | .121 |
| Tabla 15. Especificaciones técnicas del sensor de proximidad                     | .125 |

# LISTA DE GRÁFICA

| Gráfica1. Respuesta en frecuencia. Electret POM-2738P-C33-R                 | 86  |
|---|-----|
| Gráfica 2. Respuesta en frecuencia. Electret POM-2742P-2-R                  | 86  |
| Gráfica 3. Respuesta en frecuencia. Electret AOM-4546P-R                    | 86  |
| Gráfica 4. Señal de 2kHz recibida por la cápsula ElectretPOM-2738P-C33-R    | 88  |
| Gráfica 5. Señal de 2kHz recibida por la cápsula Electret POM-2742P-2-R     | 88  |
| Gráfica 6. Señal de 2kHz recibida por la cápsula Electret AOM-4546P-R0      | 88  |
| Gráfica 7. Prueba de directividad de los micrófonos                         | 95  |
| Gráfica 8. Señal adquirida a 0°   | 97  |
| Gráfica 9. Señal adquirida a 22.5°  | 98  |
| Gráfica 10. Señal adquirida a 45°   | 99  |
| Gráfica 11. Simulación de la etapa de preamplificación                      | 103 |
| Gráfica 12. Etapas de preamplificación                                      | 104 |
| Gráfica 13. Señal sinusoidal de 1kHz capturada por los micrófonos           | 108 |
| Gráfica 14. Respuesta del filtro pasa bandas Butterworth en magnitud y fase | 109 |
| Gráfica 15. Señales sinusoidales de 1kHz filtradas en el dsPIC y en Matlab® | 114 |
| Gráfica 16. Error del módulo de localización de la fuente sonora            | 135 |

# LISTA DE FIGURAS

|   | , |        |
|---|---|--------|
| n | 2 | $\sim$ |
| v | а | u      |

| Figura 1. Robot poliarticulado  | 32 |
|---|----|
| Figura 2. Robot androide  | 32 |
| Figura 3. Robot zoomórfico  | 33 |
| Figura 4. Robot híbrido   | 34 |
| Figura 5. Robot diferencial   | 35 |
| Figura 6. Robot síncrono  | 35 |
| Figura 7. Robot tipo triciclo   | 36 |
| Figura 8. Robot tipo carro  | 36 |
| Figura 9. Robot Omnidireccional   | 37 |
| Figura 10. Esquema de campo directo y reverberante                              | 40 |
| Figura 11. Direcciones utilizadas para el estudio de la localización del sonido | 44 |
| Figura 12. Principio del ITD  | 45 |
| Figura 13. Principio del IID  | 47 |
| Figura 14. Tipos de micrófonos electrostáticos                                  | 49 |
| Figura 15. Micrófono Shure SM58. Micrófono electrodinámico de bobina móvil.     | 50 |
| Figura 16. Configuración del par espaciado                                      | 52 |
| Figura 17. Configuración de par casi coincidente                                | 53 |
| Figura 18. Geometría en forma de triángulo equilátero                           | 54 |
| Figura 19. Áreas de la geometría en forma de triángulo equilátero               | 55 |
| Figura 20. Áreas de la geometría del cuadrilátero                               | 56 |
| Figura 21. Propagación sonora a 0° y 45°  | 56 |
| Figura 22. Patrones polares comunes e ideales en micrófonos                     | 60 |
| Figura 23. Diagrama de respuesta en frecuencia plana                            | 61 |
| Figura 24. Metodología del proyecto   | 66 |
|   |    |

| Figura 2  | 5. Diagrama de bloques general del funcionamiento del sistema            | 68   |
|-----------|--|------|
| Figura 20 | 6. Vista lateral de la plataforma móvil                                  | 71   |
| Figura 2  | 7. Diagrama de cuerpo libre de una rueda sobre un plano inclinado de     | 20°  |
|           |  | 72   |
| Figura 28 | 3. Circuito esquemático del sistema de locomoción                        | 78   |
| Figura 29 | 9. Base de la plataforma móvil   | 80   |
| Figura 30 | ). Prueba de flexión de la lámina de acrílico                            | 81   |
| Figura 3  | 1. Diagrama de bloques del módulo de localización de la fuente sonora    | a 82 |
| Figura 32 | 2. Fuente Sonora   | 83   |
| Figura 33 | 3. Circuito esquemático del circuito de alimentación de los micrófonos   | 87   |
| Figura 34 | 4. Micrófono ECM8000   | 90   |
| Figura 3  | 5. Micrófono diseñado  | 90   |
| Figura 36 | 6. Proceso de acople de la cápsula del micrófono                         | 91   |
| Figura 3  | 7. Posición del micrófono  | 92   |
| Figura 38 | 3. Estructura del arreglo de los micrófonos                              | 93   |
| Figura 39 | 9. Referencia de los micrófonos  | 93   |
| Figura 40 | Prueba de directividad de los micrófonos                                 | 94   |
| Figura 4  | 1. Circuito esquemático de acople para el transporte balanceado de       |      |
| señal     |  | 95   |
| Figura 42 | 2. Prueba de contraste de los micrófonos                                 | 97   |
| Figura 43 | 3. Circuito esquemático y simulación del divisor del voltaje             | 100  |
| Figura 4  | 4. Circuito esquemático y simulación del filtro pasa altas               | 101  |
| Figura 4  | 5. Circuito esquemático de la etapa de preamplificación                  | 102  |
| Figura 46 | 6. Calibración de la etapa de preamplificación con el pistófono de 94 dl | В.   |
|           |  | 103  |
| Figura 47 | 7. Circuito esquemático del filtro antialiasing                          | 105  |
| Figura 48 | 3. Diagrama de bloques del filtro IIR                                    | 112  |
| Figura 49 | 9. Diagrama de flujo del algoritmo del filtro IIR                        | 113  |
| Figura 50 | D. Diagrama de flujo de una correlación cruzada general entre dos        |      |
| señales   | discretas X y Y  | 116  |
|           |  |      |

| Figura 51. Diagrama de flujo del cálculo del ángulo                          | 118   |
|--|-------|
| Figura 52. PCB del módulo de localización de la fuente sonora                | 119   |
| Figura 53. Diagrama de flujo general de la implementación del sistema de     |       |
| localización de fuentes sonoras en el dsPIC                                  | 120   |
| Figura 54. Diagrama de bloques del módulo de ubicación                       | 122   |
| Figura 55. Compás digital CMPS10   | 123   |
| Figura 56. Diagrama de bloques del módulo de evasión de obstáculos           | 124   |
| Figura 57. Configuración de los sensores de proximidad                       | 126   |
| Figura 58. Área del sensor de proximidad                                     | 127   |
| Figura 59. Diagrama de bloques del módulo de evasión de obstáculos propu     | iesto |
|  | 128   |
| Figura 60. Nomenclatura de los sensores de proximidad                        | 128   |
| Figura 61. Diagrama de flujo general del módulo de evasión de obstáculos     | 130   |
| Figura 62. Algoritmo general del movimiento de la plataforma móvil           | 132   |
| Figura 63. Plataforma móvil localizadora de una fuente sonora                | 133   |
| Figura 64. Plano de los puntos de medición                                   | 134   |
| Figura 65. Prueba de funcionamiento del módulo de localización de la fuente  | €     |
| sonora   | 135   |
| Figura 66. Prueba No 1: Trayectoria de la plataforma móvil en el escenario 1 | 1137  |
| Figura 67. Prueba No 2: Trayectoria de la plataforma móvil en el escenario 2 | 2137  |
| Figura 68. Prueba No 3: Trayectoria de la plataforma móvil en el escenario 3 | 3138  |
| Figura 69. Prueba No 4: Trayectoria de la plataforma móvil en el escenario 4 | 1139  |
| Figura 70. Prueba No 4: Trayectoria de la plataforma móvil en el escenario 4 | 1140  |

# LISTA DE ANEXOS

|   | , |        |
|---|---|--------|
| n | 2 | $\sim$ |
| v | а | u      |

| Anexo   | A. Hoja de especificaciones técnicas del L293B                         | 154   |
|---------|--|-------|
| Anexo   | B. Conjunto de la plataforma móvil                                     | 155   |
| Anexo   | C. Plano de la base inferior de la plataforma móvil                    | 156   |
| Anexo   | D. Plano del acople del micromotor y la rueda                          | 157   |
| Anexo   | E. Planos del micromotor   | 158   |
| Anexo   | F. Plano de la Rueda Pololu  | 159   |
| Anexo   | G. Plano del soporte del micromotor                                    | 160   |
| Anexo   | H. Plano del sensor de proximidad                                      | 161   |
| Anexo   | I. Plano del soporte del sensor de proximidad                          | 162   |
| Anexo   | J. Conjunto de la parte superior de la plataforma móvil                | 163   |
| Anexo   | K. Conjunto del micrófono  | 164   |
| Anexo   | L. Plano de la base del micrófono                                      | 165   |
| Anexo   | M. Plano del cuerpo bajo del micrófono                                 | 166   |
| Anexo   | N. Plano del cuerpo alto del micrófono                                 | 167   |
| Anexo   | O. Plano de la cabeza del micrófono                                    | 168   |
| Anexo   | P. Planos de la cápsula Electret POM-2738P-C33-R                       | 169   |
| Anexo   | Q. Plano de la base superior de la plataforma móvil                    | 170   |
| Anexo   | R. Circuito esquemático general del sistema                            | 171   |
| Anexo   | S. Circuito esquemático del módulo de localización de la fuente sonora | a.172 |
| Anexo   | T. Circuito esquemático de la preamplificación y filtro antialiasing   | 173   |
| Anexo   | U. Circuito esquemático del módulo de ubicación, evasión de obstácu    | los y |
| control | de la plataforma móvil   | 174   |
| Anexo   | V. Circuito esquemático de la etapa de distribución de poder           | 175   |
| Anexo   | W. Tabla de las variables de los algoritmos                            | 176   |

| Anexo X. Diagrama de flujo del algoritmo de localización de la fuente son | ora177  |
|---|---------|
| Anexo Y. Diagrama de flujo de la función de interrupción ADC              | 179     |
| Anexo Z. Diagrama de flujo de la función de interrupción Timer            | 180     |
| Anexo 1. Diagrama de flujo de la función Filtros                          | 181     |
| Anexo 2. Diagrama de flujo de la función Validar                          | 182     |
| Anexo 3. Diagrama de flujo de la función Correlación 1                    | 183     |
| Anexo 4. Diagrama de flujo de la función Correlación 2                    | 185     |
| Anexo 5. Diagrama de flujo de la función Correlación 3                    | 187     |
| Anexo 6. Diagrama de flujo de la función Correlación 4                    | 189     |
| Anexo 7. Diagrama de flujo del algoritmo de ubicación de la plataforma mo | óvil191 |
| Anexo 8. Diagrama de flujo del algoritmo de evasión de obstáculos         | 192     |

#### **GLOSARIO**

ALIASING: Es el fenómeno físico que causa la aparición de frecuencias indeseadas en el momento de hacer un muestreo digital.

AOP: Amplificadores Operacionales.

BIAURAL: Proceso auditivo que incluye dos oídos simultáneamente

CI: Circuito Integrado

ESTEREOFONÍA: Técnica para obtener los sonidos estereofónicos.

ESTEREOFÓNICO: Es un sonido que brinda la sensación de relieve espacial.

INTERAURAL: Es la relación de la recepción y percepción del sonido de cada oído.

ISOTRÓPICO: Tiene propiedades iguales en todas las direcciones.

PISTÓFONO: Dispositivo diseñado para reproducir un tono puro de una frecuencia puntual, a un nivel de presión sonoro específico. Se utiliza para la calibración de sistemas de medición de audio.

PSICOACÚSTICA: Estudia los parámetros de amplitud, ecualización y acústica. Además estudia la sensación percibida por un sonido y sus variables: sonoridad, la cual está ligada a la intensidad sonora, la altura, es decir, la frecuencia de la onda y el timbre o el comportamiento armónico de la onda.

# INTRODUCCIÓN

Cuando se trabaja en robótica móvil es evidente la necesidad del uso de sensores para reconocer el terreno en el que se mueve el robot, además de los sensores convencionales usados tales como sensores de distancia, presencia, luz, color, temperatura, entre otros; se han venido trabajando desde finales de los ochentas y principios de los noventas<sup>1</sup>, técnicas para un mejor reconocimiento del terreno y de lo que rodea al robot tal como el reconocimiento visual<sup>2</sup>, técnica que se ha venido poniendo de "moda" en las investigaciones académicas y donde su objetivo es detectar un objeto y su posición<sup>3</sup>. Sin embargo una de las desventajas de esta técnica es que se reduce a lo que puede estar en el campo visual del robot y de la iluminación a la que esté sometido el sistema. Esto ha llevado a que se promueva la investigación de sensores auditivos, teniendo en cuenta que la audición es uno de los sentidos más importantes en los humanos y los animales para reconocer el ambiente que los rodea. Los estudios han demostrado que la localización de fuentes sonoras les ayuda a los mamíferos a dirigir su mejor punto de visión a donde se localiza la fuente<sup>4</sup>, habilidad que puede ser importante para los robots.

Para los robots móviles, los sensores auditivos pueden llegar a ser un complemento con los sistemas de visión, por ejemplo, la localización de una fuente sonora puede llevar a un robot a dirigir una cámara hacia ella y poder

<sup>1</sup>WESTELIUS, Carl Johan. Preattentive gaze control for robot vision. Tesis de licenciatura. Oping, Sweden: Oping University. 1992. ISBN 91-7870-961-X.

<sup>&</sup>lt;sup>2</sup>KANG, Eu-Young Elaine; COHEN, Isaac y MEDIONI, Gérard. Fast and robust 2D parametric image registration. EN: Instituteforrobotics and intelligentsystems (IRIS). 2003. [Citado 10 de septiembre de 2012]. Disponible en internet: <a href="http://iris.usc.edu/outlines/papers/2003/kang-Registration2D.pdf">http://iris.usc.edu/outlines/papers/2003/kang-Registration2D.pdf</a>

<sup>&</sup>lt;sup>3</sup>KANG, Jinman; COHEN, Isaac y MEDIONI, Gérard. Tracking objects from multiple and moving cameras. <u>En:</u> IEEE Intelligent distributed surveilliance systems. London. Febrero. 2004. p. 31-53. ISSN 0537-9989.

<sup>&</sup>lt;sup>4</sup> HEFFNER, Henry y HEFFNER, R. Evolution of mammalian hearing. EN: 153<sup>rd</sup> meeting of the Acoustical Society of America. Junio. 2007.

realizar correlaciones entre estas dos fuentes de información<sup>5</sup>, sin embargo es evidente que la precisión de la audición es relativamente baja con respecto a la visual por cuestiones de acústica, pero esta disminución en la precisión se puede contrarrestar con otras características que la audición tiene, tal como la de poder ser omnidireccional, lo que se traduciría en menos actuadores para mover y mayor facilidad para un diseño compacto, otra cosa destacable es que el robot pueda trabajar con baja o en completa oscuridad, y que sea afectada en menor manera que la visión con los obstáculos del ambiente, lo que se traduce en que un robot pueda detectar la fuente que se encuentra detrás de un obstáculo, o que detecte que la fuente sonora viene de una habitación fuera del rango de visión, lo que haría que el robot se dirija a donde percibe el sonido y después termine de localizar la proveniencia del sonido.

Esto ha tenido interés principalmente en el estudio de robots bípedos, que puedan relacionarse con las personas y tengan la capacidad de separar fuentes sonaras en un ambiente ruidoso como una reunión social, la idea es que el robot dentro de una conversación identifique cuál de las personas que están hablando es el que tiene como objetivo identificar<sup>6</sup>.

Como se puede notar, el estudio y la implementación de este tipo de sensores puede llevar a nuevos horizontes a la robótica móvil, y teniendo en cuenta las posibilidades que este tipo de sensor puede dar, se pretende dar los primeros pasos en este campo, esto puede ser una semilla para futuras investigaciones realizadas en la universidad con enfoques hacia infinidad de aplicaciones, para

<sup>5</sup>NAKADAI, Kazuiro; HIDAI, Ken-Ichi; MIZOGUCHI, Hiroshi; OKUNO, Hiroshi y KITANO, Hiroaki. Real-time auditory and visual multiple-object tracking for humanoids. <u>En</u>: Proceedings of the 17<sup>th</sup> international joint conference on artificial intelligence. San Francisco, CA, USA. Vol. 2. 2001. p. 1425-1432. ISBN 1-55860-812-5.

<sup>&</sup>lt;sup>6</sup>NAKADAI, Kazuiro; HIDAI, Ken-Ichi; MIZOGUCHI, Hiroshi; OKUNO, Hiroshi y KITANO, Hiroaki. Human-robot interaction through real-time auditory and visual multiple-talker tracking. <u>En</u>: IEEE/RSJ proceedings of international conference on intelligent robots and systems. Maui, Hawaii. Vol. 3. 2001. p. 1402-1409. ISBN 0-7803-6612-3.

este caso puntual se pretende orientarlo a una plataforma móvil que sea capaz de detectar una fuente sonora y se dirija a ella evadiendo obstáculos.

Para tal fin se pretenden aplicar técnicas de captura en patrones de más de dos micrófonos para poder compensar el error que tienen los sistemas biaurales, seleccionando la mejor topología de ellas para la aplicación que se requiere en este trabajo, posteriormente se realizarán técnicas como ITD (diferencia de tiempo interaural) o IID (diferencia de intensidad interaural) obteniendo de esta manera la posición de la fuente; todo lo anterior se implementará en una plataforma que se dirija a dicha fuente evadiendo obstáculos.

#### 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

### 1.1 ANTECEDENTES

El estudio sobre la localización de fuentes sonoras ha sido motivado principalmente para entender cómo percibe el humano o los animales la posición con respecto a si mismo de un sonido específico, a esto se le conoce en el mundo como escucha biaural o estereofonía, que básicamente se traduce a la percepción del sonido con los dos oídos. Los estudios han concluido que el cerebro localiza una fuente sonora relacionando dos métodos, el ITD y el IID<sup>7</sup>.

Básicamente lo que realiza el primer método o ITD es medir la diferencia de llegada del sonido entre ambos oídos, pudiendo relacionarlo con la posición del sonido con respecto a su eje; esto es posible gracias a que el sonido se demorará unos microsegundos más en llegar a un oído que a otro; a diferencia del segundo método o IID que compara la diferencia de intensidad del sonido que llega a ambos oídos ubicando el sonido más a un lado que en el otro, esto es posible gracias a que cada vez que se duplica la distancia, el nivel sonoro disminuye en 6 dB<sup>8</sup>. En esta parte es importante hacer referencia a la razón por la cual el humano realiza la relación de ambos métodos, esto se debe a que en frecuencias bajas la onda se vuelve tan larga que no hay forma de distinguir la diferencia IID<sup>9</sup>. Inicialmente con esto fue con lo que se comenzó a estudiar este campo, pero comenzaron a surgir otras formas de localizar fuentes sonoras tales como utilizar

<sup>&</sup>lt;sup>7</sup>MURRAY, John; ERWIN, Harry y WERMTER, Stefan.Robotic sound-source localization and tracking using interaural time difference and cross-correlation. EN: Proceedings of neurobotics workshop. [Citado 09 de septiembre de 2012]. Disponible en Internet: <a href="http://iris.usc.edu/outlines/papers/2003/kang-Registration2D.pdf">http://iris.usc.edu/outlines/papers/2003/kang-Registration2D.pdf</a>>

<sup>&</sup>lt;sup>8</sup> GOLDSTEIN, Bruce. Sensation and perception. Canada: Wadswoth Cengage Learning. 8 ed. 2009.291 p. ISBN 0-495-60149-7.

<sup>&</sup>lt;sup>9</sup> RODEMANN, Tobias. A study on distance estimation in binaural sound localization. <u>EN:</u> IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS). Taipei. Oct. 2010. p. 425-430. ISBN 978-1-4244-6674-0.

diferentes arreglos de micrófonos, en forma triangular, cuadrada, cúbica, las cuales funcionan básicamente con los mismos principios de ITD e IID descritos anteriormente. Con respecto a la manipulación de una plataforma robótica con base en la identificación de fuente sonora se encontró que se ha realizado mediante técnicas biaurales y mediante técnicas de arreglos de micrófonos.

En la Universidad de Sunderland<sup>10</sup> aplicaron la técnica biaural para localizar y llevar al robot a la fuente sonora, utilizando un sistema embebido con Linux para adquisición de datos mediante su entrada de audio para posteriormente procesarlas, realizaron el acondicionamiento de la señal proveniente de dos micrófonos "Electret", no se menciona la posición de los micrófonos pero se entiende que estaban separados una distancia y ubicados sin tener una maza de en medio, cabe destacar que el robot sólo podía reconocer fuentes en 180 grados.

También se ha utilizado plataformas robóticas como AIBO<sup>11</sup>con base en la misma técnica biaural, no se especifica la forma de adquirir los datos ni el tipo de micrófono utilizado, su eficacia era de 10 grados y sólo localizaba las fuentes a 180 grados, como también se han implementado algoritmos no simplemente para determinar el ángulo si no también la distancia a la fuente sonora<sup>12</sup>.

En la Universidad de Extremadura en una tesis se realizó una cabeza biaural, muy similar a la humana con los micrófonos puestos en los oídos de un maniquí, se utilizaron unos micrófonos omnidireccionales AKG®, aunque en algunas partes de la tesis los llaman omnidireccionales cardiodes lo cual sería una clara contradicción, utilizaron una interface de audio M-audio® con dos entradas de ganancia ajustable para hacer la adquisición de datos, cabe resaltar que el robot

<sup>10</sup> MURRAY, Op. Cit.

<sup>&</sup>lt;sup>11</sup> LIU, Polley. Y MENG, Max. A bio-inspired sound location method. <u>En</u>: IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics. Zúrich.Septiembre. 2007. p. 1-6. ISBN 978-1-4244-1263-1

<sup>&</sup>lt;sup>12</sup> RODERMANN, Op. Cit.

identificaba únicamente la fuente a 180 grados. La conclusión de esta tesis no fue satisfactoria pues tuvieron una efectividad de 20 grados de precisión. <sup>13</sup> Normalmente los problemas que presentan este tipo de sistemas estereofónicos es la inhabilidad de determinar si los sonidos vienen de adelante o atrás, y también en los momentos en que la fuente está en el centro, dándole cabida a un gran margen de error<sup>14</sup>.

En la Universidad Paul Sabatier realizaron un arreglo de 8 micrófonos de manera lineal con su respectivo acondicionamiento, utilizaron una tarjeta de adquisición de datos EZ-Kit Lite de AnalogDevices®, su reconocimiento era de 180 grados<sup>15</sup>; también se discuten otros tipos de arreglos como triángulos o cuadrados utilizando interfaces de audio<sup>16</sup>. Se percibe que estos sistemas son más eficaces además de poder ubicar la fuente a 360 grados dependiendo de su configuración, el procesamiento es realizado en Matlab®, C++, o embebido.

En cuanto al ámbito nacional, se ha trabajado en la localización de fuentes sonoras en dos Universidades, en la Universidad Nacional de Colombia sede Medellín, y en la Universidad de San Buenaventura sede Bogotá; en la primera de ellas se discute un sistema basado en la adquisición de datos por un dsPIC, con el software de procesamiento diseñado en Java, tiene un arreglo de micrófonos en

<sup>&</sup>lt;sup>13</sup> CALDERITA, Luis. localización estereofónica en robots móviles. Trabajo de grado Ingeniería Informática, Cáceres, España: Universidad de Extremadura y Escuela Politécnica. Facultad de Ingeniería.

<sup>&</sup>lt;sup>14</sup>VALIN, Jean; MICHAUD, Francois; ROUAT, Jean y LETOURNEAU. Dominic. Robust sound source localization using a microphone array on a mobile robot.<u>En</u>: IEEE/RSJ Proceedings of the international conference on intelligent robots and systems (IROS). Las Vegas, NV. USA. Vol.2. Octubre. 2003. p. 1228-1233. ISBN 0-7803-7860-1.

<sup>&</sup>lt;sup>15</sup>ARGENTIERI, Sylvain; DANES, Patrick; SOUERES, Philippe y LACROIX, Pierre.An experimental testbed for sound source localization with mobile robots using optimized wideband beamformers.<u>En</u>: IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. Edmonto, Canada. Agosto. 2005. p. 2536-2541. ISBN 0-7803-8912-3.

<sup>&</sup>lt;sup>16</sup> MARKOVI, Ivan y PETROVI, Ivan. Applying Von Mises distribution to microphone array probabilistic sensor modeling. En: 41<sup>st</sup> international symposium on robotics (ISR) and 6<sup>th</sup> German conference on robotics (ROBOTIK). Munich. Junio. 2010. p. 1-7. ISBN 978-3-8007-3273-9.

triangulo y no se menciona efectividad ni tipo de micrófonos utilizados<sup>17</sup>. En la segunda se propone una tesis acerca de localización de fuentes de manera biaural, se utiliza una interfaz de audio como sistema de adquisición de datos, para luego hacer el procesamiento en Matlab®. La conclusión de la tesis es que se tiene un error considerable lo cual demuestra lo poco confiable de la técnica biaural <sup>18</sup>. También se realizó una tesis acerca de un sistema acústico de navegación de robots móviles en la Universidad Javeriana, donde se utilizó un dsPIC para hacer toda la adquisición de datos y el procesamiento de un arreglo de 4 micrófonos, además de esto se realizó un sistema de evasión de obstáculos, registrando el proyecto un resultado satisfactorio.<sup>19</sup>

## 1.2 DEFINICIÓN Y FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

Como se mencionó anteriormente, el estudio de métodos para reconocer el terreno o el ambiente donde se mueven los robots es muy importante, básicamente porque de estos y de la relación que tengan con otros sistemas de sensores hacen que el robot o la plataforma móvil cumpla su objetivo, por tal razón esta investigación iniciará el estudio de los sistemas de localización de fuentes sonaras y su relación con otros elementos con el fin de realizar una tarea específica, como por ejemplo; dirigirse hacia dicha fuente evadiendo obstáculos, entonces, la pregunta a realizarse debería ser, ¿Serán los sistemas de localización de fuentes sonoras una buena alternativa para utilizarlos como herramienta en aplicaciones de navegación y/o reconocimiento de terreno?

1

<sup>&</sup>lt;sup>17</sup>TRUJILLO, C. y García, J. Localización de fuentes sonoras por multilateración. <u>En</u>: Revista colombiana de física. Vol. 42, No. 3. 2010. p. 373-377. [Citado 29 de julio de 2012]. Disponible en internet: <revcolfis.org/ojs/index.php/rcf/article/download/420326/118 >

POVEDA, Juan. Localización de fuentes sonoras mediante análisis de señales. Trabajo de grado Ingeniería de Sonido- Bogotá D.C.: Universidad de San Buenaventura. Facultad de Ingeniería. 2010. [Citado 29 de julio de 2012]. Disponible en internet: <a href="http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/60204.pdf">http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/60204.pdf</a>>

<sup>&</sup>lt;sup>19</sup> CELIS, Álvaro; NAVIA, Gustavo y VELÁSQUEZ, Carlos. Sistema acústico de navegación para robots móviles. Trabajo de grado Ingeniería Electrónica. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. 2005.[Citado 29 de julio de 2012]. Disponible en internet: < http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/tesis97.pdf>

## 1.3 JUSTIFICACIÓN

Esta investigación vista de una manera general, se puede descomponer en dos partes; la primera es lo concerniente a identificar la posición de la fuente sonora, y todo lo que ello acarrea, tal como la adquisición de datos, el procesamiento digital de señales, y los algoritmos propios para la correlación de señales, la segunda es la aplicación que se le quiso dar a la identificación de la fuente sonora en este trabajo, que se representa como una plataforma móvil la cual se dirige a dicha fuente con base a la información de la identificación previamente obtenida y además evada obstáculos que estarán en el terreno donde se encuentre la plataforma.

El fondo de este trabajo no es la segunda parte sino la primera, pero a su vez es mostrar una aplicación de la primera con la ayuda de la segunda, es por ello la importancia de este; siendo estudio de grupos de investigación a nivel de maestría y de doctorado, y habiendo comenzado a estudiar a nivel de pregrado en la Universidad Politécnica de Cataluña como una propuesta para estudiantes de pregrado para su PFC (Proyecto de fin de Carrera). Las aplicaciones que se encuentran de estas técnicas son muy variadas y dependen fundamentalmente de la disciplina desde donde se aplique.

En general es una nueva tendencia que está complementando sistemas de reconocimiento tales como el de procesamiento de imágenes, <sup>20</sup> y a futuro este trabajo puede ser base de otra investigación en la misma rama o en otra; esto no es nuevo en nuestra universidad, sólo por poner un ejemplo en el LARC 2011 Categoría IEEE Open (Latin American Robotic Competition) en donde la Universidad participó y cuya sede fue Bogotá, se utilizó como base para el procesamiento digital de imágenes un proyecto de grado de estudiantes de

<sup>&</sup>lt;sup>20</sup>NAKADAI. Op, Cit.

ingeniería de Sonido<sup>21</sup>y se investigaron trabajos previos en otras temáticas como reconocimiento de placas de carros.<sup>22</sup>

Sobre esta temática en específico existe un trabajo previo en la Universidad de San Buenaventura que no tuvo una conclusión satisfactoria<sup>23</sup>, principalmente por los materiales, y la forma como se colocaron los micrófonos en el sistema que desarrollaron, tampoco explican cómo realizaron muchas de las cosas que hicieron, por lo que se pretende desarrollar y aplicar otras técnicas para una mejor respuesta, además de documentar y dejar un trabajo que por encima de todo sea algo productivo y no sea sólo un requisito más para el grado.

Las aplicaciones que pueden tener estos sistemas, además del propuesto en este trabajo, son sistemas de localización de eventos sonoros e identificación de los mismos en aulas, sistemas de seguridad, video conferencias, robótica bioinspirada, entre otros. Como anteriormente se mencionaba el objeto del trabajo es identificar la posición de la fuente sonora y mostrar una aplicación orientada a la navegación de una plataforma móvil, lo cual se ha hecho<sup>24</sup> y todas las técnicas no son novedosas, ni nuevas, lo diferente es que se implementarán sistemas diferentes a los que se han venido realizando.

En cuanto a la viabilidad económica, teniendo en cuenta la propuesta del proyecto de grado, no se ve que este trabajo tenga algún impedimento, así como en recursos bibliográficos, tampoco se ve impedido, gracias a las bases de datos que

<sup>&</sup>lt;sup>21</sup> GUERRERO, Catalina; PINILLA, Oscar y PÁEZ, Juan. Desarrollo de un sistema de control y automatización del nivel de los monitores de un músico en un montaje de sonido en vivo mediante procesamiento de imagen. Trabajo de grado Ingeniería de Sonido Bogotá D.C.: Universidad de San Buenaventura. Facultad de Ingeniería, 2010. [Citado 29 de julio de 2012]. Disponible en internet: <a href="http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/59897.pdf">http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/59897.pdf</a>

<sup>&</sup>lt;sup>22</sup> GONZÁLEZ, Johanna; LÓPEZ, Mabel y GONZÁLEZ, D. Desarrollo de un sistema de visión artificial para el reconocimiento de placas en vehículos particulares. Trabajo de grado Ingeniería Mecatrónica. Bogotá D.C.: Universidad de San Buenaventura. Facultad de Ingeniería, 2008. Disponible [Citado de julio de 2012]. en internet: <a href="http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/43331.pdf">http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/43331.pdf</a>

<sup>&</sup>lt;sup>23</sup> POVEDA. Op, Cit.

<sup>&</sup>lt;sup>24</sup> CELIS. Op, Cit.

la biblioteca de la Universidad dispone, y la base de datos de IEEEXplore, una de las más mejores a nivel técnico del mundo, la cual los autores tienen acceso.

# 1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

# 1.4.1 Objetivo General

Diseñar y construir una plataforma móvil localizadora de una fuente sonora, capaz de desplazarse hacia dicha fuente evadiendo obstáculos.

# 1.4.2 Objetivos Específicos

Determinar las especificaciones técnicas y funcionales de la plataforma móvil de acuerdo a las características del terreno.

Caracterizar el sistema para la captura de la señal proveniente de la fuente sonora.

Desarrollar el software para el desplazamiento y evasión de obstáculos de la plataforma móvil, de manera que pueda dirigirse hacia la fuente sonora.

Comprobar el funcionamiento y realizar correcciones.

#### 1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES DEL PROYECTO

# 1.5.1 Alcances del Proyecto

La plataforma móvil será autónoma, y sobre esta se implementará el sistema de localización de fuentes sonoras, además se espera que el sistema logre capturar e identificar adecuadamente la fuente sonora a 8 metros a su redonda.

## 1.5.2 Limitaciones del Proyecto

El algoritmo será diseñado y ejecutado en un lenguaje de alto nivel sobre un computador.

El ambiente en el que serán tomadas las señales tendrá que tener una relación señal-ruido (SNR) apropiada para filtrar el ruido de fondo, además la plataforma será capaz de moverse en un terreno plano al aire libre de por lo menos 8 m con una pendiente máxima de 20 grados, y evadir obstáculos de 40 cm de largo, 40 cm de ancho y 50 cm de alto.

El error de la medición del ángulo existente entre la fuente sonora y el norte de la estructura del sistema se estima que esté en un máximo del 10%.

La fuente sonora deberá ser intermitente y en una misma frecuencia hasta que el robot llegue su punto de ubicación.

## 2. MARCO TEÓRICO

# 2.1 ROBÓTICA

Durante toda su historia el hombre ha construido artefactos capaces de realizar tareas propias del ser humano que le faciliten el trabajo; desde la creación de catapultas como ayuda en las guerras, hasta las máquinas que evitan hacer los trabajos pesados. De igual forma el hombre también comenzó a reproducir partes del cuerpo humano para reemplazar esas extremidades que no se tienen y mejorar la calidad de vida de aquellas personas que necesitan de uno. Teniendo en cuenta el uso que le está dando el ser humano a los artefactos que fabrica se puede decir que la tecnología es apreciada como el objetivo de servir al ser humano.

Una de las ramas de la tecnología es la robótica, definida como la ciencia que estudia el diseño y construcción de artefactos y sistemas capaces de realiza trabajos del hombre. El termino robot se origina de la palabra checa "robota", que quiere decir "trabajo", fue utilizada por primera vez por el dramaturgo checo Karel Capek en 1923 cuando escribió su obra R.U.R. (los Robots Universales de Rossum).<sup>25</sup>

#### 2.1.1 Clasificación de los robots

En los diferentes textos consultados esta clasificación varía; la Federación Internacional de Robótica (IFR) clasifica a los robots dependiendo de su aplicación: robots industriales, robots médicos, robots domésticos, robots educativos, robots militares, robots de entretenimiento, robots de servicio (al servicio de los humanos o al servicio de las máquinas), robots espaciales y los

<sup>&</sup>lt;sup>25</sup> SOMOLINOS SÁNCHEZ. José. Avances en robótica y visión por computador. Cuenca: Ediciones de la Universidad de Castilla, 1ra Ed, 2002, 11 p. ISBN 84-8427-199-4.

robots de hobby, <sup>26</sup> y dependiendo de su estructura mecánica: robots cartesianos, robots cilíndricos, robots SCADA, robots articulados y robots paralelos. <sup>27</sup> José Salominos los clasifica en su libro según su cronología, mediante 3 generaciones: robots manipuladores (1ra generación, 1960-1980), robots de aprendizaje y con control sensorizado (2da generación, 1980-1985) y los robots inteligentes (3ra generación, 1985-actualidad). <sup>28</sup> La JIRA (Japanese Industrial Robot Association) ha clasificado a los robots en 6 clases dependiendo de su nivel de inteligencia: dispositivos de manejo manual, robots con secuencias fijas, robots de reproducción, robots de secuencia variable, robots de control numérico, robots inteligentes. <sup>29</sup> En este documento se va a profundizar sobre los robots, según su arquitectura.

### 2.1.1.1 Arquitectura de los robots

#### Poliarticulados

Estos tipos de robots son muy diversos respecto a la forma y configuración, la única semejanza entre ellos es la característica de ser sedentarios, además están estructurados para mover sus extremidades en un espacio determinado, comúnmente cuando la zona de trabajo es amplia, con un número limitado de grados de libertad. En este grupo se encuentran algunos robots industriales, los manipuladores. <sup>30</sup>

<sup>2</sup> 

<sup>&</sup>lt;sup>26</sup> BETANZOS, Wilbert. Construcción de robots autónomos multifunciones en ambientes semiconocidos. Trabajo de grado Licenciatura en Ingeniería en Sistemas Computacionales. Puebla, México: Universidad de las Américas Puebla, 2006. [Citado 21 de febrero de 2013]. Disponible en internet:<a href="http://catarina.udlap.mx/u\_dl\_a/tales/documentos/lis/betanzos\_m\_w/capitulo\_1.html">http://catarina.udlap.mx/u\_dl\_a/tales/documentos/lis/betanzos\_m\_w/capitulo\_1.html</a>

<sup>&</sup>lt;sup>27</sup>International Federation of Robotics (IFR). World Robotics 2005: statistics, market analysis, forecast, case studies and profitability of robots investment. Geneva, Suiza: United Nations Publication, 1ra Ed, 2005, 27 p. ISBN 978-92-110-11-00-5.

<sup>&</sup>lt;sup>28</sup>SOMOLINOS.Op, Cit., p. 18.

<sup>&</sup>lt;sup>29</sup> BETANZOS. Op, Cit.

<sup>&</sup>lt;sup>30</sup> BLÁZQUEZ, Miguel. Teleoperación de robot antropomórfico docente teachmover mediante wimote. Trabajo de grado Ingeniería de Telecomunicaciones. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena. Facultad de Ingeniería. 2012. 14 p. [Citado 10 de agosto de 2012]. Disponible en internet: < http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/2728/1/pfc4261.pdf >

Figura 1. Robot poliarticulado



Fuente. [Citado 24 de febrero de 2013]. Disponible en internet:

<a href="http://2.bp.blogspot.com/\_WyMdo4D88ZA/RzdB8iKuBsl/AAAAAAAAACc/s1\_Jj8daLB0/s320/robot.gif">http://2.bp.blogspot.com/\_WyMdo4D88ZA/RzdB8iKuBsl/AAAAAAAAACc/s1\_Jj8daLB0/s320/robot.gif</a>

#### Androides

Son los robots que tiene una similitud en la forma del cuerpo humano, su objetivo es imitar el comportamiento cinemático del mismo. Actualmente este tipo de robots no están muy evolucionados y no tienen aplicabilidad en la vida real, si utiliza básicamente para estudio y experimentación.<sup>31</sup>

Figura 2. Robot androide



Fuente. [Citado 24 de febrero de 2013]. Disponible en American Honda Motor Co. Disponible en internet: <a href="http://asimo.honda.com/Inside-ASIMO/">http://asimo.honda.com/Inside-ASIMO/</a>

<sup>&</sup>lt;sup>31</sup>MINATO, Takashi; SHIMADA, Michihiro; ISHIGURO, Hiroshiy ITAKURA, Shoji. Development of an android robot for studying human-robot interaction. <u>En:</u> Innovations in applied artificial intelligence. Mayo, 2004, vol. 3029, p. 424-434. ISSN 0302-9743.

#### Zoomórficos

Los robots zoomórficos, se caracterizan por imitar el comportamiento de los seres vivos, por ende este tipo de robot también cabe en a clase de androides.<sup>32</sup>

Figura 3. Robot zoomórfico



Fuente. [Citado 24 de febrero de 2013]. Disponible en internet: <roboticalugi.blogspot.com/p/arquitectura.html>

#### Híbridos

Los robots híbridos son los más complicados en definir porque tiene características de algunas de las diferentes clasificaciones de robots; pueden ser móviles, pueden tener brazos mecánicos así como los poliarticulados o hasta imitar la forma humana. También existe la posibilidad de ser una unión entre los 3, un cuerpo humano sobre un carro móvil y con un brazo semejante a los robots industriales. <sup>33</sup>

<sup>32</sup>JONES, T; LAWSON, S y MILLS, D. Interaction with a zoomorphic robot that exhibits canid mechanisms of behavior. En: IEEE international conference on robotics and automation ICRA. California. Mayo. 2008. p. 2128-2133. ISSN 1050-4729.

<sup>&</sup>lt;sup>33</sup> GONZÁLEZ, Victor; MARTÍNEZ, Patricio; LÓPEZ, Marcelo; HERNÁNDEZ, Octavio y Souza, José. Simulación de trayectorias de un robot manipulador paralelo delta híbrido. <u>En</u>: XVII Congreso Internacional anual de la SOMIM. México. Septiembre. 2011. p. 1043-1051. ISBN 978-607-95309-5-2.

Figura 4. Robot híbrido



Fuente. [Citado 24 de febrero de 2013]. Disponible en internet: <a href="http://iarobbota.blogspot.com/">http://iarobbota.blogspot.com/</a>

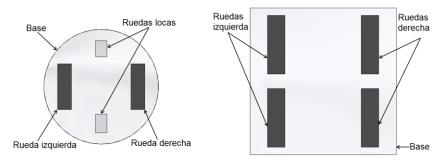
#### Móviles

Son robots que tienen una capacidad amplia de desplazamiento en un terreno desconocido, básicamente tienen formas de carros o plataformas con un sistema de locomoción rodante. Estos robos se caracterizan dependiendo de 4 subsistemas; locomoción (cadenas, ruedas, patas), percepción, razonamiento y comunicación. A continuación se presenta las clases de locomoción con ruedas que puede presentar un robot móvil. <sup>34</sup>

Los robots móviles tipo diferencial consisten básicamente en dos o más ruedas con ejes en común, cada una de estas está controlada de forma independiente. Son capaces de realizar movimientos en línea recta, en arco o en un giro sobre su propio eje.

<sup>34</sup> OROZCO, R; ARANDA, E y VALASCO, M. Modelado y control de un robot móvil para la tracción de n-remolques actuados. <u>En</u>: Información Tecnológica. 2003, vol. 14, p. 132. ISSN 0716-8756.

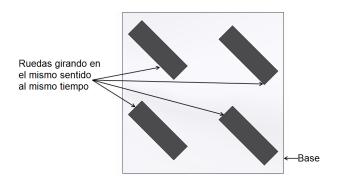
Figura 5. Robot diferencial



Fuente. Autores

Las ruedas de los robots móviles tipo síncrono se mueven de forma síncrona, esto quiere decir, al mismo tiempo, la similitud que tiene con el diferencial es la forma independiente de control de cada una de las ruedas, pero no pueden realizar un giro sobre su propio eje porque para cambiar la dirección todas sus ruedas tienen que girar simultáneamente alrededor de su eje vertical.

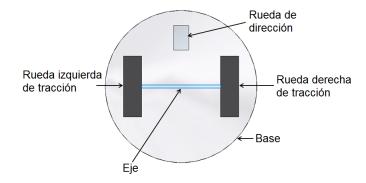
Figura 6. Robot síncrono



Fuente. Autores

Los robots de tipo triciclo tienen dos ruedas fijas unidas por un eje, las cuales le dan la tracción al robot, además tiene una rueda para darle dirección al movimiento. Mecánicamente es más simple y es bastante funcional para movimientos rectos.

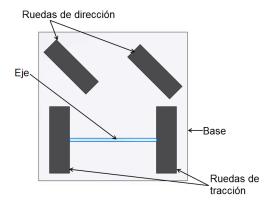
Figura 7. Robot tipo triciclo



Fuente. Autores

Los robots tipo carro son muy similares que el anterior, la diferencia es que como su nombre lo dice tiene la forma de carro, esto quiere decir, cuatro ruedas, dos de tracción y dos de dirección. Son más estables que el sistema en triciclo pero su complejidad mecánica y cinemática es mayor.

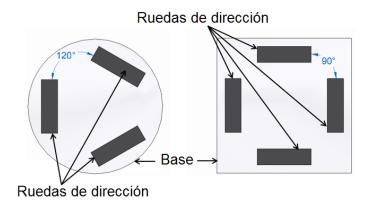
Figura 8. Robot tipo carro



Fuente. Autores

Los robots tipo omnidireccional cuentan con 3 o más ruedas, situadas cada una entre ellas a 120° en el caso de ser de tres ruedas y a 90° de cuatro. Cada una de estas ruedas puede girar hacia los dos lados.

Figura 9. Robot Omnidireccional



Fuente. Autores

# 2.2 LOCALIZACIÓN DE FUENTES SONORAS

#### 2.2.1 Fundamentos del sonido

#### 2.2.1.1 Sonido

Es un fenómeno que produce una vibración mecánica la cual se transmite por un medio elástico. También se puede definir como ondas sonoras que producen oscilaciones efectuando una sensación en el órgano del oído debido a los movimientos vibratorios de los cuerpos. O la realización oral de un fonema. <sup>35</sup> Cualquiera de estas 3 definiciones es correcta, pero en este caso vamos a tener en cuenta la primera y la segunda para el desarrollo de este proyecto.

Como todo fenómeno físico, el sonido tiene propiedades que determinan su comportamiento, una de ellas es la velocidad de propagación de la onda sonara, la cual se produce debido a la presión que se presenta en el medio y varía

<sup>&</sup>lt;sup>35</sup> Real Academia de la Lengua Española. [Citado 08 de septiembre de 2012]. Disponible en internet URL< http://lema.rae.es/drae/?val=Sonido >

dependiendo de la las propiedades físicas de este<sup>36</sup>, lo cual se puede confirmar en la tabla 1.

Tabla 1. Velocidad de propagación de una onda sonora dependiendo de medio. La temperatura es de 20° C, a menos que se indique lo contrario.

| Medio   | Velocidad (m/s)           |  |  |  |
|---|---------------------------|--|--|--|
| Aire  | 344                       |  |  |  |
| Dióxido de carbono (0°C)                              | 259                       |  |  |  |
| Hidrógeno $(H_2)$ (0°C)                               | 1284                      |  |  |  |
| Alcohol (etílico)                                     | 1207                      |  |  |  |
| Bencina   | 1295                      |  |  |  |
| Agua (pura)   | 1498                      |  |  |  |
| Aluminio  | 5000                      |  |  |  |
| Cobre   | 3750                      |  |  |  |
| Vidrio (Pyrex)  | 5170                      |  |  |  |
| Hierro  | 5120                      |  |  |  |
| Sangre (37°C)   | 1570                      |  |  |  |
| Tejido corporal (37°C) promedio                       | 1570                      |  |  |  |
| Fuente: KANE. Joseph y STERNHEIM. Me                  | orton. Física. Barcelona: |  |  |  |
| Reverte, 2da Ed, 2000, 492 p. ISBN 978-84-291-4318-8. |                           |  |  |  |

La velocidad del sonido tiene dos componentes básicos; la longitud de onda  $(\lambda)$  y la frecuencia (f). Siendo la longitud de onda definida como la distancia existente entre dos puntos consecutivos que poseen la misma fase y equivale a la distancia que avanza la onda en un periodo. Teniendo en cuenta lo anterior y que la velocidad se asume como constante, se obtiene la siguiente expresión.

$$\lambda = v * T \tag{1}$$

La frecuencia es el número de oscilaciones que realiza una onda por unidad de tiempo y además es inversamente proporcional al periodo, se deduce que la

<sup>&</sup>lt;sup>36</sup>KANE. Joseph y STERNHEIM. Morton. Física. Barcelona: Reverte, 2da Ed, 2000, 491 p. ISBN 978-84-291-4318-8.

ecuación anterior en función de la velocidad del sonido y reemplazando el periodo por la frecuencia queda de la siguiente manera. 37

$$v = f * \lambda \tag{2}$$

#### 2.2.1.2 Fuentes sonoras

Se define como fuente sonora, aquella que genera una perturbación y por ende una serie de cambios de presión en un medio (como el aire, el agua, o hasta un sólido). Dependiendo de su forma física, puede variar el área de cobertura y la intensidad de dicha perturbación. Usualmente, el comportamiento del sonido a frecuencias medias altas se compara con el de un haz de luz, en el sentido en que el sonido se propaga siguiendo la trayectoria de una línea recta. 38

Las fuentes sonoras pueden ser naturales o artificiales y existen diversas formas de clasificación de éstas. Por ejemplo, se clasifican según su origen; pueden existir fuentes debido a los conglomerados urbanos y medios de transporte (aviones, carreteras, trenes), debido a las actividades humanas (eventos, fiestas, reuniones), debido a actividades industriales (motores, maquinaria, construcción) o debido a motivos atmosféricos y naturales (lluvia, viento, truenos, animales, entre otros). O bien, por otro lado, se pueden clasificar por su área de propagación, y allí se encuentran las fuentes esféricas, cilíndricas y planas.

# 2.2.1.3 Receptores sonoros

Se consideran receptores sonoros aquellos sistemas capaces de percibir una perturbación acústica, y al igual que las fuentes, las hay de tipo natural y artificial. Entre los naturales, se encuentra el oído humano, mientras que los artificiales

<sup>&</sup>lt;sup>37</sup>lbíd., p. 493.

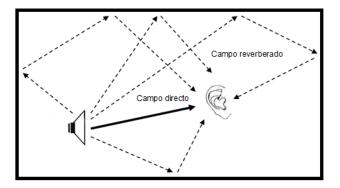
<sup>38</sup> KUTTRUFF.Heinrich. Room Acoustics. New York: Spon Press, 4 Ed, 2000, 24 p. ISBN 978-0-419-24580-4.

incluyen cualquier tipo de transductor de la perturbación acústica, como lo es un micrófono.

# 2.2.1.4 Campos sonoros

El análisis de una fuente sonora conlleva necesariamente un campo sonoro, que depende de la fuente misma y del medio. Para poder describir este medio, se requiere tanto las características físicas del material o fluido del que se compone, como de los obstáculos físicos que la propagación enfrenta. De allí que numerosos acústicos han propuesto diferentes tipos de campos, entre ellos: el campo libre y el campo reverberante.

Figura 10. Esquema de campo directo y reverberante



Fuente. Disponible en INSOROCK. [Citado 12 de diciembre de 2012]. Disponible en internet: <a href="http://www.insorock.es/acondicionamiento-acustico.html">http://www.insorock.es/acondicionamiento-acustico.html</a>

Campo libre, sonido directo, cámara anecoica

El fundamento principal del campo libre consiste en que la percepción del receptor sólo se ve afectada por el sonido que proviene directamente de la fuente, llamado sonido, o campo directo. Esto implica evitar tanto cualquier tipo de obstáculo entre la fuente y el receptor, como los cerramientos físicos alrededor de ambos

(paredes, o puertas). Esto debido a que estas barreras provocan reflexiones del "haz de sonido", que distorsionan y "ensucian" el sonido directo, en términos acústicos. Más adelante se verá por qué para una persona es más fácil identificar la dirección de proveniencia de un sonido, cuando ésta se encuentra en condiciones de campo libre, más no al estar en condiciones de campo reverberante. Además, las condiciones de campo libre son frecuentemente utilizadas para analizar todo tipo de parlantes o fuentes sonoras, para comprender el campo sonoro que éstas generan, aislando las posibles distorsiones por reflexiones y fuentes adicionales. <sup>39</sup>

De allí la importancia de simular las condiciones de campo libre, y esto se logra de forma artificial, ya que en la realidad difícilmente se darán estas condiciones por sí mismas. Si bien es relativamente fácil ubicar un espacio donde no haya obstáculos o paredes que generen reflexiones, es difícil evitar la interferencia de fuentes adicionales, como sonidos provocados por animales, o por el viento. Por esto, las cámaras anecoicas han funcionado como una gran herramienta a la hora de simular condiciones de campo libre.

El principio básico de una cámara anecoica consiste en crear un espacio completamente libre de reflexiones sonoras, es decir que cualquier sonido proyectado al interior de la sala es totalmente absorbido. En la página de MeyerSound® es explicado como "La cámara anecoica ideal es un recinto totalmente libre de reverberaciones acústicas. Cualquier sonido proyectado dentro del recinto, a cualquier frecuencia, es completamente absorbido."<sup>40</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>39</sup> GALLEGOS, Fabio y MONTALVO, Danilo. Diseño de una cámara anecoica y una cámara reverberante. Trabajo de grado Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería. 2008. 15 p.

<sup>&</sup>lt;sup>40</sup> MEYER, John. Nuestra cámara anecóica: agradecimientos por un cuarto muerto. [Citado 10 de diciembre de 2012]. Disponible en internet: <a href="http://www.meyersound.com/spanish/products/technology/chamber.htm">http://www.meyersound.com/spanish/products/technology/chamber.htm</a>

# • Campo reverberante o difuso, cámara reverberante

El caso contrario, en el que se requiere la interferencia del sonido producto de las reflexiones de una sala, es llamado campo reverberante, o campo difuso. En este, el principio acústico se invierte: se busca producir un campo sonoro homogéneo, en el que los niveles de la perturbación sonora, en todos los lugares del recinto, sean iguales. Esto se genera con la ayuda de las reflexiones que producen las paredes del recinto, y por eso se requiere la utilización de recintos cerrados; una ventana abierta produciría un "escape" de energía acústica que el campo reverberante pretende contener. <sup>41</sup>

Al igual que para generar condiciones de campo libre, se utilizan las cámaras anecoicas, para generar condiciones de campo reverberante o difuso, se emplean las cámaras reverberantes, cuyos niveles de absorción son muy bajos, ocasionando importantes reflexiones al interior de una sala, y así, una homogeneidad del campo sonoro, que no ocurre en el campo libre.

#### 2.2.1.5 Relación Señal Ruido (SNR, o relación S/N)

Al igual que en aplicaciones de electrónica, el indicador de relación señal-ruido permite mostrar la diferencia en amplitudes de una señal respecto al ruido de fondo. En el caso electrónico se indica en unidades de voltaje, mientras que en acústica, se habla de decibeles (dB).

En este caso, la "señal" representa el sonido, es decir, las variaciones de presión del medio. Como la presión del aire está dada en Pascales (Pa), se buscó una unidad que representara la magnitud [no lineal] del sonido, y fue gracias al

-

<sup>&</sup>lt;sup>41</sup> GALLEGOS. Op, Cit., p. 19.

científico Alexander Graham Bell, que se estandarizó la unidad de decibelio para indicar el Nivel de Presión Sonora (SPL por sus siglas en inglés). 42

Por otro lado, el "ruido" se compone del sonido que se percibe en el medio, ya sea en el recinto, o en el campo libre, sin que se esté generando la perturbación principal. Se le llama también ruido de fondo y se mide como el nivel de presión sonora (en dB) que se percibe en un recinto cuando se busca el menor nivel posible, es decir que cualquier tipo de fuente se encuentra apagada.<sup>43</sup>

La relación señal-ruido (relación S/N) es entonces la resta directa entre estos valores; está igualmente dada en decibelios, y en otras palabras representa qué tanto se "resalta" un nivel de sonido dentro de un entorno. Algunas normas y regulaciones legales especifican un rango de niveles de relación S/N que se requieren para hacer diferentes tipos de medición. Por ejemplo, para medir el tiempo de reverberación de una sala, según la norma ISO 3382, debe haber una relación S/N entre 35 dB y 45 dB, es decir que si el ruido de fondo medido en la sala es de 50 dB, la señal de prueba que se utiliza debe superar los 85 dB. Esto se plantea con el objetivo de garantizar que la señal principal que se analiza no se vea afectada considerablemente por el ruido de fondo que produce la sala o el medio ambiente. 44

\_

<sup>44</sup>BOLTON. Op, Cit., p. 50.

<sup>&</sup>lt;sup>42</sup> CHINCHILLA. Ryan. Salud y seguridad en el trabajo. San José, Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia, 1ra Ed, 2002, 111 p. ISBN 978-9968-31-257-8.

<sup>&</sup>lt;sup>43</sup>BOLTON. W. Electrical and electronic measurement and testing. London: Longman Group UK Ltd, 1ra Ed, 1995, 46 p. ISBN 84-267-1032-8.

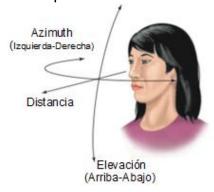
# 2.2.2 Psicoacústica y percepción

### 2.2.2.1 El oído: audición biaural, localización sonora

Como la mayoría de las personas lo experimentan a diario, el sistema auditivo humano posee la habilidad de percibir la localización sonora, es decir, de determinar la posición espacial de una fuente sonora. Esto se da gracias a la audición biaural que proporciona un par de oídos, y al hecho que cada uno de estos reciba mensajes diferentes.

Como se puede observar en la figura 11, existen 3 direcciones usadas para estudiar la localización del sonido: localización en el plano horizontal o azimut, que utiliza las técnicas de ITD e IID, localización en el plano vertical o elevación y la distancia.

Figura 11. Direcciones utilizadas para el estudio de la localización del sonido



Fuente. GOLDSTEIN. Op, Cit., p. 292.

# Diferencias interaurales de Tiempo (ITD)

Por un lado, al estar distanciados entre ellos, los oídos reciben las estimulaciones acústicas en diferentes instantes de tiempo. Dependiendo de la ubicación de la fuente sonora, un oído estará más cercano a la fuente, y por ende será el primero en recibir el estímulo, y unos instantes después, el otro oído, un poco más alejado,

recibirá dicho estímulo. A través de un procesamiento mínimo, el cerebro humano puede evaluar, por la duración de dichas diferencias ITD, en qué lugar se encuentra la fuente dentro del eje azimut (izquierda-derecha). <sup>45</sup>

Figura 12. Principio del ITD



Fuente. GOLDSTEIN. Op, Cit., p. 294.

En la figura 12 se muestra el principio del ITD. Los receptores sonoros (en este caso los oídos) detectan al mismo tiempo la fuente sonora del punto A, ya que se encuentra equidistante de los dos receptores, pero en caso de la fuente sonora del punto B, se puede observar que al receptor sonoro de la derecha le llega el sonido más rápido que al de la izquierda, debido a la distancia que este tiene con la fuente.

## Diferencias interaurales de Intensidad (IID)

Por otro lado, al haber un obstáculo entre los oídos, la intensidad con la que llega el sonido hasta cada uno de ellos es diferente. El oído que se encuentra más cercano a la fuente percibirá un sonido más fuerte, mientras que el otro oído se encontrará "cubierto" por la cabeza, y ésta genera un pequeño campo llamado una sombra acústica, o efecto de sombra de la cabeza, que provoca una ligera atenuación en el nivel del sonido (ver figura 13). La cabeza humana juega entonces el papel de barrera acústica, generando estas ligeras diferencias

45

<sup>&</sup>lt;sup>45</sup>GOLDSTEIN. Op, Cit., p. 293.

interaurales de intensidad, IID, que al igual que la anterior, son procesadas por el cerebro para ubicar la dirección de proveniencia de un sonido en el eje azimuth. 46

La única deficiencia que se presenta en las diferencias interaurales de intensidad tiene que ver con el rango de frecuencias en que esto funciona efectivamente. Para que se produzca una sombra acústica debido a la cabeza, la longitud de onda de la frecuencia afectada debe ser una distancia comparable con la de la distancia entre los oídos. Es decir, que si la distancia entre los oídos de una persona promedio es de 17 cm, ésta será una barrera para las frecuencias cuya longitud de onda sea de 17 cm, y superiores. De acuerdo con la ecuación (2) de la velocidad de sonido, 47 se tiene que:

$$\lambda = \frac{v}{f} \tag{3}$$

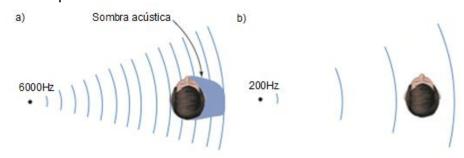
y despejando la frecuencia, se obtiene:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{340 \text{ m/s}}{0.17 \text{ m}} = 2kHz$$

Esto quiere decir que las diferencias interaurales de intensidad (IID) es una técnica efectiva para que un humano diferencie la procedencia de un sonido de frecuencia superior a los 2kHz.

 <sup>46</sup> Ibíd., p. 294.
 47 ARAU.Higini. ABC de la acústica arquitectónica. Barcelona: Grupo Editorial CEAC S.A., 1ra Ed, 1999, 11 p. ISBN 84-329-2017-7.

Figura 13. Principio del IID



Fuente. Fuente. GOLDSTEIN. Op, Cit., p. 294.

# Localización en el plano vertical

A diferencia de la localización en el plano horizontal, ésta no depende de la separación de los oídos, sino de la forma de las orejas como tal. También llamados pabellones auriculares, éstos ocasionan reflexiones a las perturbaciones sonoras que se acercan al oído. Esto alarga los recorridos en distancia que deben alcanzar las ondas sonoras antes de llegar al oído interno.<sup>48</sup>

## 2.2.3 Audio (representación eléctrica del sonido)

Con el avance de la ciencia y el uso de dispositivos electrónicos, se ha diferenciado el concepto de "audio" con el de "sonido". La idea de emplear el término "audio" pretende hacer explícita la existencia de una representación eléctrica del sonido. Esto implica que una señal sonora, es decir un sonido que cualquier humano puede percibir, podrá tener su respectiva señal de audio, después de haber pasado por un proceso de transducción, o conversión de tipos de energía.

Estos transductores serán entonces importantes a la hora de caracterizar dicha señal de audio, pues sus diferentes parámetros afectarán de una u otra forma la representación eléctrica que entregará.

<sup>&</sup>lt;sup>48</sup>GOLDSTEIN. Op, Cit., p. 295.

#### 2.2.3.1 Sistemas electroacústicos: transductores

#### Micrófonos

En audio se conoce a los micrófonos como uno de los dos principales transductores, junto con los altavoces. El principio de funcionamiento de ambos consiste exactamente en las mismas etapas, pero el sentido de transducción varía; los micrófonos captan la presión sonora en el medio (energía acústica) para convertirla en una señal de audio (energía o potencial eléctrico), mientras que los altavoces pretenden convertir esta señal de audio en una perturbación audible en el medio.<sup>49</sup>

Existen actualmente diversos tipos de micrófonos, clasificados tanto por su construcción como por sus aplicaciones y uso. Los micrófonos electrostáticos son uno ellos, los cuales están construidos a partir de un condensador, es decir, de un par de placas (usualmente en forma circular) que reciben un potencial eléctrico y generan entre ellas un campo magnético. Una de las placas es fija (a veces tiene unos agujeros y es construida en oro), y la segunda es móvil, pues lleva montado sobre ella el diafragma del micrófono. Al percibir una variación de presión en el medio, este diafragma se desplazará, haciendo que la placa móvil se acerque y se aleje de la placa fija, lo cual causará variaciones del campo magnético, y por lo tanto generará la corriente que se "extrae" del micrófono. En este punto, ya se tiene una señal de audio, usualmente con niveles muy bajos de voltaje: entre 2 y 10mV.<sup>50</sup>

Los micrófonos de condensador convencionales requieren de un voltaje de polarización para generar el campo magnético de base. Esta fuente de voltaje es llamada "Phantom Power" y proporciona 48Vdc al condensador, con flujos de corriente muy pequeños (entre los 50 y los 200mA).

<sup>&</sup>lt;sup>49</sup>BERANEK. Leo L. Acoustics. Massachusetts: Acoustical Society of America, 1ra Ed, 1993, 144 p. ISBN 0-88318-494-X.

<sup>&</sup>lt;sup>50</sup> SAPOSHKOV. M. Electroacústica. Barcelona: Reverté, 2011, 102 p. ISBN 978-84-291-4350-8.

Existen también los micrófonos llamados Electret, cuyo principio de funcionamiento es el mismo que el de los micrófonos de condensador convencional, pero con la diferencia que no requieren este voltaje tan elevado de polarización, sino que son polarizados al momento de su fabricación y emplean cierto tipo de material que conserva esta polarización, como algunos plásticos. Esto disminuye los precios de fabricación y además de disminuir la sensibilidad del diafragma a la humedad.

Figura 14. Tipos de micrófonos electrostáticos





a) Micrófono de condensador convencional

b) Micrófono electret

Fuente. [Citado 12 de diciembre de 2012]. Disponible en internet: <a href="https://www.akg.com/site/products/powerslave,id,1058,pid,1058,nodeid,2,\_language,EN,country,ENUS.html">www.akg.com/site/products/powerslave,id,1058,pid,1058,nodeid,2,\_language,EN,country,ENUS.html</a>

Por el contrario los micrófonos electrodinámicos de bobina móvil y de cinta no necesitan de una fuente de alimentación porque su principio de funcionamiento es generar un campo magnético; la bobina móvil se introduce en el campo magnético radial y gracias a la presión acústica, atraviesa las líneas de fuerza del campo magnético, y la cinta bajo la diferencia de presiones acústicas oscila en el campo magnético cuyas líneas de fuerzas son paralelas, pero estos dos tipos de micrófonos tiene una desventaja ante los de condensador, que la mejor respuesta en frecuencia, por ende la calidad del sonido no es mejor que el de los demás micrófonos. Posiblemente los micrófonos más comerciales y más fáciles de encontrar en el mercado son los electrodinámicos de bobina móvil. <sup>51</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>51</sup> JACKSON. Menaldy y A. Maria Cristina. La voz normal. Massachusetts: Médica Panamericana, 1ra Ed, 1992, 88-90 p. ISBN 978-950-06-1108-4.

Figura 15. Micrófono Shure SM58. Micrófono electrodinámico de bobina móvil



Otro tipo de micrófonos son los piezoeléctricos que parten de las propiedades intrínsecas de algunos materiales para generar un potencial eléctrico al deformarse, o viceversa. Los materiales más utilizados en micrófonos son el cuarzo y el carbón. Estos son ubicados al interior del diafragma, y por ende, cuando este sea perturbado por las ondas sonoras, modificará la forma del material contenido, y se generará un potencial eléctrico. <sup>52</sup>

Este tipo de micrófonos es comúnmente utilizado en guitarras eléctricas, o en telefonía, pero nada que requiera excelente calidad del sonido pues generan bastante ruido.

#### Arreglo de micrófonos

Como se explicó...en la sección 2.2.2.1...para la localización de una fuente sonora, los humanos, y la mayoría de los animales, utilizan dos receptores, es decir, dos oídos. Investigaciones de la ISTU (Information Science and Technology University) de Berlín<sup>53</sup>,<sup>54</sup> de la SAP Research Karlsruhe, Alemania<sup>55</sup> y la Hebei

<sup>&</sup>lt;sup>52</sup> MERINO DE LA FUENTE. Jesús Mariano. Las vibraciones de la música. San Vicente, España: Club Universitario, 1ra Ed, 2007, 323 p. ISBN 978-8454-536-1.

<sup>&</sup>lt;sup>53</sup> LV, Xiaoling y ZHANG, Minglu. Sound source localization based on robot hearing and vision. <u>En:</u> 2008 International Conference on Computer Science and Information Technology. Singapore. 2008. p. 942-946. ISBN 978-0-7695-3308-7.

University of Technology, Tianjin, China, <sup>56</sup> han demostrado la tendencia a utilizar micrófonos (y arreglos de los mismos) como simulación de los receptores. Además, han hecho comparaciones de los comportamientos de los diferentes arreglos, tanto en su sensibilidad de directividad, <sup>57</sup> como en su respuesta en frecuencia <sup>58</sup>; intentando demostrar que la cantidad de micrófonos puede estar directamente relacionada con la precisión del ángulo a calcular. La base teórica para la localización de fuentes sonoras, es la geometría; y es por esto mismo que los arreglos de micrófonos son tan importante en dichos análisis. El tiempo que tarda una señal en llegar desde la fuente hasta la cápsula de cada micrófono está relacionado con una distancia específica y es proporcional a la velocidad del sonido. Ésta será una variable conocida de la configuración geométrica, y junto con las otras distancias se podrá determinar el ángulo de origen de la señal.

Existen diferentes topologías de arreglos de micrófonos, clasificadas ya sea por las distancias de separación entre cápsulas o por la forma geométrica que la conforman. Además se podrían clasificar por la cantidad de micrófonos que contiene el arreglo, para facilitar el análisis se considera que todo arreglo se compone de una o varias parejas de micrófonos.

Entre la clasificación por distancia entre cápsulas, se encuentra el caso de una separación entre micrófonos considerable conocida como par espaciado.<sup>59</sup>

<sup>54</sup>FAN, Jing; LUO, Qian y MA, Ding.Localization estimation of sound source by microphones array. <u>En</u>: 2010 Symposium on Security Detection and Information Processing. 2010 p. 312-317. ISSN: 1877-7058.

<sup>&</sup>lt;sup>55</sup> MARKOVIC, Ivan y PETROVIC, Ivan. Speaker localization and tracking with a microphone array on a mobile robot using Von Mises distribution and particle filtering. En: Journal of Robotics and Autonomous Systems. 2010, Vol 58. p. 1185-1196. ISSN: 0921-8890.

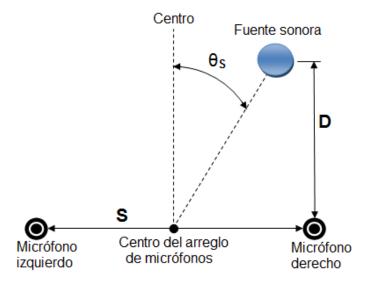
<sup>&</sup>lt;sup>56</sup> SUN, Hao; YANG, Peng; ZU, Linan y XuQinqi. An auditory system of robot for sound source localization based on microphone array. <u>En</u>: IEEE Inter. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2010. p. 629-632. ISBN 978-1-4244-9319-7.

<sup>57</sup>FAN, Op. Cit.

<sup>&</sup>lt;sup>58</sup> BERNSCHUTZ, Benjamin. Bandwidth extension for microphone arrays. <u>En</u>: Audio Engineering Society Convention. 2012.

<sup>&</sup>lt;sup>59</sup> BARTLETT, Bruce. Stereo microphone techniques. Boston, Massachusetts: Focal Press, 1ra Ed, 1991, 44 p. ISBN 0240800761.

Figura 16. Configuración del par espaciado.



Fuente. Ibid., p. 46.

Para medir la diferencia del tiempo de llegada entre las dos cápsulas, para un par espaciado se requiere la siguiente ecuación. Siendo  $\Delta T$  la diferencia de tiempos de llegada entre los dos micrófonos, en segundos y C la velocidad de propagación del sonido.  $^{60}$ 

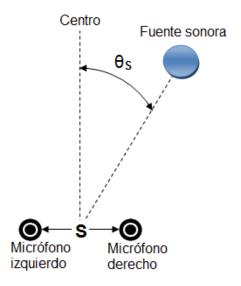
$$T = \frac{\sqrt{D^2 + [(S/2) + D \cdot \tan \theta_S]^2} - \sqrt{D^2 + [(S/2) - D \cdot \tan \theta_S]^2}}{C}$$

Por otro lado, está el caso en que las cápsulas se encuentran separadas entre 5 cm a 30 cm.

52

<sup>&</sup>lt;sup>60</sup>lbid., p. 45.

Figura 17. Configuración de par casi coincidente



Fuente. Ibid., p. 46.

Para hallar la diferencia de tiempos entre los dos micrófonos para un par casi coincidente, se requiere de la siguiente ecuación. <sup>61</sup>

$$\Delta T = \frac{S. \sin \theta_S}{C}$$

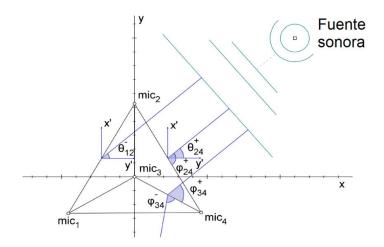
En el caso de los arreglos de micrófonos clasificados por la forma geométrica, el análisis del ángulo de origen de la fuente sonora, se realiza mediante una división de "áreas", con las cuales se hace una primera evaluación de localización para determinar en cuál de dichas áreas está la fuente. Esto se logra determinando cuáles son los dos micrófonos que perciben el sonido primero, respecto a los demás, y así, se delimita un rango de ángulos entre los cuales puede provenir el sonido. Después de conocer el área en la cual se encuentra el ángulo de proveniencia de la señal, se procede a calcular el ángulo preciso con la ayuda de las ecuaciones presentadas para cada caso.

-

<sup>&</sup>lt;sup>61</sup>Ibid. p. 45.

Una de las formas geométricas probablemente más utilizadas es el triángulo equilátero, <sup>62</sup> en la cual hay micrófonos en cada esquina del triángulo, y uno adicional en el centro del mismo.

Figura 18. Geometría en forma de triángulo equilátero



Fuente. MARKOVIC, Op. Cit., p. 1188.

La ecuación con la que se determina el cálculo del ángulo de origen del sonido para esta configuración está dada por:

$$\varphi_{ij} = \pm arc \cos \left( \frac{C \cdot \Delta T_{ij}}{a_{ij}} \right)$$

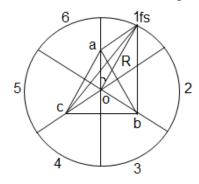
Donde  $\varphi_{ij}$  es la dirección de llegada del sonido,  $\Delta T_{ij}$  es la diferencia de tiempos de llegada y  $a_{ij}$  es la distancia entre los micrófonos.

En este caso, la cantidad de áreas en la cuales se puede dividir el plano, es de seis áreas.

54

<sup>&</sup>lt;sup>62</sup> CELIS, Op. Cit.

Figura 19. Áreas de la geometría en forma de triángulo equilátero



Fuente. FAN, Op. Cit., p. 313.

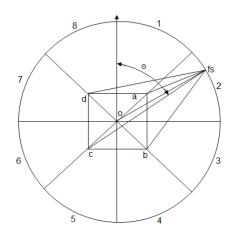
Al dividir en áreas se obtiene una clasificación según las diferencias de tiempo entre los micrófonos. Esto se puede observar en la tabla 2, donde D1 es la diferencia entre la distancia de la fuente sonora y el micrófono b (fsb) y la distancia de la fuente sonora y el micrófono a (fsa), y D2 es la diferencia entre la distancia de la fuente sonora y el micrófono c (fsc) y (fsa).

Tabla 2. Clasificación en áreas de la geometría en forma de triángulo equilátero

| Sección                | Θ           | D1 | D2 | Propiedad |  |
|------------------------|-------------|----|----|-----------|--|
| 1                      | 0°- 60°     | +  | +  | D1  <  D2 |  |
| 2                      | 60° - 120°  | -  | +  | D1  <  D2 |  |
| 3                      | 120° - 180° | -  | -  | D1  <  D2 |  |
| 4                      | 180° - 240° | -  | -  | D1  >  D2 |  |
| 5                      | 240° - 300° | +  | -  | D1  >  D2 |  |
| 6                      | 300° - 360° | +  | +  | D1  >  D2 |  |
| Fuente. Ibid., p. 314. |             |    |    |           |  |

En la segunda configuración se ubican los micrófonos en las cuatro esquinas de un cuadrilátero. La diferencia que presenta esta configuración, son las ocho áreas en las que se puede dividir el plano, lo cual puede llegar a brindar una mayor precisión en la localización.

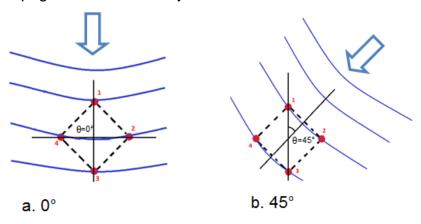
Figura 20. Áreas de la geometría del cuadrilátero



Fuente. Ibid., p. 314.

Quizás la forma más sencilla de comprender el arreglo de micrófonos según la geometría en forma de cuadrilátero es, analizando los puntos donde las diferencias son importantes. Esto implica partir de la división estándar de cuadrantes: 0° a 90°, de 90° a 180°, de 180° a 270° y de 270° a 360°. Se analiza el primer cuadrante, ya que el sistema se repetirá para los demás; y a su vez, este es dividido en dos áreas: de 0° a 45° y de 45° a 90°. La propagación sonora de la primera área se muestra en la figura 21.

Figura 21. Propagación sonora a 0° y 45°



Fuente. Autores

La diferencia de tiempo de llegada de la señal a los micrófonos se puede hallar despejando el tiempo (T) de la ecuación (1), teniendo en cuenta la velocidad del sonido en el aire de la tabla 1 y la longitud de onda  $(\lambda)$ , como la distancia existente en metros de los dos micrófonos que reciben primero la señal. Con ese tiempo se determina la cantidad de muestras de retardo  $(\Delta Mx)$  entre un micrófono y el otro con la siguiente ecuación.

$$\Delta M x = \frac{T}{\frac{1}{f}}$$

Se ve claramente en la figura anterior parte a, el orden de llegada de la señal a los micrófonos: primero, al micrófono 1, segundo, a los micrófonos 2 y 4 y por último, al micrófono 3. Al conocer las distancias entre los micrófonos, se obtiene la diferencia de tiempos de llegada, entre el micrófono 1 con respecto al 2 y 4, y la diferencia entre estos, con respecto al micrófono 3.

El orden de arribo de la señal, en la geometría de la sección b cambia: primero llega a los micrófonos 1 y 2, luego al 3 y 4. De igual forma se puede hallar la diferencia de tiempo de llegada de los micrófonos 1 y 2 con respecto al 3 y 4, sabiendo las distancias entre estos.

Esto quiere decir que entre 0° y 45°, hay una variación de la diferencia de tiempo de llegada del micrófono 2 respecto al 1. Cuando la fuente sonora está a 0° grados la diferencia de tiempo de llegada es máxima, pero si la fuente está a 45°, esta diferencia es nula. Este mismo sistema funciona para todos los ángulos de incidencia.

Los cuatro cuadrantes quedan divididos en un total de 8 casos, descritos de la siguiente forma. Donde t1,t2,t3 y t4, son los tiempos de arribo de la señal a los micrófonos 1, 2, 3, y 4 correspondientes y  $n_m$ es la cantidad de muestras entre el micrófono al que le llego la señal primero y el siguiente.

Tabla 3. Clasificación en áreas de la geometría en forma de cuadrilátero

| Sección    | Intervalo<br>de ángulos | Relación de tiempos<br>de llegada | Ecuación  | $\Delta Mx$ |
|------------|-------------------------|-----------------------------------|---|-------------|
| 1          | 0°- 45°                 | t1 < t2                           | $\theta = 45 - (\frac{45}{n_m}) \cdot \Delta Mx$        | t2 - t1     |
| 2          | 45° - 90°               | t1 > t2                           | $\theta = 45 + (\frac{45}{n_m}) \cdot \Delta Mx$        | t2 - t1     |
| 3          | 90° - 135°              | t2 > t3                           | $\theta = 135 - \frac{(45/n_m)}{n_m} \cdot \Delta Mx$   | t3 - t2     |
| 4          | 135° - 180°             | t2 < t3                           | $\theta = 135 + \frac{(45/n_m)}{n_m} \cdot \Delta Mx$   | t3 - t2     |
| 5          | 180° - 225°             | t3 > t4                           | $\theta = 225 - \frac{(45/n_{max}) \cdot \Delta Mx}{1}$ | t4 - t3     |
| 6          | 225° - 270°             | <i>t</i> 3 < <i>t</i> 4           | $\theta = 225 + \frac{(45/n_{max}) \cdot \Delta Mx}{1}$ | t4 - t3     |
| 7          | 270° - 315°             | t4 > t1                           | $\theta = 315 - \frac{(45/n_m)}{n_m} \cdot \Delta Mx$   | t1 - t4     |
| 8          | 315° - 360°             | t4 < t1                           | $\theta = 315 + \frac{(45/n_m) \cdot \Delta Mx}{n_m}$   | t1 - t4     |
| Fuente. It | oid., p. 315.           |                                   |   |             |

## Cálculo del tiempo de llegada

Existen varias formas para realizar este cálculo, las más utilizadas son: la correlación cruzada, la convolución y la diferenciación de cruces por cero.

La correlación cruzada es el método más popular y sirve para encontrar las características de una señal que no es conocida, mediante la comparación de otra señal que si se conoce. Este método es similar a la convolución de dos funciones: se tienen dos señales discretas x(i) y y(i), donde i=0,1,2...N-1, entonces la correlación cruzada r en el retardo d=0,1,2...N-1, está definida por:<sup>63</sup>

$$r(d) = \frac{\sum_{i} [(x(i) - mx) \cdot (y(i - d) - my)]}{\sqrt{\sum_{i} (x(i) - mx)^{2}} \cdot \sqrt{\sum_{i} (y(i - d) - my)^{2}}}$$
(4)

Siendo mx y my los promedios de las señales, y el retardo de la señal el argumento máximo de la correlación cruzada.

$$\Delta Mx = argmax (r(d)) \tag{5}$$

<sup>&</sup>lt;sup>63</sup>BOURKE, Paul. [Citado 01 de mayo de 2013]. Disponible en internet: <a href="http://paulbourke.net/miscellaneous/correlate/">http://paulbourke.net/miscellaneous/correlate/</a>>

La diferenciación de cruces por cero, es un método que consiste en derivar la señal para observar donde está el punto máximo de ésta, sabiendo cuál es el cruce por cero de la señal derivada, de esta forma y comparando con otras señales, se puede determinar la diferencia de tiempos de llegada. Este método funciona correctamente, cuando todos los micrófonos están dentro de media longitud de onda de la señal.<sup>64</sup>

# Factor e índice de directividad de los micrófonos: patrón polar.

Según sus propiedades y su construcción, todo micrófono se puede caracterizar por su directividad. Esta representa la relación entre la energía acústica que percibe un micrófono en una dirección, con respecto a la energía que percibiría un micrófono isotrópico, también llamado omnidireccional, éste tipo de micrófonos percibe, en teoría, la misma cantidad de energía acústica en todas las direcciones de incidencia. Para hacer más comprensible y mensurable la directividad de un micrófono, se emplean los diagramas o patrones polares, que muestran de manera gráfica, esta relación de energías 65. También se utiliza el factor de directividad (D unidad adimensional) en la dirección  $(\theta, \varphi)$ , dado por la relación de intensidades acústicas, por medio de la siguiente expresión:

$$D(\theta, \varphi) = \frac{I(\theta, \varphi)}{I_{ISO}}$$

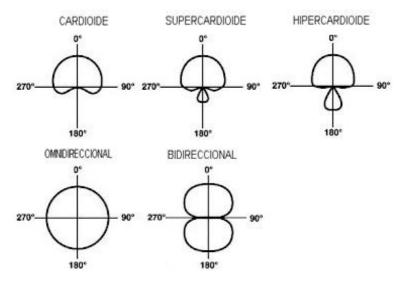
Y finalmente, el índice de directividad (DI), expresado en decibeles, indica una medida logarítmica de dicha relación:

$$DI(\theta, \varphi) = 10 \log D(\theta, \varphi) = 10 \log \frac{I(\theta, \varphi)}{I_{ISO}}$$

<sup>64</sup>CELIS. Op, Cit., p. 38.

<sup>&</sup>lt;sup>65</sup>HAUSMAN.Carl; BENOIT. Philip y ODONNELL. Lewis. Modern Radio Production.Wadsworth, 5ta Ed, 2000, 105-110 p. ISBN 0-534-56106-3.

Figura 22. Patrones polares comunes e ideales en micrófonos



Fuente. [Citado 12 de diciembre de 2012]. Disponible en internet: <a href="http://produccionmusic.blogspot.com/">http://produccionmusic.blogspot.com/</a>

## • Respuesta en frecuencia de los micrófonos

Como cualquier sistema, los micrófonos presentan una determinada y limitada respuesta en frecuencia. El rango audible por el ser humano es relativamente reducido y se ubica entre 20Hz y 20kHz. Es por esto que no es tan común construir micrófonos que respondan por fuera de dicho rango en aplicaciones de audio; aunque no significa que no existan. Sin embargo, es importante resaltar la importancia de caracterizar un micrófono por su respuesta en frecuencia, en cuanto al realce que éste realice en el sonido para ciertas frecuencias.

Es posible construir micrófonos con respuesta en frecuencia plana, y de hecho estos son utilizados para medición de parámetros acústicos de salas o fuentes, entre otros, pues transmite la perturbación acústica sin realzar ninguna componente en frecuencia. Pero este mismo micrófono no se empleará comúnmente para grabar las voces de una canción, pues en este tipo de aplicaciones, se busca darle una cierta "coloración" a la voz, es decir de modificar

sus componentes en frecuencia. De allí el interés de buscar micrófonos que generen sonidos más agradables; esto evidentemente desde un punto de vista subjetivo, para aplicaciones más creativas. En cuanto a las aplicaciones de investigación de fenómenos acústicos, un micrófono cuya respuesta en frecuencia sea plana, otorgará una representación eléctrica más fiel, y por ende más exacta. 66

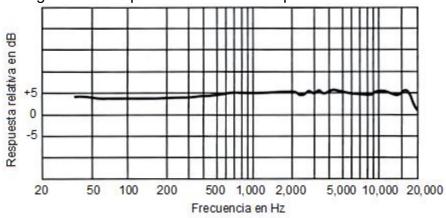


Figura 23. Diagrama de respuesta en frecuencia plana.

Fuente. Disponible en Shure Incorporated. [Citado 12 de diciembre de 2012]. Disponible en internet:<a href="http://www.shure.co.uk/support\_download/educational\_content/microphones-basics/microphones\_frequency\_response">http://www.shure.co.uk/support\_download/educational\_content/microphones-basics/microphones\_frequency\_response></a>

Al igual que en dispositivos electrónicos, la sensibilidad de un micrófono es un parámetro que permite determinar la magnitud de señal eléctrica que genera dicho dispositivo respecto a la magnitud de energía acústica con la cual fue perturbado. Para caracterizar cuán sensible es un micrófono, se estandarizó que se debe medir el voltaje AC que genera el dispositivo al ser perturbado con una fuente que irradia un tono puro de 1kHz, a 1 watt de potencia, ubicada a 1 metro de distancia de la cápsula, sobre el eje de incidencia.

61

<sup>&</sup>lt;sup>66</sup> BARTÍ. Robert. Acústica medioambiental. San Vicente, España: Club Universitario, 1ra Ed, 2010, 113-114 p. ISBN 978-84-9948-020-6.

#### 2.2.4 Filtros

Un filtro es un sistema que procesa y cambia selectivamente las características de la frecuencia (amplitud-frecuencia o fase-frecuencia) o la forma de la onda de la señal de entrada de acuerdo a ciertas especificaciones, cumpliendo con el objetivo de mejorar la calidad de la señal, removiendo o atenuando el ruido o frecuencias que no son necesarias para el procesamiento de la señal.

# 2.2.4.1 Filtros análogos

Estos filtros se utilizan para modificar las características de frecuencia de una señal análoga que pasa a través de ellos. Se dividen en filtros activos y filtros pasivos, esto depende de los elementos electrónicos que se utilicen para su fabricación. Los filtros activos cuentan con amplificadores operacionales, resistencias y condensadores, los pasivos solo utilizan los elementos electrónicos pasivos como: las resistencias, los condensadores e inductores. Para aplicaciones en las que se necesite manejar niveles de potencia considerablemente altos o trabajar a frecuencias muy altas, es mejor utilizar los filtros análogos, ya que para los digitales eso puede llegar hacer imposible. 67

#### Filtro Antialiasing

Es un filtro análogo pasa bajas, con el objetivo de limpiar la señal antes de hacer un conversión análogo-digital, esto quiere decir que elimina todas las frecuencia superiores a la mitad de la frecuencia de muestreo (fe/2, siendo fe la frecuencia de muestreo), antes de realizar ese paso.<sup>68</sup>

\_

<sup>&</sup>lt;sup>67</sup> BERTRAN. Eduard. Procesado digital de señales II. Barcelona: Ediciones UPC, 1ra Ed, 2005, 467 p. ISBN 978-84-8301-851-4.

<sup>&</sup>lt;sup>68</sup> PÉREZ. Constantino; SÁINZ DE LA MAZA. José y CASANUEVA. Alicia. Sistemas de telecomunicación. Santander, España: Ediciones UdC, 1ra Ed, 2007, 239-240 p. ISBN 978-84-8102-454-8.

### 2.2.4.2 Filtros digitales

Un filtro digital es un algoritmo matemático implementado en un hardware y/o software generalmente mediante el uso de la transformada rápida de Fourier, que opera sobre una señal de entrada, generando una señal de salida. Se le da el nombre de filtro digital no necesariamente porque la señal a filtrar sea digital, sino por si funcionamiento interno, esto quiere decir que los filtros digitales también trabajan sobre valores numéricos asociados a muestras de las señales analógicas previamente digitalizadas por conversores A/D. <sup>69</sup>

Debido a la tecnología que los filtros digitales presentan, las ventajas en comparación con los filtros análogos son bastantes. Algunas de estas ventajas son su poca sensibilidad a las condiciones ambientales, como la temperatura y la humedad; su bajo costo para los filtros de orden elevado, el tamaño y la portabilidad es mejor debido a su tecnología VLSI, la facilidad para realizar diferentes tipos de filtrado sin tener que modificar el hardware, la capacidad de trabajar con señales con frecuencia muy bajas, la precisión para verificar las especificaciones de diseño solo se limita a la palabra bits. Pero aparte de las ventajas tecnológicas, con el filtrado digital se puede conseguir una respuesta de fase exactamente lineal, cosa que es imposible que se consiga con un filtro análogo, además las señales filtradas y sin filtrar se pueden almacenar para el uso o análisis posterior. <sup>70</sup>

#### Filtros FIR

En el filtro de respuesta al impulso finita (FIR), si la entrada es una señal de impulso, la respuesta es un número finito de número no nulos, mediante una muestra de valores de la entrada actual y las anteriores. Los filtros FIR ofrecen en

<sup>&</sup>lt;sup>69</sup> ÁLVAREZ, Jesús; LINDIG, Klauss y MARTÍNEZ, Gustavo. Implementación de filtros digitales tipo FIR en FPGA. <u>En</u>: POLIBIT: Research journal on computer science and computer engineering with applicatios. Vol. 37. Enero-junio. 2008. p. 83-87. ISBN 0-7803-7860-1.

<sup>70</sup> BERTRAN, Op. Cit., p. 468.

general una respuesta de fase estrictamente lineal y no entran jamás en oscilación, porque no tienen la necesidad de retroalimentación, parámetro importante para aplicaciones como transmisión de datos, audio digital y procesamiento de imágenes. Por otro lado, estos filtros necesitan un mayor número de coeficientes, y en consecuencia requieren más memoria, tiempo de procesamiento, y cantidad de operaciones.<sup>71</sup>

#### Filtro IIR

En el filtro de respuesta al impulso infinita (IIR), si la entrada es una señal de impulso, la respuesta es un número infinito de números no nulos, mediante una muestra de valores de entrada actual y anterior, y además de valores anteriores de salida que son previamente almacenados en una memoria y realimentados a la entrada. Los filtros IIR, son muy eficaces y tienen una ventaja grande, la capacidad de conseguir la misma respuesta que un FIR pero con un número de coeficientes mucho menor, requiriendo menor tiempo de procesamiento. Por otro lado, al poseer características de realimentación, puede a entrar en oscilación y en resonancia.<sup>72</sup>

#### Orden de los filtros

El orden de un filtro describe el corte del mismo, esto quiere decir, que tanto acepta o rechaza las frecuencias tanto por arriba como por abajo. Mientras mayor sea este mayor es la pendiente de atenuación.<sup>73</sup>

<sup>&</sup>lt;sup>71</sup> Procesado digital de señales. Bahía Blanca, Argentina: Ediciones UNS, 2011, 3-5 p. [Citado 10 de diciembre de 2012]. Disponible en internet

URL<http://www.ingelec.uns.edu.ar/pds2803/Materiales/Cap07/07-Cap07.pdf> <sup>72</sup> lbíd., p. 493.

<sup>&</sup>lt;sup>73</sup> GÓMEZ. Emilia. Introducción al filtrado digital. Barcelona. Escuela Superior de Música de Catalunya, 2009, 7 p. [Citado 10 de diciembre de 2012]. Disponible en internet URL<a href="http://www.dtic.upf.edu/~egomez/teaching/sintesi/SPS1/Tema7-FiltrosDigitales.pdf">http://www.dtic.upf.edu/~egomez/teaching/sintesi/SPS1/Tema7-FiltrosDigitales.pdf</a>

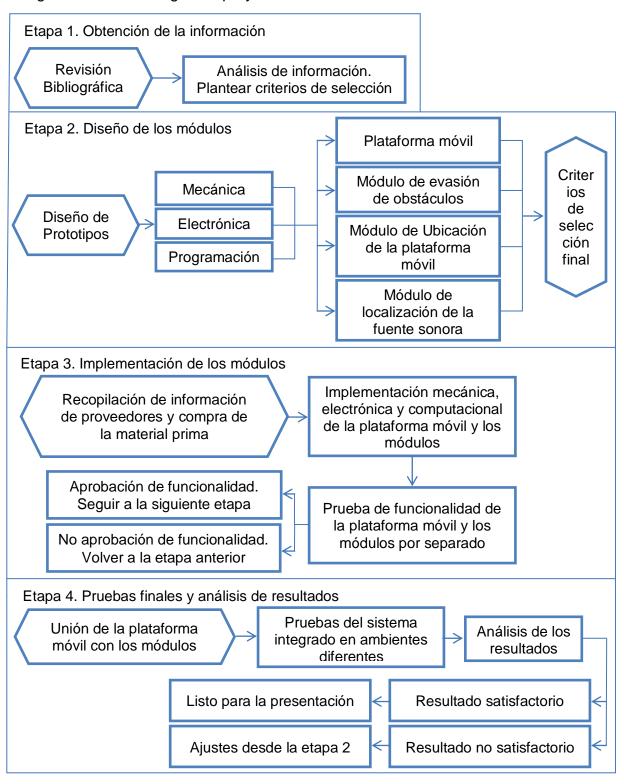
# 3. METODOLOGÍA

# 3.1 ENFOQUE DE LA INVESTIGACIÓN

Esta investigación tiene un enfoque Empírico-Analítico porque presentó y delimitó un problema y en base de esto se planteó una hipótesis, que consiste en: implementar un algoritmo para detectar y localizar una fuente sonara, lo cual se verificará mediante una plataforma móvil. Teniendo en cuenta la hipótesis, se formularon los objetivos anteriormente mencionados, se presentarán prototipos para la verificación de la fiabilidad del proyecto, una vez puesta en marcha del prototipo seleccionado se acepta o se rechaza la hipótesis como parte o totalidad de los resultados.

Para cumplir los objetivos planteados lo primero que se debe realizar es la búsqueda, selección y consolidación de la certeza de la información que aporte a este proyecto, dependiendo de ésta, se proponen dos prototipos, cada uno de ellos teniendo en cuenta, los costos y complejidad, se seleccionará el prototipo con mayor puntaje en la tabla comparativa (ventajas y desventajas) y se empezará con la implementación y puesta en marcha. Una vez unidos todos los sistemas, se realizan las pruebas correspondientes para determinar el éxito del proyecto, en el caso de hacer optimización, se realizarán hasta que el proyecto cumpla con los requisitos que este documento plantea. La figura 24 muestra con más detalle la metodología del proyecto.

Figura 24. Metodología del proyecto



Fuente, Autores

# 3.2 LÍNEA DE INVESTIGACIÓN

La línea de investigación en la que se encuentra este proyecto es "TECNOLOGÍAS ACTUALES Y SOCIEDAD".

# 3.2.1 Sub-línea de investigación

Entre las sub líneas que la facultad de Ingeniería tiene, este proyecto encaja en la de "ANÁLISIS Y PROCESAMIENTO DE SEÑALES (ASP)".

# 3.2.2 Núcleo problemático

El proyecto se encuentra en el núcleo problemático de "ROBÓTICA".

## 4. DISEÑO INGENIERIL

En este capítulo se explicará detenidamente, el desarrollo de cada uno de los módulos que se observan en el esquema general del funcionamiento del sistema

Módulo de evasión Obstáculos de obstáculos Módulo de Ubicación Plataforma Campo magnético Controlador de la plataforma terrestre Móvil Principal móvil Módulo de Fuente Sonora localización de la fuente sonora

Figura 25. Diagrama de bloques general del funcionamiento del sistema

Fuente. Autores

El controlador principal que se utilizará para recibir y transmitir información a los módulos, debe tener comunicación I2C para adquirir datos del módulo de localización de la fuente sonora, PWM para realizar el control de la plataforma móvil y por último, un módulo de conversión A/D para recibir la información proveniente de los sensores para evadir los obstáculos. Considerando lo anterior, se decidió utilizar el Arduino Mega, por tener todas las características requeridas por el sistema, por ser una plataforma de desarrollo "open hardware y software" y por su sencillez de programación

#### 4.1 PLATAFORMA MÓVIL

#### 4.1.1 Selección del sistema de locomoción

La forma más sencilla de construir esta plataforma móvil es con ruedas, teniendo en cuenta que pueden haber una o más ruedas de tracción. Además se requiere como mínimo que la plataforma tenga dos grados de libertad y una direccionalidad, asociados con la velocidad y la dirección. De los tipos de locomoción que se presentó en el marco teórico...en la sección 2.1.1.5..., todos cumplen con el requisito, pero quienes cumplen con un mejor funcionamiento son los tipos síncrono y omnidireccional porque reducen las restricciones cinemáticas, pero otro tipo que también puede funcionar muy bien gracias a que tiene la opción de girar en su propio eje y cambiar la dirección es el sistema diferencial.

Algunos trabajos realizados por diferentes instituciones demuestran las ventajas y desventajas de estos tipos de locomoción; V. Asanza, J. Laica y D. Paillacho dicen en su investigación que la locomoción diferencial tiene un bajo costo de implementación y una simpleza en el control multidireccional del robot móvil teniendo en cuenta las velocidades de los motores. Amario Panchini, Karlos Pérez y Enrique Tovar dicen en el capítulo 3 de su tesis, que utilizan un motor DC para brindarle la velocidad al robot y un servo motor para darle la dirección a cada una de las ruedas, esto hace que se incremente el costo. Mario González habla de las ventajas y desventajas de los tres tipos de locomociones: la configuración diferencial es uno de los más sencillos y económicos en implementar. Sin

<sup>&</sup>lt;sup>74</sup> ASANZA, V.; LAICA, J. y PAILLACHO. D. Teleoperación de un robot móvil con manejo diferencial a bajo costo. <u>En</u>: ESPOL Ciencia. 2007 [Citado 21 de febrero de 2013]. Disponible en internet: <a href="http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/4757/1/7326.pdf">http://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/4757/1/7326.pdf</a>

PANCICH. Mario; PÉREZ. Karlos y TOVAR. Enrique. Robot móvil para exploración en lugares de difícil acceso para el ser humano. Trabajo de grado Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica México D.F.: Instituto Politécnico Nacional. Facultad de Ingeniería. 2008. 76 p. [Citado 21 de febrero de 2013]. Disponible en internet: <a href="http://148.204.48.94:8080/dspace/bitstream/123456789/8535/1/2740\_tesis\_Febrero\_2011\_11895">http://148.204.48.94:8080/dspace/bitstream/123456789/8535/1/2740\_tesis\_Febrero\_2011\_11895</a>

embargo tiene la dificultad para trazar una línea recta, porque cualquier desigualdad en las ruedas, en el terrero o en la velocidad de los motores hace que pierda la línea que estaba trazando. La configuración síncrona tiene la ventaja de separar la tracción de la rotación, haciendo que el control sea sencillo. La desventaja es la complejidad para diseñar las ruedas e implementarlas. Y en cuanto a la configuración omnidireccional, su ventaja principal es la capacidad de realizar movimientos complejos gracias a la distribución de las ruedas. Sin embargo tiene dificultades para seguir líneas rectas y su implementación es bastante compleja. <sup>76</sup>

Basándose en la información anterior y de acuerdo con los requisitos que debe cumplir la plataforma (desplazarse por un terreno plano), se decide desarrollar el proyecto mediante la configuración diferencial, por su simplicidad en la implementación y en su bajo costo de construcción. Esta configuración tendrá cuatro ruedas, con el fin de distribuir de forma homogénea el peso de la plataforma en cada una de ellas.

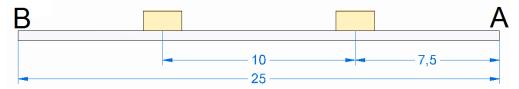
#### 4.1.2 Diseño del sistema de locomoción

La selección de los motores para las ruedas depende de la carga que tenga que mover el motor, el voltaje y la corriente requerida. Es por ello que se tomará como parámetro de diseño que la plataforma se encuentre sobre un plano inclinado de 20 grados máximo, en el momento que rompe la inercia, considerando éste el peor escenario para los motores. Para una mejor distribución en la plataforma móvil se determina la posición de los motores de la siguiente manera.

<sup>&</sup>lt;sup>76</sup> GONZÁLEZ. Mario. Inteligencia artificial en robots móviles de competencia para su aplicación en el diseño de un agente inteligente en un robot seguidor de trayectorias. Trabajo de grado Ingeniería en Robótica Industrial, México D.F.: Instituto Politécnico Nacional. Facultad de Ingeniería. 2009. 16-18 p. [Citado 21 de febrero de 2013]. Disponible en internet:

<sup>&</sup>lt;a href="http://itzamna.bnct.ipn.mx:8080/dspace/bitstream/123456789/2593/1/ROBOTSMOVILES.pdf">http://itzamna.bnct.ipn.mx:8080/dspace/bitstream/123456789/2593/1/ROBOTSMOVILES.pdf</a>

Figura 26. Vista lateral de la plataforma móvil



Fuente. Autores

Como la distancia entre el centro del motor y el punto A es de 7,5 cm, el radio mínimo de la rueda para que ese punto no roce con el suelo en el momento que esté subiendo la inclinación de 20° es:

$$r = \tan 20 \cdot c \tag{6}$$

$$r = \tan 20 \cdot 7.5 cm$$

$$r = 2.72 cm$$

Con un factor de seguridad riguroso por ser un parámetro crítico del proyecto de 1,5, el radio definitivo de la rueda es:

$$r = 2.72 cm \cdot f_s$$

$$r = 2.72 cm \cdot 1.5$$

$$r = 4.08 cm$$
(7)

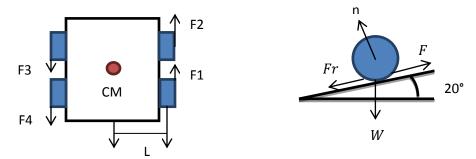
La tabla 5 muestra las especificaciones de la rueda seleccionada, considerando su radio mínimo, su bajo costo y siendo la más comercial en Colombia. En el anexo F, se encuentra los planos de la rueda Pololu MEC\_0250.

Tabla 4. Especificaciones técnicas de rueda comercial

| Nombre  | Pololu Wheel                    |  |  |
|---|---------------------------------|--|--|
| Distribuidor  | Pololu Robotics and Electronics |  |  |
| Modelo  | MEC_0250                        |  |  |
| Tamaño  | 90 x 10 mm                      |  |  |
| Peso  | 0.8 oz                          |  |  |
| Diámetro del eje  | 3 mm                            |  |  |
| Color   | Negro                           |  |  |
| Fuente: Disponibe en Pololu Robotics and Electronics. [Citado 21 de febrero de  |                                 |  |  |
| 2013]. Disponible en internet : <a href="http://www.pololu.com/catalog/product/1435/specs">http://www.pololu.com/catalog/product/1435/specs</a> |                                 |  |  |

A continuación se determina la fuerza (F) que se requiere para que los motores giren la plataforma móvil sobre su eje en la inclinación de  $20^{\circ}$ .

Figura 27. Diagrama de cuerpo libre de una rueda sobre un plano inclinado de 20°



Fuente. Autores

Teniendo en cuenta la figura anterior se obtiene la ecuación de los momentos del sistema.

$$\sum M = F1 \cdot L + F2 \cdot L + F3 \cdot L + F4 \cdot L - Fr1 \cdot L$$
$$-Fr2 \cdot L - Fr3 \cdot L - Fr4 \cdot L = I \cdot \infty$$
 (8)

Suponiendo que las fuerzas (F) y las fuerzas de fricción (Fr) son iguales entre sí. Se tiene

$$(4 \cdot F \cdot L) - (4 \cdot Fr \cdot L) = I \cdot \alpha \tag{9}$$

Para determinar la fuerza de fricción (Fr) es necesario saber el coeficiente de fricción dinámica ( $\mu_d$ ) de la rueda al contacto con el concreto.

Tabla 5. Coeficientes de fricción estática y dinámica

| Material                     | $\mu_{m{e}}$            | $\mu_d$                           |
|------------------------------|-------------------------|-----------------------------------|
| Acero sobre acero            | 0.74                    | 0.57                              |
| Aluminio sobre acero         | 0.61                    | 0.47                              |
| Cobre sobre acero            | 0.55                    | 0.36                              |
| Caucho sobre concreto        | 1.0                     | 0.8                               |
| Madera sobre madera          | 0.25-0.5                | 0.2                               |
| Metal sobre metal            | 0.15                    | 0.06                              |
| Fuente: SERWAY Raymond v FAI | IGHN Jerry Física Méxic | o: International Thomson Editores |

Fuente: SERWAY. Raymond y FAUGHN. Jerry. Física. México: International Thomson Editores, 6a Ed, 2005, 101 p. ISBN 970-683-377-X.

También se requiere hallar la fuerza normal (n), para esto es necesario hallar el peso que soporta una rueda (W). Se proyecta que la plataforma va a tener una masa de 2.5 kilogramos y unas dimensiones de 25 cm de largo x 25 cm de ancho.

$$W_{pl} = 2.5 kg \cdot 9.81 \frac{m}{s^2}$$

$$W = \frac{24,525}{4} N = 6.131 N$$
(10)

Teniendo en cuenta un diagrama de cuerpo libre de la figura 26, la fuerza normal (n) es:

$$n = W \cdot \cos 20$$
 (11)  
 $n = 6.131 \, N \cdot \cos 20 = 5.76 \, N$ 

Se reemplaza  $\mu_d$  y n en la ecuación de fricción y se obtiene.

$$Fr = \mu_e \cdot n$$
 (12)  
 $Fr = 0.8 \cdot 5.76 N = 4.6 N$ 

Ahora se halla la inercia que ejerce el sistema mediante el teorema de ejes paralelos. Pero el primer paso es hallar la inercia puntal de los elementos que se involucran en el sistema como las ruedas  $(I_R)$  y la base  $(I_B)$ .

Para calcular la inercia de las ruedas, se requiere realizar dos pasos, el primero es hallar la inercia del anillo  $(I_{Ra})$  y posteriormente la de los 6 rayos que tiene  $(I_{Rb})$ .

$$I_{Ra} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (R_1^2 + R_2^2)$$

$$I_{Ra} = \frac{1}{2} \cdot 0.01134 \cdot (0.045^2 + 0.038^2)$$

$$I_{Ra} = 1.95^{-5} kg \cdot m^2$$

$$I_{Rb} = \frac{1}{3} \cdot M \cdot L^2$$

$$I_{Rb} = (\frac{1}{3} \cdot 0.01134 \cdot 0.038^2) \cdot 6$$

$$I_{Rb} = 3.27^{-5} kg \cdot m^2$$

$$I_{R} = I_{Ra} + I_{Rb}$$

$$I_{R} = 1.95^{-5} kg \cdot m^2 + 3.27^{-5} kg \cdot m^2$$

$$I_{R} = 5.23^{-5} kg \cdot m^2$$

$$I_{R} = 5.23^{-5} kg \cdot m^2$$

Ahora se calcula la inercia de la base.

$$I_{B} = \frac{1}{2} \cdot M \cdot (a^{2} + b^{2})$$

$$I_{B} = \frac{1}{2} \cdot 2.5 \cdot (0.25^{2} + 0.25^{2})$$

$$I_{B} = 5.2^{-3} kg \cdot m^{2}$$
(16)

Teniendo ya las inercias de los elementos se desarrolla el teorema de ejes paralelos

$$I = I_{CM} + M \cdot L^2 \tag{17}$$

Para las ruedas

$$I_1 = (5.23^{-5} kg \cdot m^2 + 2.5 \cdot 0.125^2) \cdot 4$$
  
 $I_1 = 0.039 kg \cdot m^2$ 

Para la base

$$I_2 = (5.2^{-3} kg \cdot m^2 + 2.5 \cdot 0.125^2) \cdot 4$$
$$I_2 = 0.044 kg \cdot m^2$$

La inercia final

$$I = 0.039 \ kg \cdot m^2 + 0.044 \ kg \cdot m^2$$
 
$$I = 0.083 \ kg \cdot m^2$$

Como se pretende que la plataforma móvil de un giro sobre su propio eje en un segundo, entonces la aceleración angular ( $\propto$ ) será.

$$(\propto) = 6.28 \frac{rad}{s^2}$$

Ahora se determina la fuerza que se requiere teniendo en cuenta la ecuación (9)

$$F = \frac{I \cdot \infty + (4 \cdot Fr \cdot L)}{4 \cdot L}$$

$$F = \frac{0.083 \ kg \cdot m^2 \cdot 6.28 \frac{rad}{s^2} + (4 \cdot 4.6 \ N \cdot 0.125 \ m)}{4 \cdot 0.125 \ m}$$

$$F = \frac{0.083 \ kg \cdot m^2 \cdot 6.28 \frac{rad}{s^2} + (4 \cdot 4.6 \ N \cdot 0.125 \ m)}{4 \cdot 0.125 \ m}$$

$$F = 5.64 N$$

Sabiendo la fuerza y la distancia, ahora sí se determina el torque; fuerza (F) por distancia (r).

$$T = F \cdot r \tag{18}$$

$$T = 5.64 N \cdot 4,5 cm$$
$$T = 25.38 N \cdot cm = 2.59 kgf \cdot cm$$

Tabla 6. Especificaciones técnicas del micromotor comercial

| Nombre                | Micro Geared Motor                   |
|-----------------------|--------------------------------------|
| Distribuidor          | Frugal Labs Tech Solutions Pvt. Ltd. |
| Modelo                | Micromotor HP 100:1                  |
| Tamaño                | 24 x 10 x 12 mm                      |
| Peso                  | 0.34 oz                              |
| Diámetro del eje      | 3 mm                                 |
| Relación de reducción | 100:1                                |
| Velocidad sin carga   | 100 rpm                              |
| Corriente sin carga   | 48 mA                                |
| Torque                | 5kgf⋅ cm                             |
| Corriente máxima      | 390 mA                               |

Fuente: Disponible Frugal LabsTechSolutionsPvt. Ltd. [Citado 02 de marzo de 2013]. Disponible en internet: <a href="http://www.alibaba.com/product-gs/666839633/12mm">http://www.alibaba.com/product-gs/666839633/12mm</a> 6v 100rpm small gear motor.html>

La tabla 6 muestra las especificaciones del micromotor comercial a utilizar, considerando el torque requerido, su bajo costo en comparación de los servomotores digitales u otro micromotor con más revoluciones y adicionalmente el diámetro del eje del motor casa perfectamente en el eje de la rueda, facilitando la implementación del sistema. En el anexo E se puede observar los planos del micromotor.

Además de las especificaciones técnicas, por diseño se necesita conocer la corriente máxima a la que va a ser sometido el motor. Mediante pruebas en el laboratorio se obtuvo una corriente máxima de 117mA (ver tabla 7) en cada motor al someterlo al torque proyectado de la plataforma; valor que no sobrepasa la corriente indicada en las especificaciones de la tabla 6.

Tabla 7. Pruebas de corriente de los micromotores

| Micromotor                         | Corriente sin carga | Corriente con máxima carga |
|------------------------------------|---------------------|----------------------------|
| Micromotor 1 (Derecha-Posterior)   | 51,5mA              | 118,1mA                    |
| Micromotor 2 (Derecha-Inferior)    | 49,1mA              | 117mA                      |
| Micromotor 3 (Izquierda-Posterior) | 48,2mA              | 116,9mA                    |
| Micromotor 4 (Izquierda-Inferior)  | 48,7mA              | 117,6mA                    |
| Fuente: Autores                    |                     |                            |

Pensando en la facilidad para la implementación del control de los motores, en cuanto al sentido de giro y la velocidad, se utilizará un driver para motor DC. Entre las referencias comerciales de estos drivers en Colombia, se decidió utilizar el L293B por cumplir con los parámetros de corriente y funcionalidad (ver anexo A). Como se conectarán 2 motores en paralelo, cada canal requerirá en promedio de 117,3mA. Según la hoja de especificaciones de este driver, cada canal puede proporcionar 1A máximo, con un corriente de arranque de 2A hasta 5 milisegundos y se decidió darle a este elemento electrónico un factor de seguridad de 0,2. Esto quiere decir que suministrará hasta un máximo de 200mA como corriente máxima.

### 4.1.3 Implementación del sistema de locomoción

Con base a los diseños realizados anteriormente, se continua con la implementación del sistema de locomoción, para esto, es necesario un circuito esquemático del módulo con el fin de facilitar su explicación (ver figura 28).

**Z** D7 D8 1N4148 1N4148 Motor D1 MOTOR D1 MOTOR D2 **1**1.1V O 11.1V 16 VSS ٧S OUT1 Motor D2 6 OUT2 D6 D5 EN1 1N4148 L293B EN2 **Z** D3 Motor I1 ∑ D4 OUT3 IN3 1N4148 1N4148 GND GND OUT4 Gnd MOTOR 12 MOTOR I1 O 11.1V Motor I2 ZS D1 **∑** D2 1N4148 1N4148

Figura 28. Circuito esquemático del sistema de locomoción

El l293B tiene cuatro entradas, dos para controlar los motores derechos (D1, D2) y dos para los izquierdos (I1, I2), y dependen de la lógica que tendrá un microprocesador, afectando el sentido de giro de los motores. Las entradas 1 y 9 son para la modulación por ancho de pulso (PWM) y controlan la velocidad de los motores. La entrada 16 es la conexión de alimentación del integrado, las entradas 4, 5, 12 y 13 son tierra y la entrada 8 es el voltaje de los motores.

Por recomendación del fabricante, se debe proteger el driver de corrientes transientes con diodos de recuperación rápida, es por esto que se eligió el diodo 1N4148 para tal fin, por ser un diodo para aplicaciones de conmutación rápida y por cumplir con las exigencias de voltaje y corriente para la aplicación.

El funcionamiento del driver para motor DC está representado en la tabla de verdad que se encuentra a continuación.

Tabla 8. Tabla de verdad de un driver para motor DC.

| EN1 | In1 | ln2 | Función                  |
|-----|-----|-----|--------------------------|
| Н   | L   | Н   | Girar hacia la derecha   |
| Н   | Н   | L   | Girar hacia la izquierda |
| Н   | L   | L   | Parada del motor         |
| Н   | Н   | Н   | Parada del motor         |
| L   | X   | Χ   | Parada del motor         |

Fuente: Disponible Texas Instruments. [Citado 02 de marzo de 2013]. Disponible en internet:<a href="http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/texasinstruments/l293d.pdf">http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/texasinstruments/l293d.pdf</a>

### 4.1.4 Selección de la fuente de poder

Considerando que la plataforma móvil será totalmente autónoma, las opciones de selección de la fuente de poder se limita a una: la batería. Según la tabla 9, donde compara los diferentes tipos de baterías, se puede observar que la mejor elección es la Li-Po, porque proporciona una cantidad de energía alta por kg, además es la batería que más tensión brinda por celda, tiene una alta durabilidad, se demora menos en cargar y tiene baja auto-descarga.

Tabla 9. Comparación de los diferentes tipos de baterías

| Tipo   | Energía/Peso<br>(Wh/kg) | Tensión por<br>celda (V) | Duración (número<br>de recargas) | Tiempo de<br>carga (h) | Auto-descarga por mes (% del total) |
|--------|-------------------------|--------------------------|----------------------------------|------------------------|-------------------------------------|
| Plomo  | 30-55                   | 1,2                      | + de 10000                       | 4-8                    | 10                                  |
| Ni-Mh  | 60-120                  | 1,25                     | 1000                             | 2-4                    | 20                                  |
| Ni-Fe  | 48-80                   | 1,25                     | 500                              | 10-14                  | 30                                  |
| Ni-Cd  | 30-40                   | 2                        | 1000                             | 8-16                   | 5                                   |
| Li-ion | 110-160                 | 3,16                     | 4000                             | 2-4                    | 25                                  |
| Li-Po  | 100-130                 | 3,7                      | 5000                             | 1-1,5                  | 10                                  |

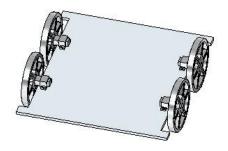
Fuente. Disponible en Equipos y Laboratorios de Colombia. [Citado 02 de marzo de 2013]. Disponible en internet:<a href="http://www.equiposylaboratorio.com/sitio/contenidos\_mo.php?it=3134">http://www.equiposylaboratorio.com/sitio/contenidos\_mo.php?it=3134</a>

Para el proyecto se utilizarán dos baterías Li-Po, una de dos celdas (7,4V) para alimentar los módulos de localización de la fuente sonora, de ubicación y de evasión de obstáculos, los cuales funcionarán a un voltaje de 5V, y la otra batería será una Li-Po de 3 celdas (11,1V) que sólo alimentará a los motores.

### 4.1.5 Diseño de la estructura mecánica

Como se mencionó...en la sección 4.1.2...la plataforma móvil tendrá unas dimensiones de 25 cm de ancho y 25 cm de largo. Será hecha en acrílico de color transparente por razones de estética y tendrá un grosor de 5 mm con el ideal de sobredimensionar la base, en caso que se requiera otras piezas mecánicas, más baterías o una mayor cantidad de componentes electrónicos de los planeados.

Figura 29. Base de la plataforma móvil



Fuente, Autores

Para comprobar que efectivamente la lámina de acrílico soporte ese peso y no se rompa, se decidió someter a ésta a una prueba de esfuerzos (deflexión), en la máquina Universal de Ensayos de la Universidad. Esta prueba mostró la buena flexibilidad que caracteriza al acrílico, deflectandose hasta 30 cm y una vez el pistón que realizaba la fuerza fue separado de la lámina, ésta volvió a su estado inicial, así como se muestra en la figura 30.

Figura 30. Prueba de flexión de la lámina de acrílico



# 4.2 MÓDULO DE LOCALIZACIÓN DE LA FUENTE SONORA

Determinar correctamente la dirección hacia donde el robot debe dirigirse, da paso a que el sistema de navegación funcione de manera eficiente y se puede cumplir con éxito el objetivo general de este proyecto. Es por esto que se debe tener mucha precaución con la ejecución de este subsistema y de todos aquellos elementos que los componen.

Para la correcta identificación del ángulo en el que se encuentra la fuente sonora con respecto al frente de la plataforma móvil, este módulo cuenta con tres etapas fundamentales: receptor acústico, la etapa de amplificación (preamplificación, filtrado y amplificación programable) y el procesamiento digital de las señales; los cuales se llevarán a cabo teniendo presente que el método de localización será el ITD, explicado...en la sección 2.2.2.1...por su facilidad de implementación y precisión con respecto al IID; método que requiere una plataforma robusta para que los micrófonos tengan entre ellos una masa, haciendo que la intensidad de la señal se atenúe considerablemente, así como lo es la cabeza para los oídos, significando mayor costo y peso para la plataforma.

Otro factor importante para tener en cuenta en el momento del desarrollo este módulo, es la fuente sonora; de sus características depende el buen funcionamiento de cada una de sus tres etapas. A continuación se muestra el diagrama de bloques del módulo, el cuál se va a ir desarrollando detalladamente en esta sección.

Etapa 1 Etapa 2 Etapa 3 Fuente sonora Arreglo de Muestreo Etapa de micrófono Preamplificación Ruido Filtros digitales Filtro Antialiasing Tiempo de llegada de Amplificación de las señales ganancia programable Cálculo Controlador del ángulo Principal

Figura 31. Diagrama de bloques del módulo de localización de la fuente sonora

Fuente, Autores

#### 4.2.1 Fuente sonora

Las características de la fuente sonora son importantes para el diseño de este subsistema. El nivel de presión sonora, la directividad, la nitidez y la frecuencia son algunas de estas que influirán en la adecuada captura del transductor acústico.

La fuente sonora que se utilizará pretende ser lo más similar a una fuente común, y en efecto, cumple con una alta directividad; ya que las fuentes omnidireccionales son escasas y raras. Para esto se emplea usualmente la forma de altavoz en caja acústica rectangular, normalmente diseñada pensando en compensar las pérdidas en frecuencia que puede presentar el transductor de salida.

Sin embargo, se requiere que la respuesta en frecuencia de la fuente permita reproducir la frecuencia de operación del sistema. Por otro lado, el nivel de presión sonora que la fuente alcanza a generar debe ser suficiente para que, junto con una relación señal ruido adecuada, pueda ser capturada por los transductores del sistema.

Después de considerar estos lineamientos, se decidió utilizar una fuente casera, con el esquema de caja cuadrada, diseñada para reproducir desde 70 Hz hasta 9 kHz, con base en los parámetros de Thiele-Small, para 21 litros. Ésta cumple con los requerimientos planteados, ya que se realizaron capturas y se verificó la obtención de señales entre 500 Hz y 4 kHz sin distorsión, y logrando niveles de presión de hasta 103 dB a un metro en ese rango de frecuencias.

Figura 32. Fuente Sonora



### 4.2.1.1 Frecuencia de operación

Como el método de referencia a utilizar para localizar la fuente sonara será el ITD, no se requiere guardar una muestra grande de las señales, porque sólo se necesita conocer la diferencia de tiempos en el instante que la señal llega a los micrófonos, es decir que la amplitud de la señal filtrada no llegará a un valor cercano de 0 dB, causando que el algoritmo de correlación no funcione adecuadamente, para longitudes de onda de la señal menores a la distancia máxima entre dos micrófonos, la cual es de 25 cm. Para cumplir con éste parámetro se utiliza la ecuación (3) y se determina la frecuencia de operación de la fuente sonora.

$$f < \frac{344 \frac{m}{s^2}}{0.25m}$$

$$f < 1376 \, Hz$$

Se selecciona una frecuencia menor para que ésta no esté en el límite de lo requerido. Por ende se escoge una frecuencia de 1kHz

#### 4.2.2 Transductor acústico

De la buena recepción de la señal acústica a analizar proveniente de la fuente sonora, depende el buen desarrollo del procesamiento digital para la estimación del origen de ésta. Por ende, la importancia de seleccionar e implementar un transductor acústico, el cual en el momento de capturar la señal conserve sus características.

#### 4.2.2.1 Selección de los micrófonos

Se decide utilizar micrófonos de condensador por tener la mejor calidad en cuanto a respuesta de frecuencias y distorsión, siendo excelentes para labores de calibración y medición, lo que unido a su alta fidelidad, los hace ideales para cumplir a cabalidad el segundo y el tercer objetivo del proyecto.

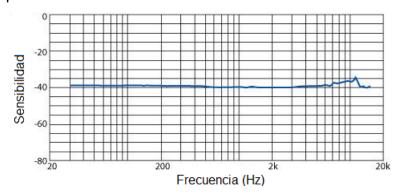
Los micrófonos Electret, son los micrófonos de condensador más apropiados para esta aplicación, porque no requieren un voltaje de polarización elevado (48Vdc) como los micrófonos de condensador convencionales, sino que se puede determinar este valor en el momento de su fabricación, teniendo como parámetro de diseño el empleo que se le vaya a dar, además su directividad es omnidireccional y la cápsula se puede adquirir fácilmente en el mercado a un bajo costo, brindando la posibilidad de diseñar y construir el cuerpo del micrófono según las características de la plataforma.

Se decidió realizar pruebas con tres capsulas Electret diferentes para seleccionar la mejor opción para esta aplicación.

- Electret POM-2738P-C33-R
- Electret POM-2742P-2-R
- Electret AOM-4546P-R

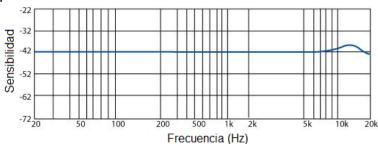
La respuesta en frecuencia de cada uno de estos micrófonos es plana y eso se puede demostrar en las siguientes gráficas. La diferencia es su sensibilidad; el primer micrófono tiene -38 dB, el segundo -45 dB y el tercero -46 dB.

Gráfica1. Respuesta en frecuencia. Electret POM-2738P-C33-R



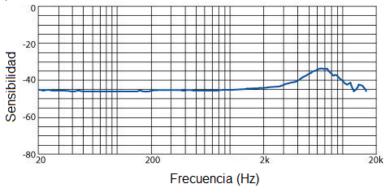
Fuente: Disponible en PUI Audio. [Citado 26 de marzo de 2013]. Disponible en internet: <a href="http://www.puiaudio.com/product-detail.aspx?categoryld=4&partnumber=POM-2738P-C33-R">http://www.puiaudio.com/product-detail.aspx?categoryld=4&partnumber=POM-2738P-C33-R</a>

Gráfica 2. Respuesta en frecuencia. Electret POM-2742P-2-R



Fuente: Disponible en PUI Audio. [Citado 26 de marzo de 2013]. Disponible en internet: <a href="http://www.puiaudio.com/product-detail.aspx?categoryId=4&partnumber=POM-2742P-2-R">http://www.puiaudio.com/product-detail.aspx?categoryId=4&partnumber=POM-2742P-2-R</a>

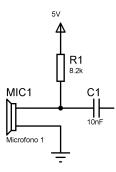
Gráfica 3. Respuesta en frecuencia. Electret AOM-4546P-R



Fuente: Disponible en PUI Audio. [Citado 26 de marzo de 2013]. Disponible en internet: <a href="http://www.puiaudio.com/product-detail.aspx?categoryld=4&partnumber=AOM-4546P-R">http://www.puiaudio.com/product-detail.aspx?categoryld=4&partnumber=AOM-4546P-R</a>

Como parámetro de selección de los micrófonos, se observa la sensibilidad de cada uno de estos, mediante la señal que perciben, la cual será un tono puro de 2kHz. Para visualizar ésta señal en un osciloscopio, fue necesario implementar un circuito electrónico (ver figura 33) de alimentación para los micrófonos.

Figura 33. Circuito esquemático del circuito de alimentación de los micrófonos

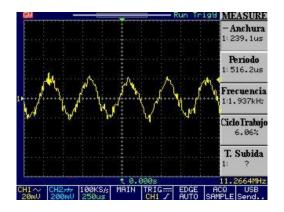


Fuente. Autores

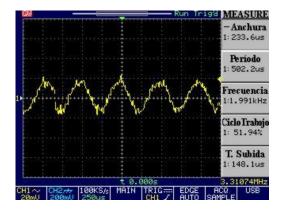
Siendo R1 una resistencia limitadora de corriente, la cual se halló en el laboratorio variando la resistencia de un potenciómetro hasta que el voltaje en el micrófono fuera el voltaje nominal. Este voltaje para los dos primeros micrófonos es de 2V y para el tercero de 1.5V, por tal razón se determinó que la resistencia promedio para el buen funcionamiento de los 3 micrófonos era de  $8.2K\Omega$ . Es importante aclarar que independientemente el valor de la resistencia R1, la corriente que el micrófono va a consumir está en el rango de 0.2mA a 0.5mA.

El condensador actúa como un acople DC/AC para poder visualizar la señal en el osciloscopio y así obtener las siguiente gráficas para el análisis.

Gráfica 4. Señal de 2kHz recibida por la cápsula ElectretPOM-2738P-C33-R

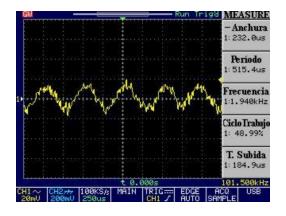


Gráfica 5. Señal de 2kHz recibida por la cápsula Electret POM-2742P-2-R



Fuente. Autores

Gráfica 6. Señal de 2kHz recibida por la cápsula Electret AOM-4546P-R0



Teniendo en cuenta las gráficas de las señales recibidas por las cápsulas, se puede verificar que el Electret POM-2738P-C33-R, es más sensible que los otros, dando como respuesta una amplitud mayor en la señal. Esto significa que requiere menos preamplificación; aspecto por el cual se decide escoger éste micrófono.

Las características técnicas del Electret POM-2738P-C33-R, se encuentran en la tabla 10 y los planos están en el anexo P.

Tabla 10. Características técnicas del micrófono Electret POM-2738P-C33-R

| Nombre            | Electret                  |
|-------------------|---------------------------|
| Distribuidor      | PUI Audio                 |
| Modelo            | POM-2738P-C33-R           |
| Tamaño            | 6 x 2,70 mm               |
| Directividad      | Omnidireccional           |
| Impedancia        | 2.2 kΩ                    |
| Voltaje nominal   | 2 V                       |
| Sensibilidad      | $-38\pm3$ db              |
| E ( D) '11 D111 A | " TO"   07     00401 D' " |

Fuente: Disponible en PUI Audio. [Citado 27 de marzo de 2013]. Disponible en internet:<a href="http://www.puiaudio.com/product-detail.aspx?categoryId=4&partnumber=POM-2738P-C33-R">http://www.puiaudio.com/product-detail.aspx?categoryId=4&partnumber=POM-2738P-C33-R</a>

## 4.2.2.2 Implementación de los micrófonos

En esta etapa, se construyó el cuerpo del micrófono, teniendo como referencia el ECM8000; micrófono utilizado para mediciones acústicas (ver figura 34), además el diámetro de la cabeza de estos micrófonos es de 12,7 mm medida perfecta para posteriormente poder calibrarlos con los pistófonos disponible en la Universidad.

Figura 34. Micrófono ECM8000



Fuente. Disponible en Behringer. [Citado 27 de marzo de 2013]. Disponible en internet: <a href="http://www.behringer.com/EN/Products/ECM8000.aspx">http://www.behringer.com/EN/Products/ECM8000.aspx</a>

Se diseñó una base para los micrófonos con el objetivo de fijarlos a la plataforma móvil (ver figura 35). El mecanizado de cada una de las piezas fue en un torno y un CNC (Control Numérico Computarizado), en la zona de metalmecánica y soldadura de la Universidad. El material que se utilizó fue el aluminio con una aleación AA6261, por su bajo peso y costo. Los planos del cuerpo del micrófono están en los anexos del K al N.

Figura 35. Micrófono diseñado



Fuente. Autores

A la cabeza del micrófono se acopla la cápsula Electret POM-2738P-C33-R (ver figura 36) y se sueldan dos cables a través del eje del cuerpo del micrófono, para realizar su posterior preamplificación.

Figura 36. Proceso de acople de la cápsula del micrófono









Fuente. Autores

Para acoplar los micrófonos a la plataforma móvil, y dejarlos a una altura considerable, fue necesario implementar una segunda base. Se sabe que los obstáculos tienen una altura de 50 cm y se espera que la plataforma no se acerque a menos de 10 cm del obstáculo. Además, por motivos acústicos, para que el obstáculo no genere un recorrido de la señal del triple del recorrido ideal directo, lo que ocasionaría una reflexión que el sistema confundiría con el sonido directo, se debe tener una distancia entre la parte superior del obstáculo y la cápsula del micrófono no mayor a 30 cm. Por ende, la altura de los micrófonos se establece según la geometría de la siguiente figura y su respectiva ecuación de Pitágoras.

$$d = \sqrt{x^2 + h^2}$$

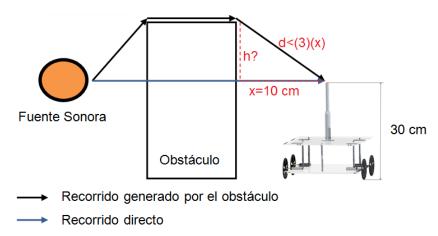
$$d < 30 cm$$
(19)

Despejando h,

$$h = \sqrt{d^2 - x^2}$$

$$h = \sqrt{30^2 - 10^2} = 28 cm$$
(20)

Figura 37. Posición del micrófono



### 4.2.2.3 Arreglo de micrófonos

La geometría del arreglo de micrófonos depende realmente de la precisión a la que se quiera obtener el ángulo entre la plataforma y la fuente sonora. Si se utiliza un arreglo de dos micrófonos alineados de forma horizontal no habría la posibilidad de saber si la fuente está adelante o atrás y si estuvieran alineados verticalmente, no se sabría si la fuente está a la derecha o a la izquierda. Por el contrario, con una geometría triangular o cuadrilateral se podría tener una mejor precisión de la localización de la fuente.

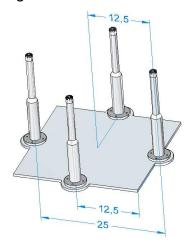
Se decidió hacer un arreglo en forma de cuadrilátero, teniendo en cuenta un trabajo presentado por la Universidad de las Ciencias de la información y Tecnología, de Beijín, China,<sup>77</sup>donde concluye, que un arreglo de micrófonos con geometría en forma de cuadrado es más preciso que en forma de triángulo. Estos cuatro micrófonos se ubicaron en la plataforma de tal manera que quedarán los más lejos posibles entre ellos (ver figura 36, medidas en cm), así el retardo de

92

<sup>&</sup>lt;sup>77</sup>FAN, Op. Cit., p.317.

llegada de la señal es mayor, obteniendo un número más grande de muestras para analizar.

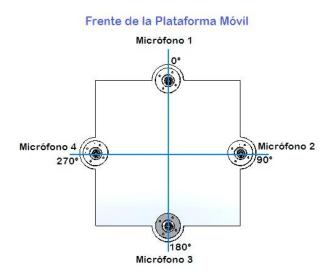
Figura 38. Estructura del arreglo de los micrófonos



Fuente. Autores

A partir de este momento los micrófonos tendrán un nombre numérico y estarán situados a 90 grados entre ellos, como lo muestra la figura 39, por razones de referencia en este documento.

Figura 39. Referencia de los micrófonos



#### 4.2.2.4 Pruebas de directividad de los micrófonos

Una vez listo los micrófonos y puestos en la plataforma, se les hizo la prueba de directividad, midiendo el patrón polar de cada uno de ellos, con el fin de determinar que todos los micrófonos se comporten de la misma manera en cualquier dirección (ver figura 40), realizando la medición con una fuente sonora de 1kHz a un metro de distancia de la plataforma, tal como lo dice la norma IEC 61094-4. También se le hizo la prueba al micrófono ECM8000 en las mismas condiciones, para compararlos con los implementados. Para esto fue necesario implementar un circuito de acople para el transporte balanceado de la señal (ver figura 41) a la interfaz de audio del estudio de grabación digital de la Universidad.

Figura 40. Prueba de directividad de los micrófonos

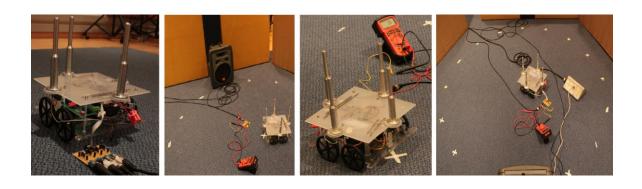
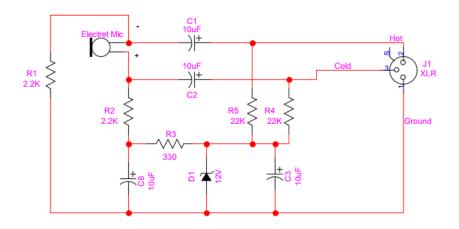
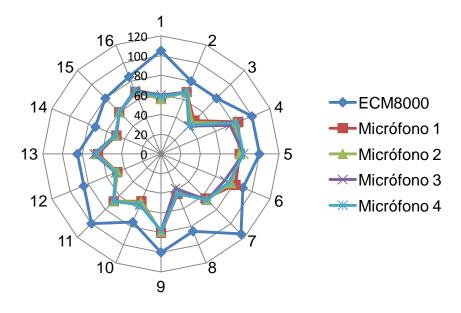


Figura 41. Circuito esquemático de acople para el transporte balanceado de señal



Fuente. [Citado 27 de marzo de 2013]. Disponible en internet: <a href="http://www.epanorama.net/circuits/ElectretMicBalanced.pdf">http://www.epanorama.net/circuits/ElectretMicBalanced.pdf</a>

Gráfica 7. Prueba de directividad de los micrófonos



En los resultados de esta prueba (ver gráfica 7), está el patrón polar de los cinco micrófonos que se sometieron a la prueba de directividad: el ECM8000 de la Universidad y los 4 micrófonos diseñados. Los datos se adquirieron midiendo con un multímetro el voltaje de la salida amplificada del micrófono y se graficaron en Excel.

De la gráfica anterior se puede deducir que los resultados obtenidos no fueron los mejores, teniendo en cuenta que el patrón polar de cada uno de los micrófonos debería haber sido circular. Esto sucede cuando no se tiene las condiciones adecuadas para realizar esta prueba, como lo dice la norma IEC 61094-4, en cuanto al espacio, ya que ésta prueba se debió hacer en una cámara anecoica, cámara que no tiene la Universidad. Sin embargo, se verificó que los cuatro micrófonos que se van a utilizar, tienen prácticamente el mismo comportamiento o la misma directividad.

### 4.2.2.5 Pruebas de adquisición de señales de los micrófonos

Se realizaron pruebas a los micrófonos implementados y a los ECM8000 en los laboratorios de grabación de la Universidad, adquiriendo las señales que estos obtenían de un tono puro de 1kHz a una frecuencia de muestreo de 44.100 Hz, ubicando la fuente sonora a una distancia de dos metros y de esta manera verificar que los micrófonos implementados, están bien diseñados y obtienen una señal semejante a los ECM8000.

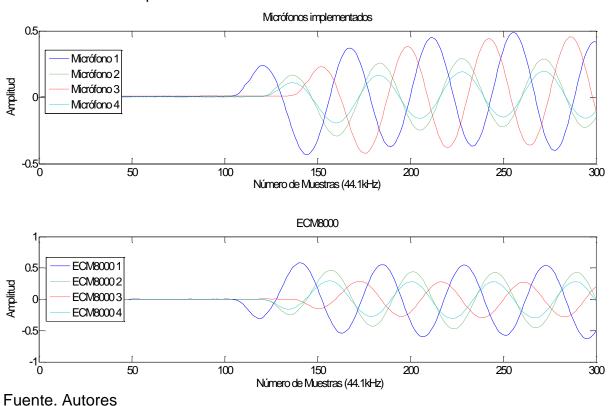
Esta prueba se realizó en 16 puntos diferentes cada 22,5°, para posteriormente corroborar el algoritmo que determinará el ángulo. Cabe resaltar que la adquisición de estas señales fue a través de la interfaz DIGI003 realizando la preamplificación de las señales en los preamplificadores de la consola SoundCraft de la Universidad. En este caso sólo se mostrarán tres pruebas como referencia, porque el comportamiento de las gráficas cada 45° es el mismo.

Figura 42. Prueba de contraste de los micrófonos



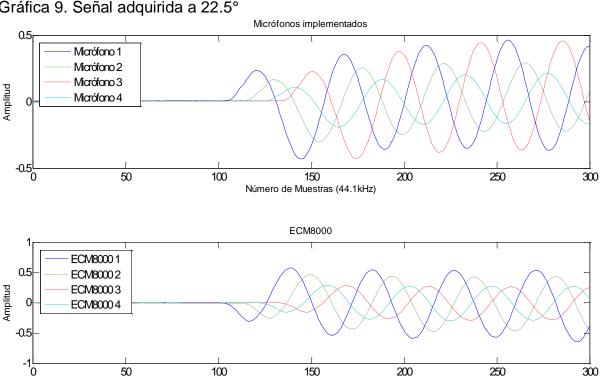
El resultado de las pruebas apreciar en las siguientes gráficas, donde se muestra el tiempo de llegada del tono puro de 1kHz a cada uno de los micrófonos. Estas gráficas están en un formato .wav, por ende tienen una amplitud de -1 a + 1.

Gráfica 8. Señal adquirida a 0°



En la gráfica anterior se puede observar que el micrófono 2 y 4 reciben la señal al mismo tiempo, porque a0° estos dos micrófonos están alineados en forma horizontal. Para determinar el orden de llegada de los micrófonos, se ve en qué momento la señal deja de ser casi nula y pasa a tener una amplitud considerable, ya sea positiva o negativa. Esto debido a que la fase con la que los micrófonos capturan la señal es irrelevante acústicamente. Este desfase se evaluará más tarde en el procesamiento de señal, pero por ahora, lo importante es observar en qué orden empiezan a captar la señal los micrófonos.

En la gráfica 9 se muestra que el tiempo de llegada de cada uno de los micrófonos fue diferente, debido que la fuente sonora estaba a 22.5°. Al micrófono 1, fue al que le llegó la señal primero, seguido por el micrófono 2, después el 4 y por último el micrófono 3.



Gráfica 9. Señal adquirida a 22.5°

Fuente, Autores

Número de Muestras (44.1kHz)

Micrófonos implementados 0.5 Micrófono 1 Micrófono 2 Micrófono 3 Amplitud Micrófono 4 -0.5<sup>L</sup> 100 50 150 200 250 300 Número de Muestras (44.1kHz) ECM8000 ECM80001 0.5 ECM80002 ECM80003 Amplitud ECM80004 -0.5

Gráfica 10. Señal adquirida a 45°

Y estando la fuente sonora a 45°, el tiempo de llegada de los micrófonos 1 y 2 fue igual, así como el de los micrófonos 3 y 4, demostrado en la gráfica anterior.

150

Número de Muestras (44.1kHz)

300

# 4.2.3 Amplificación de la señal adquirida por los micrófonos

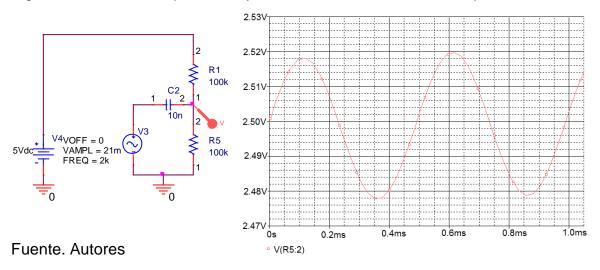
100

# 4.2.3.1 Preamplificación

Como se observó en la gráfica 4, la señal que recibe la cápsula del micrófono, tiene un offset en 0V, causando algunas dificultades en esta etapa de preamplificación, porque los amplificadores operacionales necesitan de una fuente dual, para amplificar el componente positivo y negativo de la señal. Lo que significa una batería adicional, mayor peso para la plataforma y un costo más para el proyecto.

Se decidió implementar un divisor de voltaje para subir el offset de la señal, lo necesario para solucionar este inconveniente. Las resistencias de este divisor son las mismas para subir el offset de la señal a Vcc medios (2,5V). El circuito electrónico y la simulación del divisor se muestran a continuación. Cabe aclarar que la fuente AC del circuito, está reemplazando la resistencia de  $8.2k\Omega$  y el micrófono de la figura 33 para efectos de la simulación.

Figura 43. Circuito esquemático y simulación del divisor del voltaje



Desde el momento que se implementó el divisor de voltaje, el condensador junto a la resistencia equivalente de éste, actuaron como filtro pasa altos grado 1.

$$f = \frac{1}{2\pi RC}$$

$$f = \frac{1}{2\pi \cdot 50k\Omega \cdot 10n_f} = 318,3 Hz$$

$$(21)$$

La frecuencia de corte de este pasa altos es de 318,3 Hz. Esto significa que si al conversor análogo digital le llegan frecuencia menores que ésta, llegarán atenuadas. Para demostrar lo anterior, en la siguiente figura, se observa este filtro

pasa altos, con una frecuencia de 2kHz y una de 5kHzno atenuadas y una de 300Hz atenuada.

R1 R19 R21 100k 100k 100k C9 C10 . 10n . 10n 4VOFF = 0R5 VOFF = 0R20 VAMPL = 21mVAMPL = 21mVAMPL = 21m 100k 100k 100k FREQ = 300 FREQ = 5kFREQ = 2k2.52\ 2.50\ 2.49 3.0ms 3.5ms 4.0ms 4.5ms 5.0<sub>ms</sub> 1.5ms 1.0ms

Figura 44. Circuito esquemático y simulación del filtro pasa altas

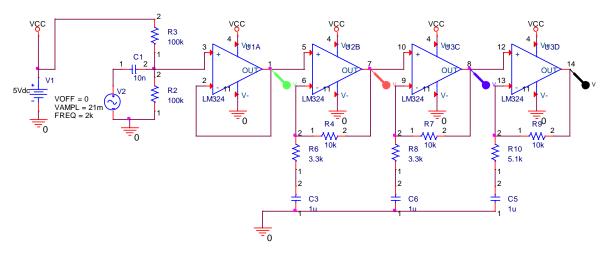
Fuente. Autores

Para realizar la etapa de preamplificación, se decidió hacer la amplificación en cascada de tercer orden, en modo no inversor. La máxima amplificación que se puede obtener es de 3,5V siendo este valor el 70% de la alimentación de los AOP. Entonces la primera y la segunda amplificación tendrán una ganancia de cuatro y la tercera de tres, de esta forma subimos la señal de 2.52V a 3.5V, teniendo como entrada una señal de 40mV pico a pico con un offset en 0V. La ecuación obtenida para hallar estas ganancias es la siguiente. Siendo R2 la resistencia que va de la entrada negativa del AOP a la salida, y R1 de tierra a la entrada negativa del AOP.

$$G = 1 + \frac{R2}{R1} \tag{22}$$

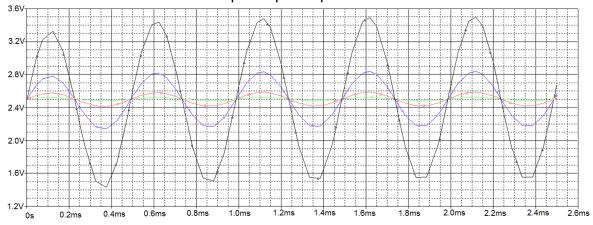
Pero antes de conectar la señal del divisor de tensión a esta etapa, es necesario conectar un circuito seguidor de tensión, con el objetivo de hacer un acople de impedancias. Como la entrada positiva del amplificador no tiene resistencia (según la configuración no inversor), no se necesita calcular la impedancia, puesto que el AOP tiene una impedancia de entrada diecinueve veces más grande que la impedancia de salida.

Figura 45. Circuito esquemático de la etapa de preamplificación



Fuente. Autores

El condensador unido con *R*1 y tierra, está actuando como un sujetador de voltaje, permitiendo que la amplificación se realice sobre el offset de *Vcc* medios (2,5V) y no sobre el valor DC. En la siguiente gráfica se encuentra la simulación de la etapa de preamplificación para verificar las ganancias y el comportamiento del condensador.



Gráfica 11. Simulación de la etapa de preamplificación

Se cambió R1 por una resistencia variable, para calibrar de forma exacta estas ganancias, dependiendo del ambiente en el que se encuentre la plataforma.

Se realizaron las pruebas de la etapa de preamplificación y se observó que las ganancias obtenidas no fueron las calculadas, por tal razón se calibraron estas ganancias, cambiando el valor de la resistencia variable (ver gráfica 12). Para la calibración se utilizó un pistófono SV 30A con un nivel de presión sonora a 94 dB (ver figura 46).

Figura 46. Calibración de la etapa de preamplificación con el pistófono de 94 dB.



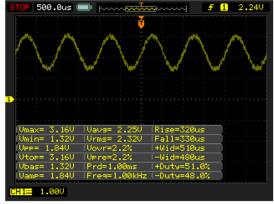


Gráfica 12. Etapas de preamplificación



a) 1ra etapa de amplificación

b) 2da etapa de amplificación



c) 3ra etapa de amplificación

## 4.2.3.2Filtrado antialiasing

Una vez la señal proveniente de los micrófonos es preamplificada, debe pasar por un filtro pasa bajos para evitar el fenómeno conocido como aliasing en el momento de realizar el muestreo en el microcontrolador.

Se decidió utilizar un TLC04CD, para evitar la implementación de este filtro mediante amplificadores operacionales. Este es un filtro de cuarto orden y solo requiere los componentes pasivos que se muestran en la figura 47; con la

resistencia y el condensador que no tienen valor, se determina la frecuencia del reloj (CLKR), siendo ésta 50 veces mayor que la frecuencia de corte, según especificaciones técnicas.

3 LS

VCC+

Level Shift

1 CLKIN

R
2 CLKR

Nonoverlapping Clock Generator

of AGND

Filter OUT

5

Nonoverlapping Clock Generator

of AGND

Filter OUT

See Note A

Figura 47. Circuito esquemático del filtro antialiasing

Fuente. Disponible en Texas Instruments, [Citado 04 de abril de 2013]. Disponible en internet: <a href="http://www.datasheetcatalog.org/datasheet2/0/017gpp7zgxr5aa76hw42ag2eoqfy.pdf">http://www.datasheetcatalog.org/datasheet2/0/017gpp7zgxr5aa76hw42ag2eoqfy.pdf</a>.

Inicialmente la idea era utilizar la frecuencia de corte hallada según el teorema de Nyquist así como se explicó...en la sección 2.2.4.1... pero ya que la señal se filtrará mejor antes de entrar al conversor análogo digital, se decidió establecer la frecuencia de corte en 3kHz.

# 4.2.3.3 Amplificación de ganancia programable

Se decidió implementar un amplificador de ganancia programable, para calibrar la última ganancia del sistema, dependiendo de las condiciones ambientales, el nivel de presión sonora y distancia de la fuente sonora, mediante software, sin tener que modificar el circuito.

Se utilizó un PGA (Programable Gain Amplifier) MCP6S21 con comunicación SPI (Serial Peripheral Interface) el cual brinda hasta ocho opciones de ganancia: +1, +2, +4, +5, +8, +10, +16 y +32 V/V.

## 4.2.4 Procesamiento digital de las señales

Para el procesamiento digital de las señales se decidió utilizar un DSC (Digital Signal Controller), principalmente por tener una arquitectura modificada para operaciones matemáticas complejas utilizadas en procesamiento digital, y por su bajo costo comparado con otras arquitecturas como los FPGA y procesadores como los ARM. A continuación se muestra una tabla comparativa de los diferentes tipos de DSP que el mercado ofrece.

Como parámetro de selección, el DSC debe tener un módulo de ADC (Analog Digital Converter) interno con cuatro canales simultáneos, para evitar implementar un módulo externo, comunicación SPI, UART (Universal Asynchronous Receiver/Transmitter) e I2C (Inter-Intergrated Circuit).

Tabla 11. Comparación de dispositivos con arquitectura DSP.

| Información del DSP                           | DSPIC30F4011  | MC56F8346VFVE              | DSPIC33EP32MC204 | DSPIC33EEP512MU814 |
|---|---------------|----------------------------|------------------|--------------------|
| Fabricante                                    | Microchip     | Freescale<br>Semiconductor | Microchip        | Microchip          |
| Tamaño de RAM                                 | 2 KB          | 4 KB                       | 4 KB             | 52 KB              |
| Tamaño de memoria<br>del programa             | 48 KB         | 128 KB                     | 32 KB            | 512 KB             |
| Ancho de bus de datos                         | 16 bit        | 16 bit                     | 16 bit           | 16 bit             |
| Frecuencia de reloj<br>máxima                 | 20 MHz        | 60 MHZ                     | 60 MHz           | 340 MHz            |
| ADC interno                                   | si            | si                         | si               | si                 |
| Canales ADC<br>simultáneos                    | 4             | 4                          | 4                | 4                  |
| Voltaje de alimentación                       | 2.5 V a 5.5 V | 3 V a 3.6 V                | 3.3 V            | 3 V a 3.6 V        |
| Millón de instrucciones<br>de dispositivo/seg | 30 MIPs       | 60 MIPs                    | 60 MIPs          | 70 MIPS            |
| Precio  | \$7.64 USD    | \$19.57 USD                | \$3.49 USD       | \$12.03 USD        |

Debido que los DSC de la familia de Microchip (dsPIC), son más sencillos de programar y se encuentran diferentes herramientas para el desarrollo de los filtros digitales, se descarta el uso del MC56F8346VFVE de Freescale Semiconductor. Por su rango de voltaje de alimentación y por ser comercial en Colombia se seleccionó el DSPIC30F4011, a pesar que los otros dos DSC de la familia 33 tuvieran mejores especificaciones.

#### 4.2.4.1 Frecuencia de muestreo

Se fijó la frecuencia de muestreo en 44kHz, siendo ésta la máxima que el dsPIC seleccionado puede alcanzar para poder muestrearlos cuatro canales simultáneos y guardar la información en la memoria RAM del mismo sin perder información.

Con la frecuencia de muestreo y las distancias entre los micrófonos, se determina cuántas muestras se van a obtener de las señales, despejando el tiempo en la ecuación (1). Para la distancia máxima (25 cm) entre dos micrófonos, el tiempo que tarda la señal en ir de un micrófono al otro es:

$$t = \frac{\lambda}{v} = \frac{0.25m}{344 \, m/s} = 0.72 \, ms$$

Obteniendo el tiempo anterior, se puede hallar el número de muestras para la distancia máxima, sabiendo que  $n_{ms}$  es el número de muestras por segundo.

$$n_m = \frac{t \cdot n_{ms}}{1s}$$

$$n_m = \frac{(0.72 \text{ ms}) \cdot 44000}{1s} = 31.9 \approx 32$$
(23)

Ahora para la distancia mínima (12,5 cm) entre dos micrófonos, el tiempo sería de:

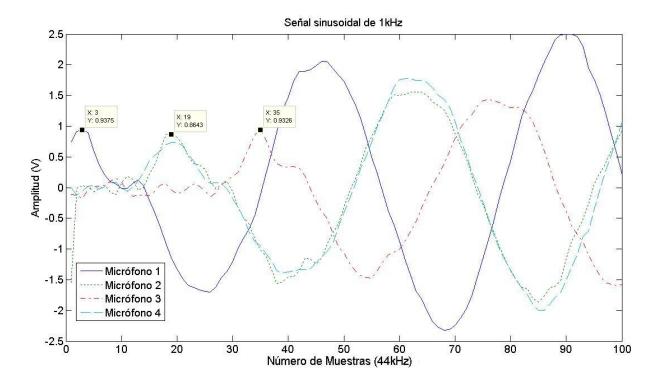
$$t = \frac{\lambda}{v} = \frac{0.125m}{344 \, m/s} = 0.3633 \, ms$$

Y el número de muestras para la distancia mínima es:

$$n_m = \frac{(0.3633 \, ms) \cdot 44000}{1s} = 15.9 \approx 16$$

En la siguiente gráfica se puede observar las señales de los cuatro micrófonos muestreadas a 44kHz en el dsPIC y el número de muestras entre las señales, las cuales concuerdan con lo anteriormente mencionado.

Gráfica 13. Señal sinusoidal de 1kHz capturada por los micrófonos

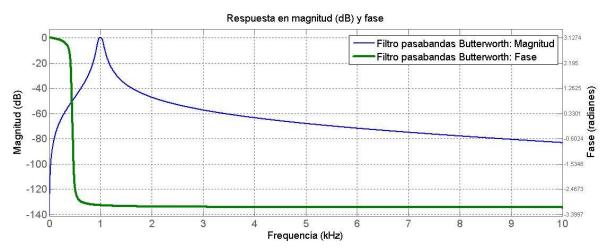


## 4.2.4.2 Filtrado digital

El objetivo de esta etapa es eliminar todas aquellas frecuencias que no son emitidas por la fuente sonora, para esto se decidió implementar un filtro IIR, si bien su fase no es lineal, esto no sería un problema, porque si en algún momento el filtro modifica la fase, lo haría para las cuatro señales y no afectaría la información. Adicionalmente con el filtro IIR, la capacidad de procesamiento requerida por el dsPIC es significativamente menor que si se implementara un FIR, dado que un filtro de características similares FIR tendría un orden mayor a 100.

Con la ayuda del FDATool (Filter Design & Analysis Tool) de Matlab®, se diseñó un filtro pasa bandas Butterworth de cuarto orden, escogido por su respuesta suave y sin rizado, a una frecuencia de muestreo de 44kHz,confrecuencias de corte de 950 Hz - 1050 Hz. La gráfica 14 muestra el filtro diseñado mediante la herramienta FDATool.

Gráfica 14. Respuesta del filtro pasa bandas Butterworth en magnitud y fase



A partir de los coeficiente arrojados por Matlab® se reconstruyo la función de transferencia del filtro.

A1 = -1.96792103 B1 = -1.9714764

A2 = 0.98960194 B2 = 0.99030487

GA = 0.00710414 GB = 0.00710414

$$G(z) = \left(\frac{1 - z^{-2}}{1 - 1.967921 \cdot z^{-1} + 0.989601 \cdot z^{-2}} \cdot 0.0071\right) \cdot \left(\frac{1 - z^{-2}}{1 - 1.971476 \cdot z^{-1} + 0.990304 \cdot z^{-2}} \cdot 0.0071\right) (24)$$

Con esta función de transferencia se realiza el análisis mediante el método de programación serie-estándar, con el objetivo de hallar las ecuaciones que se implementarán en el dsPIC.

$$G(z) = \frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{Y(z)}{H(z)} \cdot \frac{H(z)}{X(z)}$$
(25)

Se implementa para  $\frac{Y(z)}{H(z)}$ 

$$\frac{Y(z)}{H(z)} = \frac{0.0071 - 0.0071 \cdot z^{-2}}{1 - 1.967921 \cdot z^{-1} + 0.989601 \cdot z^{-2}}$$
(26)

Se expresa

$$\frac{Y(z)}{H(z)} = \frac{Y(z)}{P(z)} \cdot \frac{P(z)}{H(z)} \tag{27}$$

Donde

$$\frac{Y(z)}{P(z)} = 0.0071 - 0.0071 \cdot z^{-2} \tag{28}$$

$$\frac{P(z)}{H(z)} = 1 - 1.967921 \cdot z^{-1} + 0.989601 \cdot z^{-2}$$
 (29)

Por lo tanto

$$Y(z) = 0.0071 \cdot P(z) - 0.0071 \cdot z^{-2} \cdot P(z)$$
(30)

$$P(z) = H(z) + 1.967921 \cdot z^{-1} \cdot P(z) + 0.989601 \cdot z^{-2} \cdot P(z)$$
(31)

Realizando la antitransformada Z se obtiene:

$$Y(k) = 0.0071 \cdot P(k) - 0.0071 \cdot P(k-2) \tag{32}$$

$$P(k) = H(k) + 1.967921 \cdot P(k-1) + 0.989601 \cdot P(k-2)$$
(33)

Ahora se implementa para  $\frac{H(z)}{X(z)}$ 

$$\frac{H(z)}{X(z)} = \frac{0.0071 - 0.0071 \cdot z^{-2}}{1 - 1.971476 \cdot z^{-1} + 0.990304 \cdot z^{-2}}$$
(34)

Se expresa

$$\frac{H(z)}{X(z)} = \frac{H(z)}{Q(z)} \cdot \frac{Q(z)}{X(z)} \tag{35}$$

Donde

$$\frac{H(z)}{Q(z)} = 0.0071 - 0.0071 \cdot z^{-2} \tag{36}$$

$$\frac{Q(z)}{X(z)} = 1 - 1.971476 \cdot z^{-1} + 0.990304 \cdot z^{-2}$$
(37)

Por lo tanto

$$H(z) = 0.0071 \cdot Q(z) - 0.0071 \cdot z^{-2} \cdot Q(z)$$
(38)

$$Q(z) = X(z) + 1.971476 \cdot z^{-1} \cdot Q(z) - 0.990304 \cdot z^{-2} \cdot Q(z)$$
(39)

Realizando la antitransformada Z se obtiene:

$$H(k) = 0.0071 \cdot Q(k) - 0.0071 \cdot Q(k-2) \tag{40}$$

$$Q(k) = X(k) + 1.971476 \cdot Q(k-1) - 0.990304 \cdot Q(k-2)$$
(41)

Las ecuaciones finales a utilizar para implementar el filtro en el dsPIC son:

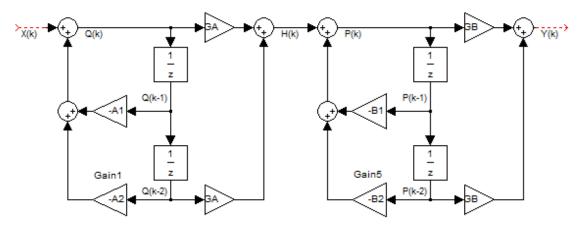
$$Q(k) = X(k) + 1.971476 \cdot Q(k-1) - 0.990304 \cdot Q(k-2)$$

$$H(k) = 0.0071 \cdot Q(k) - 0.0071 \cdot Q(k-2)$$

$$P(k) = H(k) + 1.967921 \cdot P(k-1) - 0.989601 \cdot P(k-2)$$

$$Y(k) = 0.0071 \cdot P(k) - 0.0071 \cdot P(k-2)$$

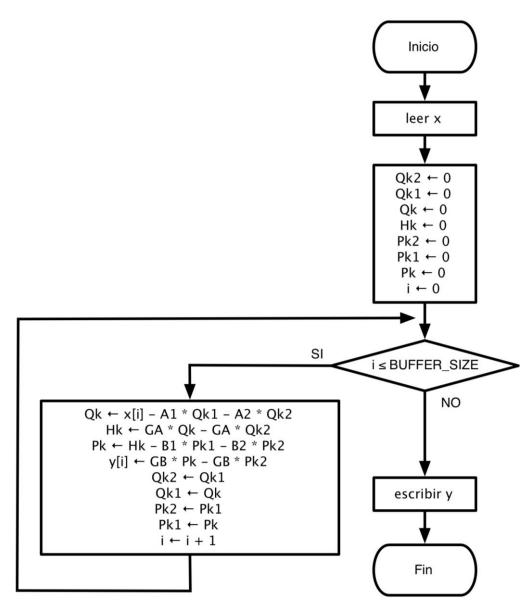
Figura 48. Diagrama de bloques del filtro IIR



Gracias a las ecuaciones obtenidas y al diagrama de bloques del filtro IIR se desarrolló un algoritmo para implementarlo al dsPIC (ver anexo 1). El diagrama de flujo del algoritmo generalizado del filtro IIR implementado se puede observar en la figura 49 donde las variables con nomenclatura k, representan los retardos y significan lo mismo que (k-i), por ejemplo Qk2 es igual que Q(k-2) tal como se muestran en las ecuaciones finales a implementar y en la figura 48. La variable BUFFER\_SIZE representa el tamaño del vector de la señal x, la variable *i* funciona como un contador para una estructura de programación (FOR) para recorrer el vector de la señal x, el resultado de la señal filtrada estará guardada en la variable *y*. Finalmente las ganancias están representadas por los coeficientes obtenidos de Matlab® y en el diagrama de flujo se muestran tal cual como se observa en el diagrama de bloques anterior.

Aplicando el filtro digital implementado a las señales adquiridas por los micrófonos (ver gráfica 13), se obtuvo las respuestas que se observan en la gráfica 15, demostrando que el filtro implementado funciona perfectamente, comparándolo con el filtro de Matlab®.

Figura 49. Diagrama de flujo del algoritmo del filtro IIR



Filtro implementado en el dsPIC 0.3 0.2 Micrófono 1 Amplitud (V) Micrófono 2 0.1 Micrófono 3 Micrófono 4 0 -0.1 -0.2 0 70 30 80 90 10 20 40 50 60 100 Número de Muestras (44kHz) Filtro de Matlab® 0.3 0.2 Micrófono 1 Amplitud (V) Micrófono 2 Micrófono 3 Micrófono 4 0 -0.1 -0.2 0 20 70 80

50

Número de muestras (44kHz)

60

90

100

Gráfica 15. Señales sinusoidales de 1kHz filtradas en el dsPIC y en Matlab®

Fuente. Autores

10

## 4.2.4.3 Cálculo de las diferencias de tiempos de llegada

30

40

Por la frecuencia de la fuente sonora y la distancia mínima entre dos micrófonos, se decidió utilizar el método de correlación cruzada, para hallar las diferencias de tiempos de llegada de los micrófonos, porque como se mencionó... en la sección 2.2.3.1...el método de diferenciación de cruces por cero funciona correctamente, cuando los micrófonos se encuentran a una distancia entre ellos menor a la longitud de media onda de la señal, situación que no sucede en este caso. Con la ecuación (11) se realizó el algoritmo de correlación cruzada que se implementará en el dsPIC (ver anexos 3, 4, 5 y 6).

Es importante aclarar que el algoritmo representado en el siguiente diagrama de flujo, calcula las diferencias de tiempo de llegada, determinando en que momento

la señal discreta X está más correlacionada con la señal discreta Y, siendo este punto de correlación máxima la diferencia de tiempo ( $\Delta Mx$ ).

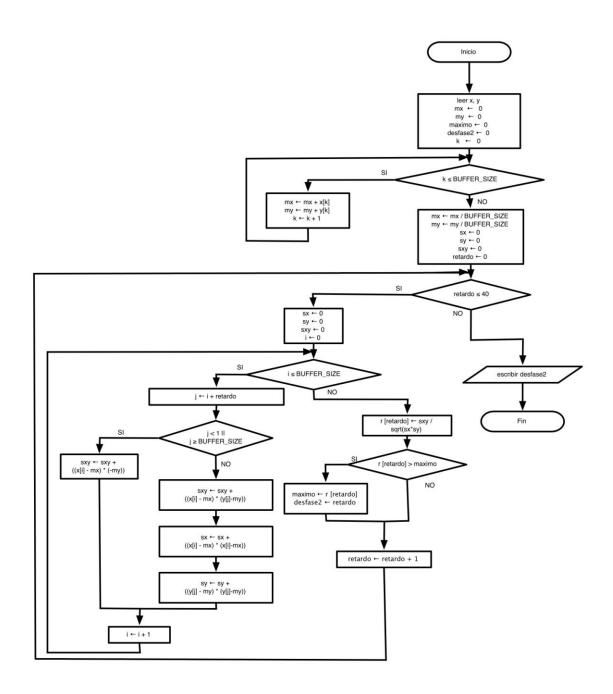
Adicionalmente, este algoritmo solo funciona para un retardo máximo de 40 muestras, con el fin de no requerir tanto recurso de memoria y procesamiento del dsPIC, y no calcula tiempos de llegada negativos, es decir que si la señal discreta *Y* llega antes que la señal *X* no funcionaría.

Antes de ser implementado al algoritmo al dsPIC, se probó en Matlab®, con las señales capturadas por los micrófonos en el estudio de grabación de la Universidad, arrojando esta prueba un resultado satisfactorio. A continuación se encuentra la tabla de las variables del diagrama de flujo de la correlación cruzada general.

Tabla 12. Variables del diagrama de flujo de la correlación cruzada general

| Variable        | Descripción  |
|-----------------|--|
| Х               | Señal discreta a correlacionar con respecto a Y                          |
| У               | Señal discreta   |
| mx              | Promedio de la señal x   |
| my              | Promedio de la señal y   |
| maximo          | Variable que guarda el valor máximo de la función de correlación         |
| desfase2        | Variable que guarda el argumento máximo de la función de correlación     |
| BUFFER_SIZE     | Tamaño de las señales discretas. En este caso son iguales                |
| retardo         | Contador que indica cual es el desfase que se calcula en el ciclo actual |
| sxy             | La sumatoria del todo el numerador de la ecuación (10)                   |
| sx y sy         | Las sumatorias de los dos términos del denominador de la ecuación(10)    |
| r               | La correlación de x, y   |
| i,j.k           | Contadores para estructura de tipo FOR                                   |
| Fuente: Autores |  |

Figura 50. Diagrama de flujo de una correlación cruzada general entre dos señales discretas X y Y.



## 4.2.4.4 Cálculo del ángulo de la fuente sonora con respecto a la plataforma móvil

Mediante un algoritmo de umbrales (ver anexo Y) se determina el micrófono que adquiere primero la señal, y mediante las diferencias de tiempos de llegada  $(\Delta Mx)$  (ver anexos 3, 4, 5 y 6) se conoce el segundo micrófono, se procede a calcular este ángulo según las ecuaciones de la tabla 3, para esto se requiere el número de muestras  $(n_m)$  mínimas, porque independientemente del ángulo en el que se encuentre la fuente sonora de la plataforma móvil, los dos micrófono que capturan primero la señal, nunca van a ser, los micrófonos ubicados a 25 cm (medida máxima). Cabe resaltar que este algoritmo calcula el valor cada tres grados, es decir, que si el grado actual donde se encuentra la plataforma móvil no es múltiplo de 3, éste será aproximado. Para entender mejor este proceso, se presenta el diagrama de flujo de la figura 51 y sus variables se explican en la tabla 13.

Tabla 13. Variables del diagrama de flujo de la correlación cruzada general

| Variable           | Descripción  |  |
|--------------------|--|--|
| llegueprimero      | Indica cuál de los micrófonos recibió la señal primero           |  |
| lleguesegundo      | Indica cuál de los micrófonos recibió la señal de segundas       |  |
| angulo             | Guarda el valor calculado del ángulo                             |  |
| muestrasdiferencia | Diferencia de muestras de la llegada de las dos primeras señales |  |
| Fuente: Autores    |  |  |

Inicio llegueprimero NO lleguesegundo == 2 ,SI angulo ← 45 - ((45 \* angulo ← 315 + ((45 \* muestrasdiferencia) / 16) muestrasdiferencia) / 16) NO lleguesegundo == 1 angulo ← 135 - ((45 \* angulo ← 45 + ((45 \* muestrasdiferencia) / 16) muestrasdiferencia) / 16) escribir angulo NO Fin lleguesegundo == 2 ,SI angulo ← 135 + ((45 \* angulo ← 225 - ((45 \* muestrasdiferencia) / 16) muestrasdiferencia) / 16) 4 NO lleguesegundo == 3 , SI angulo ← 225 + ((45 \* angulo ← 315 - ((45 \* muestrasdiferencia) / 16) muestrasdiferencia) / 16)

Figura 51. Diagrama de flujo del cálculo del ángulo

#### 4.2.5 Implementación del módulo de localización de la fuente sonora

El algoritmo de localización de la fuente sonora (ver anexo X), fue programado en el dsPIC30F4011, realizando una optimización con respecto a otros trabajos similares en Colombia y en el Mundo, debido a que se utilizó solamente 2K de memoria RAM, gracias al algoritmo del anexo Y, el cual permite grabar una pequeña muestra de la señal que es significativa para el desarrollo de este módulo, y además se realizó una mejora en el manejo de las variables y funciones del programa para ahorrar memoria RAM y Stack.

Todas las etapas de este módulo están implementadas en el siguiente PCB (ver figura 52), diseñada para dos capas con hueco pasante, teniendo en cuenta una arquitectura de pisos, lo cual ahorra área, minimiza espacio y facilita la manipulación de éstos. El circuito esquemático equivalente a este PCB se encuentra en el anexo S.

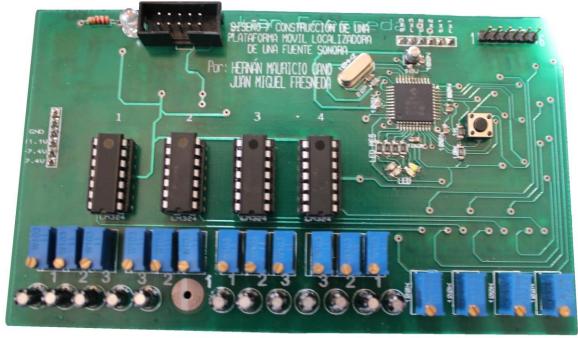
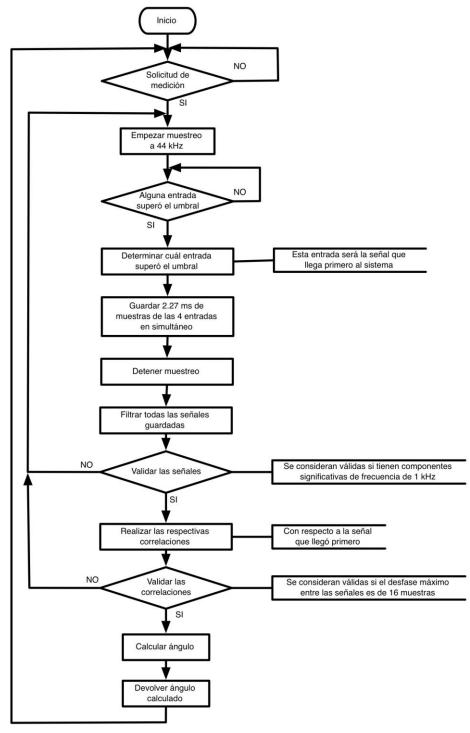


Figura 52. PCB del módulo de localización de la fuente sonora

Figura 53. Diagrama de flujo general de la implementación del sistema de localización de fuentes sonoras en el dsPIC



Como anteriormente se mencionó, el objetivo del sistema de localización de la fuente sonora es que se comporte como un sensor que adquiera señales de audio, y detecte el ángulo que se encuentra la fuente sonora con respecto al punto norte del sensor, por tal razón se construyo una hoja de especificaciones en la tabla 14.

Tabla 14. Hoja de especificaciones del sensor de localización de una fuente sonora

|                                  | Descripción  |
|----------------------------------|--|
| Especificaciones Generales       |  |
| Intervalo de mantenimiento       | No requiere mantenimiento                              |
| Entorno de operación             | Espacios cerrados y abiertos, residenciales o públicos |
| Frecuencia de operación          | 1kHz ± 50Hz  |
| Distancia de operación           | 50 cm a 10 mts   |
| Especificaciones de Medición     |  |
| Rango de operación               | 0° a 360°  |
| Alcance                          | 360°   |
| Tiempo de respuesta              | < 300ms  |
| Sensibilidad                     | 1% del valor medido                                    |
| Precisión                        | ±0.23% del valor medido                                |
| Incertidumbre                    | ±1.5°  |
| Exactitud                        | ±0.83%   |
| Error                            | ±0.23%   |
| Resolución                       | 3°   |
| Histéresis                       | No tiene   |
| Zona muerta                      | No tiene   |
| Repetitividad                    | ±0.91% del valor medido                                |
| Especificaciones Eléctricas      |  |
| Rango de alimentación            | 4.8V a 5V  |
| Consumo de corriente             | 250 mA   |
| Especificaciones de Comunicación |  |
| Tipo de comunicación             | UART y con posibilidad de expandirse a SPI e I2C       |
| Velocidad de transmisión         | 9600 bauds   |
| Fuente: Autores                  | •  |

El desarrollo de este módulo se logró sin usar periféricos externos como: conversor análogo digital, memorias, entre otros y sin implementar el algoritmo a un computador, situando este proyecto como un precedente en la Universidad al realizar todo un sistema de adquisición y procesamiento en cuatro canales simultáneos en un prototipo sin tener que depender de cualquier módulo de adquisición de datos.

## 4.3 MÓDULO DE UBICACIÓN DE LA PLATAFORMA MÓVIL

La función de este módulo es ubicar la plataforma móvil en el espacio, es decir, le indicará en que coordenadas se encuentra, midiendo el campo magnético terrestre y dependiendo de una comparación que se realiza con el ángulo hallado por el módulo de localización de la fuente sonora, ubica la plataforma móvil justo frente a la fuente.

Campo magnético terrestre

Medidor Magnético

Controlador Principal

Módulo de localización de la fuente sonora

Modulo de localización de la fuente sonora

Figura 54. Diagrama de bloques del módulo de ubicación

#### 4.3.1 Selección del medidor magnético

Para medir el campo magnético terrestre se decidió utilizar un compás digital CMPS10, por estar compensado en inclinación (si se inclina, el compás sigue funcionando), por su resolución de 0.1° y por sus diferentes formas de comunicación: UART, I2C y PWM.

Figura 55. Compás digital CMPS10



Fuente. Disponible en Sigma Electrónica. [Citado 08 de mayo de 2013]. Disponible en internet: <a href="http://www.sigmaelectronica.net/cmps10-p-1507.html">http://www.sigmaelectronica.net/cmps10-p-1507.html</a>

## 4.3.2 Algoritmo del módulo de ubicación

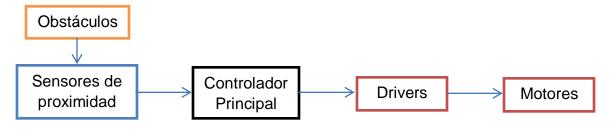
El algoritmo que se encuentra en el anexo 7, muestra como con base en el cálculo del ángulo y la medición del compás magnético la plataforma móvil gira hasta ubicarse en dirección hacia la fuente sonora. Primero el controlador principal le pide al dsPIC el ángulo entre la plataforma y la fuente sonora. Una vez recibido este dato, el controlador le pregunta al compás el ángulo de la plataforma con respecto al espacio, lo suma con el dato adquirido por el módulo de localización de la fuente sonora y le ordena a los drivers que accionen los motores para girar, hasta que el ángulo medido por el compás sea el mismo valor de la suma anterior. Cabe aclarar que este algoritmo solo se encarga de girar y ubicar la plataforma

hasta llegar al ángulo correcto, en donde ésta para y espera ser ordenado nuevamente por el controlador principal que se dirija hacia la fuente sonora.

# 4.4 MÓDULO DE EVASIÓN DE OBSTÁCULOS

En este módulo se considera un juego de sensores que detectarán los obstáculos y enviarán los datos a una entrada análoga del controlador principal. Una vez éste adquiera los datos, el controlador tomará decisiones de acuerdo al algoritmo y ejecutará las rutinas para el giro y velocidad de los motores.

Figura 56. Diagrama de bloques del módulo de evasión de obstáculos



Fuente. Autores

# 4.4.1 Selección del sensor de proximidad

Para la detección de los obstáculos, se pueden utilizar seis clases de sensores de proximidad: capacitivos, inductivos, magnéticos, interruptores de posición, fotoeléctricos y los ultrasónicos. Los tres últimos son los más utilizados para este tipo de aplicaciones (robótica móvil), gracias a su bajo costo en comparación de los otros.

Los sensores de proximidad de interruptor de posición, también llamados sensores "final de carrera", no son ideales para este proyecto, porque no tienen distancia de detección del obstáculo y eso perjudicaría a la plataforma en evadirlo; a pesar de

ser los sensores más económicos. Por el contrario los sensores ultrasónicos tienen bastante rango de detección, que puede ir desde 1 mm a 8 m, pero posee tres desventajas: su respuesta es relativamente lenta, son incapaces de detectar objetos que no se encuentran paralelos al mismo; causando dificultades en el caso que los obstáculos que se le presenten a la plataforma sean de forma inclinada, haciendo que se desvié el sonido, y la última es su alto costo con respecto a los sensores fin de carrera y a los fotoeléctricos.

Por las razones presentadas en el párrafo anterior, y gracias a su bajo costo y su rango de detección desde 10 cm hasta 150 cm, se decide utilizar los sensores fotoeléctricos, también llamados infrarrojos. En el mercado existen varias referencias de este tipo de sensor y básicamente se diferencian por el rango de detección. Se escogió el sensor SharpGP2Y0A21YK, por tener un bajo costo a comparación de los otros sensores de su misma especie, además tiene un rango de detección aceptable para la aplicación.

Tabla 15. Especificaciones técnicas del sensor de proximidad

| Nombre  | Sensor SharpGP2Y0A21YK      |  |  |  |
|---|-----------------------------|--|--|--|
| Distribuidor  | Seeed Studio                |  |  |  |
| Modelo  | SEN39046P                   |  |  |  |
| Tamaño  | 40,75 x 19 mm               |  |  |  |
| Peso  | 10 g                        |  |  |  |
| Rango de detección  | 10 a 80 cm                  |  |  |  |
| Área de detección   | 80 cm: Ø 12 cm              |  |  |  |
| Tiempo de respuesta   | 39 ms                       |  |  |  |
| Fuente: Disponible en Seeed Open Hardware Facilitator. [Citado 05   |                             |  |  |  |
| de marzo de 2013  | B]. Disponible en internet: |  |  |  |
| <a href="http://www.seeedstudio.com/depot/grove-80cm-infrared-proximity-sensor-p-788.html?cPath=144_149">http://www.seeedstudio.com/depot/grove-80cm-infrared-proximity-sensor-p-788.html?cPath=144_149</a> |                             |  |  |  |

## 4.4.2 Configuración de los sensores

La plataforma móvil no estará en la capacidad de dirigirse hacia atrás, por ende los sensores serán ubicados en la parte superior del chasis, dándole una visión de 180° a la plataforma.

Observando el área de detección del sensor y teniendo en cuenta los 180° de visión, se determinó mediante planos como el de la figura 57 que solo eran necesarios cinco sensores para lograr detectar el obstáculo, puestos a 45 grados entre ellos. Cabe resaltar que la distancia de detección del sensor será de 10 cm a 40 cm ya que el terreno que tiene que atravesar la plataforma para llegar hacia la fuente sonora es de máximo 8 m. Por el contrario si este rango es muy alto puede estar detectando dos obstáculos al mismo tiempo y eventualmente confundirse. Se puede observar en la figura 57 que los sensores alcanzan a detectar el obstáculo de 40x40x50 a una distancia de 40 cm.

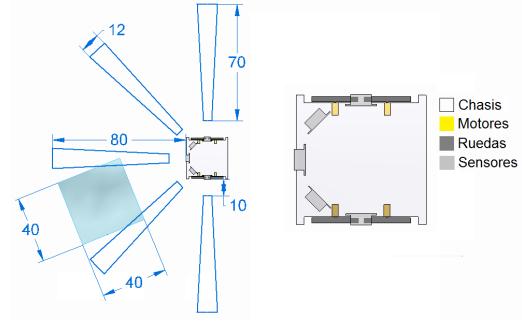
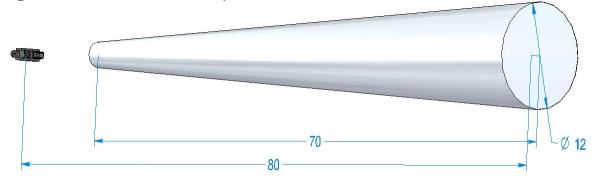


Figura 57. Configuración de los sensores de proximidad.

Los sensores estarán a una altura del suelo mínima de 12 cm, acatando las especificaciones técnicas, la cual dice que a una distancia de 80 cm, el sensor detectará en un diámetro de 12 cm. Se toma esta medida para que el sensor nunca detecte el suelo como un obstáculo.

Figura 58. Área del sensor de proximidad

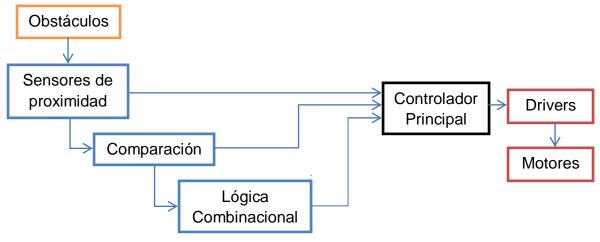


Fuente. Autores

# 4.4.3 Algoritmo de evasión de obstáculos

Se pensó inicialmente en desarrollar el algoritmo de evasión de obstáculos, mediante una rutina de interrupción del controlador principal, como se observa en el diagrama de bloques de la figura 59. Para esto, fue necesario convertir las señales análogas a señales digitales por medio de una comparación y realizar una etapa de lógica combinacional, con el objetivo que el controlador principal conociera si algún sensor había detectado un obstáculo.

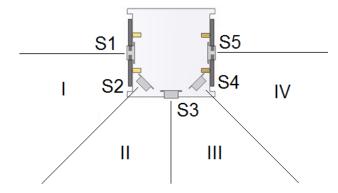
Figura 59. Diagrama de bloques del módulo de evasión de obstáculos propuesto



## 4.4.3.1 Desarrollo del algoritmo de evasión de obstáculos

Durante el desarrollo de este algoritmo se percibió que la función de interrupción no funcionó como se esperaba, debido a que todos los sensores estaban conectados a la misma entrada, produciendo una activación constante de ésta. Por esta razón se decidió utilizar solamente las señales análogas de los sensores, las cuales se compararon con el voltaje de referencia para identificar cuáles sensores estaban detectando el obstáculo y a su vez determinar, el sentido de giro y la velocidad de los motores para dirigir la plataforma móvil.

Figura 60. Nomenclatura de los sensores de proximidad

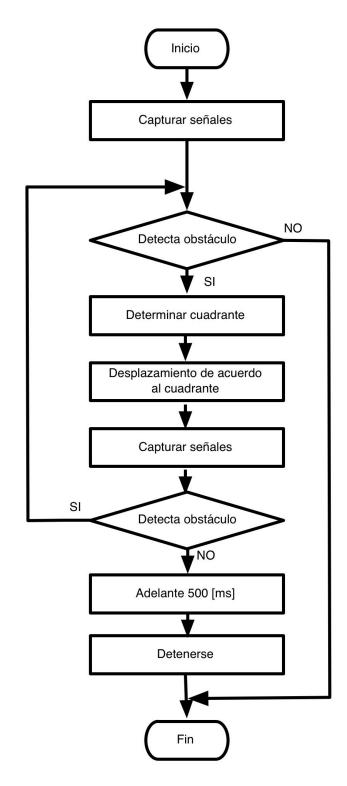


- Si el sensor 1 detecta un obstáculo, la velocidad de los motores izquierdos baja y los derechos suben, de esta forma se realiza un giro hacia la izquierda. En el caso de ser el sensor 5, la velocidad de los motores son inversas.
- Si los sensores de la sección I y el IV son los que están detectando, en general todos los motores giran más rápido que en el caso anterior. Si son los sensores 4 y 5, los motores derechos bajan la velocidad y los izquierdos suben, dando un giro hacia la derecha. En el caso se ser los sensores 1 y 3, la velocidad de los motores son inversas.
- Si los sensores de la sección II y III son los que están detectando, todos los motores giran más rápido que en los casos anteriores. Si los sensores 2 y 3 están activos, los motores izquierdos bajan la velocidad y los derechos suben, dando un giro hacia la izquierda. De igual forma si los sensores 4 y 3 son los que están detectando, la velocidad de los motores son inversas.
- En el caso de que solo el sensor 3 esté detectando, siempre los motores de la derecha van a bajar la velocidad y las izquierdas a subir, para que den un giro hacia la derecha.

Para explicar un poco mejor este proceso se presenta la figura 60, donde se nombran los sensores y las secciones, y el diagrama de flujo general del módulo en la figura 61. Adicional en el anexo 8, está el diagrama de flujo del proceso de la evasión de obstáculos implementado en el controlador principal.

Este algoritmo no tiene en cuenta un punto de llegada final, simplemente se encarga de localizar los obstáculos y evitar alguna colisión en todo momento, mientras la plataforma móvil se está dirigiendo hacia la fuente sonora. Cabe aclarar que si los sensores no detectan más obstáculos, la ésta se dirige hacia el frente durante 500ms, con el fin de salir del campo del obstáculo y tener una mejor posición para futuros movimientos. El circuito esquemático de este módulo se encuentra en el anexo V.

Figura 61. Diagrama de flujo general del módulo de evasión de obstáculos



#### 4.4.4 Algoritmo general del movimiento de la plataforma móvil.

Para este caso se decidió realizar una programación secuencial de eventos como se muestra en la figura 62, ya que no se planeó realizar el control de ninguna variable, y tampoco se proyectó una mejor precisión para el movimiento de la plataforma. En ésta se aprecia que el movimiento se divide en dos grandes partes, la primera descrita...en la sección 4.3.2...donde únicamente se pretende orientar la plataforma móvil en dirección a la fuente sonora. La segunda comprende el movimiento hacia adelante durante 3 segundos preguntando constantemente si se está detectando un obstáculo; si la respuesta es positiva entra al algoritmo de evasión descrito en la figura 61, en el caso que no detectará nada durante ese tiempo, la plataforma móvil se detiene y vuelve a comenzar el ciclo. Cabe aclarar que se tomó la decisión de detener la plataforma para obtener el ángulo con respecto a la fuente sonora, de esta manera evitando armónicos y vibraciones producidas por el movimiento de la misma y logrando de esta manera mediciones acertadas.

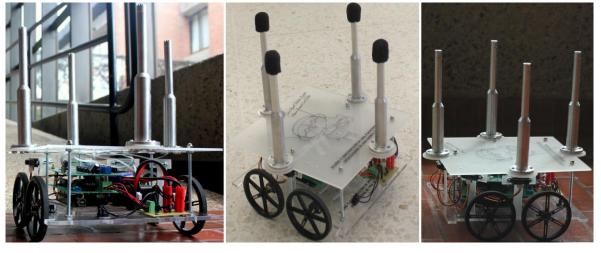
Inicio Obtener ángulo de la fuente Orientación de la plataforma móvil Adelante Iniciar contador de tiempo SI Evasión Detecta obstáculo NO NO contador de tiempo > [3 seg] SI Detenerse

Figura 62. Algoritmo general del movimiento de la plataforma móvil

#### 5. PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

En este capítulo se mostrará las pruebas de campo que se realizaron a la plataforma móvil con los módulos de localización de la fuente sonora, ubicación y evasión de obstáculos, para observar y analizar el comportamiento de cada uno de estos y del sistema integrado, y a su vez verificar que estén funcionando correctamente. En la siguiente figura se encuentra la plataforma móvil totalmente construida con todos sus módulos.

Figura 63. Plataforma móvil localizadora de una fuente sonora.



Fuente. Autores

Adicional a las pruebas mencionadas, se realizó otra, con el fin de comprobar si la plataforma móvil era capaz de subir una rampa de 20°. En el archivo adjunto "Prueba de inclinació.mp4" se muestra en video donde la plataforma sube una rampa con una inclinación de 25°, demostrando que el diseño para la selección de las ruedas y del motor fue el adecuado para cumplir este requerimiento.

# 5.1 PRUEBA DEL MÓDULO DE LOCALIZACIÓN DE LA FUENTE SONORA

El objetivo de esta prueba fue comprobar el funcionamiento del módulo. Se hicieron nueve círculos concéntricos con una separación de un metro y divididos cada 45°, en total setenta y dos puntos para las mediciones. La prueba consistió en poner la plataforma móvil a 0° de los círculos y mover la fuente sonora en cada punto de medición, obteniendo quince muestras en cada uno éstos, es decir, se tomaron mil ochenta muestras (1080). Los datos correspondientes de cada muestra (ver archivos adjuntos "Datos de las mediciones del módulo de localización de la fuente sonora.xlsx") fueron obtenidos y procesados por el dsPIC y transmitidos al computador por UART.

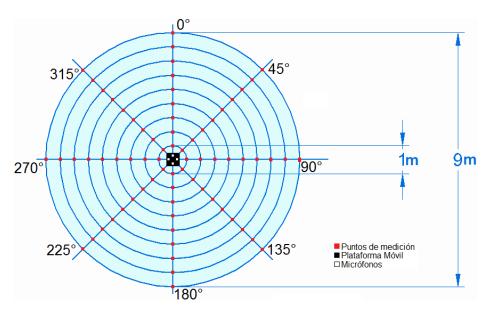


Figura 64. Plano de los puntos de medición

Fuente: Autores

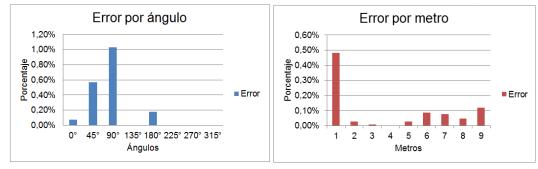
Las pruebas se realizaron con una fuente sonora a una frecuencia de 1kHz, calibrada a 97 dB con un decibelímetro a un metro de distancia.

Figura 65. Prueba de funcionamiento del módulo de localización de la fuente sonora



Tabulando los datos adquiridos en la prueba, se obtuvo un error relativo de 0.23% con respecto al ángulo. En la siguiente gráfica se muestra el porcentaje de error en cada ángulo y metro. Cabe resaltar que el error adquirido en los tres primeros grados fue a causa del ruido proveniente de la cancha contigua, durante la toma de estas muestras, así como lo demuestran los videos adjuntos "Toma de mediciones de la prueba del módulo de localización de la fuente sonora 1 y 2.mp4".

Gráfica 16. Error del módulo de localización de la fuente sonora



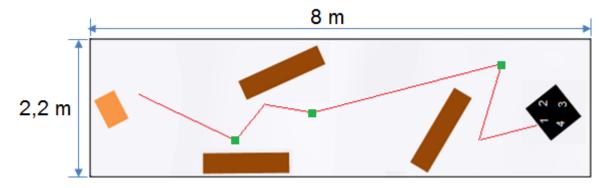
#### 5.2 PRUEBA DEL SISTEMA INTEGRADO

Las pruebas del sistema con todos los módulos integrados se realizaron en dos ambientes, uno abierto y otro cerrado, con una superficie lisa, que facilita el movimiento de las ruedas sobre todo en los giros, puesto que la calibración de la velocidad de los motores siempre se hicieron en este tipo de superficies. En el primer ambiente se realizó la prueba uno y las demás pruebas del dos al cinco, se hicieron en el ambiente 2.

Para poder analizar el comportamiento del sistema, se construyeron cinco escenarios diferentes, donde los obstáculos y la posición inicial de la plataforma cambian. Los obstáculos fueron de diferentes dimensiones y formas, con el objetivo de ratificar el buen funcionamiento del módulo de evasión de obstáculos.

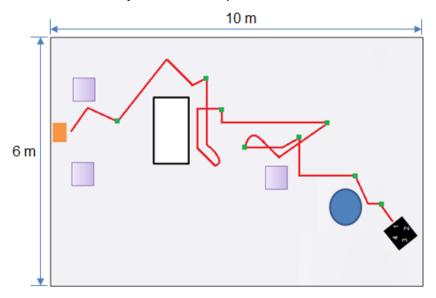
La primera prueba (ver archivo adjunto "Prueba del Sistema Integrado No 1.mp4") se realizó en un escenario con tres obstáculos, la distancia entre la fuente sonora y la plataforma móvil fue de 7 metros y el tiempo que tardó el trayecto fue de 22 segundos. En la figura 66 se encuentra la trayectoria efectuada por la plataforma móvil para llegar hasta la fuente sonora. El cuadrado negro es la plataforma, los números indican los micrófonos, los rectángulos café representan los obstáculos, el rectángulo naranja la fuente sonora, la trayectoria está señalada en rojo y los puntos verdes corresponden a las paradas que la plataforma hizo para escuchar la fuente sonora y ubicarse en el camino hacia ella nuevamente.

Figura 66. Prueba No 1: Trayectoria de la plataforma móvil en el escenario 1.



Como se puede observar en la figura anterior, la plataforma móvil alcanzó su objetivo sin ninguna colisión y sin mayores desviaciones durante su trayecto, en un tiempo de 24 segundos.

Figura 67. Prueba No 2: Trayectoria de la plataforma móvil en el escenario 2.



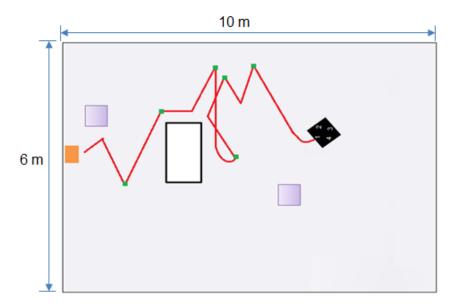
Fuente. Autores

La anterior prueba (ver archivo adjunto "Prueba del Sistema Integrado No 2.mp4") se realizó en el escenario número dos, ambiente de la prueba con cinco obstáculos de diferentes dimensiones y formas geométricas, con el fin de

incrementar el nivel de dificultad para la plataforma móvil, cuya trayectoria demoró 1: 30 minutos, sin ninguna colisión y con tan sólo un retroceso en la mitad de ésta. La distancia entre la plataforma y la fuente sonora fue de 9 metros.

La tercera prueba (ver archivo adjunto "Prueba del Sistema Integrado No 3.mp4") se efectuó en el escenario tres con sólo 3 obstáculos y la plataforma más cerca de la fuente sonora: a 6,30 metros. La trayectoria duró 42 segundos, sin ninguna colisión y aunque se observa en la figura 68 un retroceso, éste no realizado por mal cálculo del ángulo, sino porque detectó un obstáculo y tuvo que esquivarlo.

Figura 68. Prueba No 3: Trayectoria de la plataforma móvil en el escenario 3.



Fuente. Autores

La cuarta prueba (ver archivo adjunto "Prueba del Sistema Integrado No 4.mp4") se efectuó en el escenario cuatro, se unieron dos obstáculos para observar el comportamiento de la plataforma, además se colocó uno más cerca a la fuente sonora y se agregó otro en forma geométrica no definida. La distancia del recorrido fue de 7 metros nuevamente y con un tiempo de 1:02 minutos. En esta ocasión tampoco hubo colisiones, pero si hubo un retroceso debido al mal cálculo

del ángulo como se observa en la figura 69 en la segunda parada de la plataforma, es decir en el segundo punto verde, porque si el cálculo fuese sido el correcto, la plataforma no hubiera seguido derecho, sino que tendría que haber girado hacia la izquierda a buscar la fuente sonora.

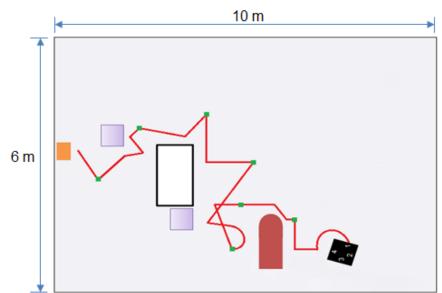


Figura 69. Prueba No 4: Trayectoria de la plataforma móvil en el escenario 4.

Fuente. Autores

La última prueba (ver archivo adjunto "Prueba del Sistema Integrado No 5.mp4") se realizó en el escenario quinto, se quitó el primer obstáculo de la prueba anterior, con el fin de ver si la plataforma cometía el mismo error de cálculo. La distancia nuevamente fue de 7 metros, con un tiempo de recorrido de 42 segundos. No hubo colisiones, pero la plataforma hizo un giro de 360 grados sobre su propio eje porque en el giro anterior, ésta se pasó del ángulo requerido.

6 m

Figura 70. Prueba No 4: Trayectoria de la plataforma móvil en el escenario 4.

El resultado de estas pruebas fue satisfactorio, a pesar que hubo algunos problemas con el cálculo del ángulo en algunas pruebas, la plataforma cumplió en las cinco pruebas con el objetivo que era llegar hasta donde se encontraba la fuente sonora y además lo realizó con buenos tiempos. Cabe resaltar que el ambiente dos, es uno de los laboratorios del cuarto piso del edificio GO de la Universidad, por ende las pruebas del 2 al 5 fueron expuestas al ruido de las personas tanto en los pasillos como en los otros laboratorios posiblemente con un alto componente armónico de 1kHz, lo que pudo haber causado que en estas pruebas la plataforma móvil tuviera retrocesos.

#### 6. RECOMENDACIONES

Aunque el desempeño de la plataforma móvil satisface los objetivos planteados en el anteproyecto, hay varios aspectos que se pueden mejorar, desde el punto de vista de precisión y rendimiento; esto con el fin de darle continuidad en futuros proyectos de grado.

Teniendo en cuenta lo expuesto...en la sección 5.1...el sistema de localización funciona adecuadamente, pero en las pruebas con todo el sistema se nota una leve imprecisión en la ubicación de la plataforma en el espacio, esto es debido a la gran cantidad de inercia que llevan los motores en el giro al momento de detenerse. Adicionalmente se decidió implementar un sistema de ubicación basado en un compás magnético, sin embargo se observaron fluctuaciones en su lectura debido a las vibraciones causadas por el movimiento de los motores. Para mejorar estos dos inconvenientes se recomienda cambiar el sistema de locomoción por un sistema omnidireccional síncrono, o realizar una variación de velocidad más completa que la implementada, es decir, sin necesidad de conmutar los motores, y aplicándole un valor DC proporcional a la velocidad.

Aunque el desarrollo de los algoritmos para la detección de la fuente sonora y la adquisición de las señales fue satisfactoria, para un desarrollo futuro se recomienda escoger la familia dsPIC33F, su bajo voltaje de alimentación, hace que se puedan obtener mayores velocidades disipando menor o igual potencia que la familia dsPIC30F, además posee por lo menos 48KB memoria RAM más que los de la familia dsPIC30F, logrando de esta manera una mayor velocidad para realizar operaciones, mayor frecuencia de muestreo, lo que se traduciría en una mejor precisión al detectar el ángulo. Además se sugiere implementar una fuente de precisión independiente para la referencia del conversor análogo digital, evitando fluctuaciones en la fuente y por ende logrando una mejor captura.

También se sugiere la realización de filtros contra el viento, para evitar lecturas erróneas causadas por la acción del mismo en las capsulas de los micrófonos en campo abierto. Se sugiere observar y caracterizar mejor este fenómeno y realizar pruebas a diferentes tipos de material para ver su comportamiento para cortar el viento a la capsula del micrófono.

#### 7. CONCLUSIONES

Se comprobó que el diseño de la plataforma móvil fue la correcta, teniendo en cuenta su buen funcionamiento en un terreno plano sin condiciones extremas, como; terrenos con mucho polvo, húmedos, escaleras y rampas con altas inclinaciones, a pesar que los motores usados resultaron tener un poco inercia en el momento de detenerse, lo que imposibilitó tener una mayor precisión al ubicar la plataforma con respecto al ángulo obtenido por el algoritmo de localización.

El sistema de localización de la fuente sonora se diseñó para trabajar en un plano 2D, obteniendo resultados satisfactorios con un error relativo de 0.23% en el cálculo del ángulo. Sus limitantes son el estrecho rango de frecuencia que puede detectar, la posibilidad de confundirse con un armónico en el ambiente, en el caso de que éste tenga una componente significativa de 1kHz y la poca precisión del cálculo del ángulo si se presentase una fuente sonora en un plano 3D.

Se estableció que el sistema de localización de la fuente sonora no capturará la señal proveniente de ésta en todo momento, con el fin de evitar vibraciones producidas por el terrero y posibles armónicos de los motores, los cuales podrían causar anomalías en el momento del cálculo del ángulo.

Debido a las características de los sensores utilizados, en cuanto al área de visión, la sensibilidad y la velocidad de procesamiento, junto al adecuado sistema de control, se logró detectar obstáculos de diferentes dimensiones y formas geométricas permitiéndole a la plataforma móvil cumplir con su objetivo sin colisionar, siendo esto evidenciado en las pruebas de campo con los diferentes escenarios.

Se logró implementar un sistema con características técnicas más bajas que los demás proyectos consultados, siendo atractivo para ser utilizado como un sensor, el cual es económico de fabricar, con una amplia gama de formas de comunicación con otros sistemas.

En cuanto al funcionamiento del proyecto, se realizaron pruebas de campo que comprobaron el buen desempeño de los módulos implementados, logrando que la plataforma móvil localizara la fuente sonora, se ubicara frente a ella y se dirigiera hasta su posición, evadiendo los obstáculos que se le presentara durante su trayectoria.

#### **BIBLIOGRAFÍA**

- [1] ÁLVAREZ, Jesús; LINDIG, Klauss y MARTÍNEZ, Gustavo. Implementación de filtros digitales tipo FIR en FPGA. <u>En</u>: POLIBIT: Research journal on computer science and computer engineering with applicatios. Vol. 37. Enero-junio. 2008. p. 83-87. ISBN 0-7803-7860-1.
- [2] ARAU.Higini. ABC de la acústica arquitectónica. Barcelona: Grupo Editorial CEAC S.A., 1ra Ed, 1999, 11 p. ISBN 84-329-2017-7.
- [3] ARGENTIERI, Sylvain; DANES, Patrick; SOUERES, Philippe y LACROIX, Pierre.An experimental testbed for sound source localization with mobile robots using optimized wideband beamformers. <u>En</u>: IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems. Edmonto, Canada. Agosto. 2005. p. 2536-2541. ISBN 0-7803-8912-3.
- [4] BARTÍ. Robert. Acústica medioambiental. San Vicente, España: Club Universitario, 1ra Ed, 2010, 113-114 p. ISBN 978-84-9948-020-6.
- [5] BARTLETT, Bruce. Stereo microphone techniques. Boston, Massachusetts: Focal Press, 1ra Ed, 1991, 44 p. ISBN 0240800761.
- [6] BERANEK. Leo L. Acoustics. Massachusetts: Acoustical Society of America, 1ra Ed, 1993, 144 p. ISBN 0-88318-494-X.
- [7] BERNSCHUTZ, Benjamin. Bandwidth extension for microphone arrays. <u>En</u>: Audio Engineering Society Convention. 2012.

- [8] BERTRAN. Eduard. Procesado digital de señales II. Barcelona: Ediciones UPC, 1ra Ed, 2005, 467 p. ISBN 978-84-8301-851-4.
- [9] BETANZOS, Wilbert. Construcción de robots autónomos multifunciones en ambientes semiconocidos. Trabajo de grado Licenciatura en Ingeniería en Sistemas Computacionales. Puebla, México: Universidad de las Américas Puebla, 2006. [Citado 21 de febrero de 2013]. Disponible en internet: <a href="http://catarina.udlap.mx/u\_dl\_a/tales/documentos/lis/betanzos\_m\_w/capitulo\_1.html">http://catarina.udlap.mx/u\_dl\_a/tales/documentos/lis/betanzos\_m\_w/capitulo\_1.html</a>
- [10] BLÁZQUEZ, Miguel. Teleoperación de robot antropomórfico docente teachmover mediante wimote. Trabajo de grado Ingeniería de Telecomunicaciones. Cartagena: Universidad Politécnica de Cartagena. Facultad de Ingeniería. 2012. 14 p. [Citado 10 de agosto de 2012]. Disponible en internet: <a href="http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/2728/1/pfc4261.pdf">http://repositorio.bib.upct.es/dspace/bitstream/10317/2728/1/pfc4261.pdf</a> >
- [11] BOLTON. W. Electrical and electronic measurement and testing. London: Longman Group UK Ltd, 1ra Ed, 1995, 46 p. ISBN 84-267-1032-8.
- [12] BOURKE, Paul. [Citado 01 de mayo de 2013]. Disponible en internet: <a href="http://paulbourke.net/miscellaneous/correlate/">http://paulbourke.net/miscellaneous/correlate/</a>
- [13] CALDERITA, Luis. Localización estereofónica en robots móviles. Trabajo de grado Ingeniería Informática, Cáceres, España: Universidad de Extremadura y Escuela Politécnica. Facultad de Ingeniería.
- [14] CELIS, Álvaro; NAVIA, Gustavo y VELÁSQUEZ, Carlos. Sistema acústico de navegación para robots móviles. Trabajo de grado Ingeniería Electrónica. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana. Facultad de Ingeniería. 2005.[Citado 29 de

julio de 2012]. Disponible en internet: <a href="http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/tesis97.pdf">http://www.javeriana.edu.co/biblos/tesis/ingenieria/tesis97.pdf</a>

[15] CHINCHILLA. Ryan. Salud y seguridad en el trabajo. San José, Costa Rica: Universidad Estatal a Distancia, 1ra Ed, 2002, 111 p. ISBN 978-9968-31-257-8.

[16] FAN, Jing; LUO, Qian y MA, Ding. Localization estimation of sound source by microphones array. En: 2010 Symposium on Security Detection and Information Processing. 2010. p. 312-317. ISSN: 1877-7058.

[17] GALLEGOS, Fabio y MONTALVO, Danilo. Diseño de una cámara anecoica y una cámara reverberante. Trabajo de grado Ingeniero en Electrónica y Telecomunicaciones. Quito: Escuela Politécnica Nacional. Facultad de Ingeniería. 2008. 15 p.

[18] GOLDSTEIN, Bruce. Sensation and perception. Canada: WadswothCengage Learning. 8 ed. 2009.291 p. ISBN 0-495-60149-7.

[19] GOMEZ. Emilia. Introducción al filtrado digital. Barcelona. Escuela Superior de Música de Catalunya, 2009, 7 p. [Citado 10 de diciembre de 2012]. Disponible en internet:<a href="http://www.dtic.upf.edu/~egomez/teaching/sintesi/SPS1/Tema7-FiltrosDigitales.pdf">http://www.dtic.upf.edu/~egomez/teaching/sintesi/SPS1/Tema7-FiltrosDigitales.pdf</a>

[20] GONZÁLEZ, Johanna; LÓPEZ, Mabel y GONZÁLEZ, D. Desarrollo de un sistema de visión artificial para el reconocimiento de placas en vehículos particulares. Trabajo de grado Ingeniería Mecatrónica. Bogotá D.C.: Universidad de San Buenaventura. Facultad de Ingeniería, 2008. [Citado 29 de julio de 2012]. Disponible en internet: <a href="http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/43331.pdf">http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/43331.pdf</a>

- [21] GONZÁLEZ. Mario. Inteligencia artificial en robots móviles de competencia para su aplicación en el diseño de un agente inteligente en un robot seguidor de trayectorias. Trabajo de grado Ingeniería en Robótica Industrial, México D.F.: Instituto Politécnico Nacional. Facultad de Ingeniería. 2009. 16-18 p. [Citado 21 de febrero de 2013]. Disponible en internet: <a href="http://itzamna.bnct.ipn.mx:8080/dspace/bitstream/123456789/2593/1/ROBOTSMOVILES.pdf">http://itzamna.bnct.ipn.mx:8080/dspace/bitstream/123456789/2593/1/ROBOTSMOVILES.pdf</a>
- [22] GONZÁLEZ, Víctor; MARTÍNEZ, Patricio; LÓPEZ, Marcelo; HERNÁNDEZ, Octavio y Souza, José. Simulación de trayectorias de un robot manipulador paralelo delta híbrido. <u>En</u>: XVII Congreso Internacional anual de la SOMIM. México. Septiembre. 2011. p. 1043-1051. ISBN 978-607-95309-5-2.
- [23] GUERRERO, Catalina; PINILLA, Oscar y PÁEZ, Juan. Desarrollo de un sistema de control y automatización del nivel de los monitores de un músico en un montaje de sonido en vivo mediante procesamiento de imagen. Trabajo de grado Ingeniería de Sonido Bogotá D.C.: Universidad de San Buenaventura. Facultad de Ingeniería, 2010.[Citado 29 de julio de 2012]. Disponible en internet: <a href="http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/59897.pdf">http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/59897.pdf</a>
- [24] HAUSMAN.Carl; BENOIT. Philip y ODONNELL. Lewis. Modern Radio Production.Wadsworth, 5ta Ed, 2000, 105-110 p. ISBN 0-534-56106-3.
- [25] HEFFNER, Henry y HEFFNER, R. Evolution of mammalian hearing. EN: 153<sup>rd</sup> meeting of the Acoustical Society of America. Junio. 2007.
- [26] International Federation of Robotics (IFR). World Robotics 2005: statistics, market analysis, forecast, case studies and profitability of robots investment. Geneva, Suiza: United Nations Publication, 1ra Ed, 2005, 27 p. ISBN 978-92-110-11-00-5.

- [27] JACKSON. Menaldy y A. Maria Cristina. La voz normal. Massachusetts: Médica Panamericana, 1ra Ed, 1992, 88-90 p. ISBN 978-950-06-1108-4.
- [28] JONES, T; LAWSON, S y MILLS, D. Interaction with a zoomorphic robot that exhibits canid mechanisms of behavior. <u>En</u>: IEEE international conference on robotics and automation ICRA. California. Mayo. 2008. p. 2128-2133. ISSN 1050-4729.
- [29] KANE. Joseph y STERNHEIM. Morton. Física. Barcelona: Reverte, 2da Ed, 2000, 491 p. ISBN 978-84-291-4318-8.
- [30] KANG, Eu-Young Elaine; COHEN, Isaac y MEDIONI, Gérard. Fast and robust 2D parametric image registration. EN: Instituteforrobotics and intelligent systems (IRIS). 2003. [Citado 10 de septiembre de 2012]. Disponible en internet: <a href="http://iris.usc.edu/outlines/papers/2003/kang-Registration2D.pdf">http://iris.usc.edu/outlines/papers/2003/kang-Registration2D.pdf</a>>
- [31] KANG, Jinman; COHEN, Isaac y MEDIONI, Gérard. Tracking objects from multiple and moving cameras. <u>En</u>: IEEE Intelligent distributed surveilliance systems. London. Febrero. 2004. p. 31-53. ISSN 0537-9989.
- [32] KUTTRUFF. Heinrich.Room Acoustics. New York: Spon Press, 4 Ed, 2000, 24 p.ISBN 978-0-419-24580-4.
- [33] LIU, Polley. Y MENG, Max. A bio-inspired sound location method. En: IEEE/ASME international conference on advanced intelligent mechatronics. Zúrich. Septiembre. 2007. p. 1-6. ISBN 978-1-4244-1263-1
- [34] LV, Xiaoling y ZHANG, Minglu. Sound source localization based on robot hearing and vision. <u>En</u>: 2008 International Conference on Computer Science and Information Technology. Singapore. 2008. p. 942-946. ISBN 978-0-7695-3308-7.

- [35] MARKOVI, Ivan y PETROVI, Ivan. Applying Von Mises distribution to microphone array probabilistic sensor modeling. En: 41<sup>st</sup>international symposium on robotics (ISR) and 6<sup>th</sup> German conference on robotics (ROBOTIK). Munich. Junio. 2010. p. 1-7. ISBN 978-3-8007-3273-9.
- [36] MARKOVIC, Ivan y PETROVIC, Ivan. Speaker localization and tracking with a microphone array on a mobile robot using Von Mises distribution and particle filtering. En: Journal of Robotics and Autonomous Systems. 2010, Vol 58. p. 1185-1196. ISSN: 0921-8890.
- [37] MERINO DE LA FUENTE. Jesús Mariano. Las vibraciones de la música. San Vicente, España: Club Universitario, 1ra Ed, 2007, 323 p. ISBN 978-8454-536-1.
- [38] MEYER, John. Nuestra cámara anecóica: agradecimientos por un cuarto muerto. [Citado 10 de diciembre de 2012]. Disponible en internet: <a href="http://www.meyersound.com/spanish/products/technology/chamber.htm">http://www.meyersound.com/spanish/products/technology/chamber.htm</a>
- [39] MINATO, Takashi; SHIMADA, Michihiro; ISHIGURO, Hiroshiy ITAKURA, Shoji. Development of an android robot for studying human-robot interaction. En: Innovations in applied artificial intelligence. Mayo, 2004, vol. 3029, p. 424-434. ISSN 0302-9743.
- [40] MURRAY, John; ERWIN, Harry y WERMTER, Stefan. Robotic sound-source localization and tracking using interaural time difference and cross-correlation. EN: Proceedings of neurobotics workshop. [Citado 09 de septiembre de 2012]. Disponible en Internet: <a href="http://iris.usc.edu/outlines/papers/2003/kang-Registration2D.pdf">http://iris.usc.edu/outlines/papers/2003/kang-Registration2D.pdf</a>

[41] NAKADAI, Kazuiro; HIDAI, Ken-Ichi; MIZOGUCHI, Hiroshi; OKUNO, Hiroshi y KITANO, Hiroaki. Human-robot interaction through real-time auditory and visual multiple-talker tracking. En: IEEE/RSJ proceedings of international conference on intelligent robots and systems. Maui, Hawaii.Vol. 3. 2001. p. 1402-1409. ISBN 0-7803-6612-3.

[42] NAKADAI, Kazuiro; HIDAI, Ken-Ichi; MIZOGUCHI, Hiroshi; OKUNO, Hiroshi y KITANO, Hiroaki. Real-time auditory and visual multiple-object tracking for humanoids. En: Proceedings of the 17<sup>th</sup> international joint conference on artificial intelligence. San Francisco, CA, USA. Vol. 2. 2001. p. 1425-1432. ISBN 1-55860-812-5.

[43] OROZCO, R; ARANDA, E y VALASCO, M. Modelado y control de un robot móvil para la tracción de n-remolques actuados. <u>En</u>: Información Tecnológica. 2003, vol. 14, p. 132. ISSN 0716-8756.

[44] PANCICH. Mario; PÉREZ. Karlos y TOVAR. Enrique. Robot móvil para exploración en lugares de difícil acceso para el ser humano. Trabajo de grado Ingeniería en Comunicaciones y Electrónica México D.F.: Instituto Politécnico Nacional. Facultad de Ingeniería. 2008. 76 p. [Citado 21 de febrero de 2013]. Disponible en internet: http://148.204.48.94:8080/dspace/bitstream/123456789/8535/1/2740\_tesis\_Febrer o\_2011\_1189501067.pdf

[45] PÉREZ. Constantino y ZAMANILLO. José. Fundamentos de televisión analógica y digital. Santander, España: Servicio de Publicaciones de la Universidad de Cantabria, 1ra Ed, 2003, 99 p. ISBN 978-84-8102-355-8.

- [46] PÉREZ. Constantino; SÁINZ DE LA MAZA. José y CASANUEVA. Alicia. Sistemas de telecomunicación. Santander, España: Ediciones UdC, 1ra Ed, 2007, 239-240 p. ISBN 978-84-8102-454-8.
- [47] POVEDA, Juan. Localización de fuentes sonoras mediante análisis de señales. Trabajo de grado Ingeniería de Sonido- Bogotá D.C.: Universidad de San Buenaventura. Facultad de Ingeniería. 2010. [Citado 29 de julio de 2012]. Disponible en internet: <a href="http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/60204.pdf">http://biblioteca.usbbog.edu.co:8080/Biblioteca/BDigital/60204.pdf</a>>
- [48] Procesado digital de señales. Bahía Blanca, Argentina: Ediciones UNS, 2011, 3-5 p. [Citado 10 de diciembre de 2012]. Disponible en internet:<a href="http://www.ingelec.uns.edu.ar/pds2803/Materiales/Cap07/07-Cap07.pdf">http://www.ingelec.uns.edu.ar/pds2803/Materiales/Cap07/07-Cap07.pdf</a>
- [49] Real Academia de la Lengua Española. [Citado 08 de septiembre de 2012]. Disponible en internet URL< http://lema.rae.es/drae/?val=Sonido >
- [50] RODEMANN, Tobias. A study on distance estimation in binaural sound localization. <u>EN</u>: IEEE/RSJ international conference on intelligent robots and systems (IROS). Taipei. Oct. 2010. p. 425-430. ISBN 978-1-4244-6674-0.
- [51] SAPOSHKOV. M. Electroacústica. Barcelona: Reverté, 2011, 102 p. ISBN 978-84-291-4350-8.
- [52] SOMOLINOS SÁNCHEZ. José. Avances en robótica y visión por computador. Cuenca: Ediciones de la Universidad de Castilla, 1ra Ed, 2002, 11 p. ISBN 84-8427-199-4.
- [53] SUN, Hao; YANG, Peng; ZU, Linan y XuQinqi. An auditory system of robot for sound source localization based on microphone array. En: IEEE Inter. Conf. on Robotics and Biomimetics (ROBIO), 2010. p. 629-632. ISBN 978-1-4244-9319-7.

[54] TRUJILLO, C. y García, J. Localización de fuentes sonoras por multilateración. En: Revista colombiana de física. Vol. 42, No. 3. 2010. p. 373-377. [Citado 29 de julio de 2012]. Disponible en internet: <revcolfis.org/ojs/index.php/rcf/article/download/420326/118 >

[55] VALIN, Jean; MICHAUD, Francois; ROUAT, Jean y LETOURNEAU.Dominic. Robust sound source localization using a microphone array on a mobile robot. En: IEEE/RSJ Proceedings of the international conference on intelligent robots and systems (IROS). Las Vegas, NV. USA. Vol.2. Octubre. 2003. p. 1228-1233. ISBN 0-7803-7860-1.

[56] WESTELIUS, Carl Johan. Preattentive gaze control for robot vision. Tesis de licenciatura. Oping, Sweden: Oping University. 1992. ISBN 91-7870-961-X.

L293B L293E

#### PUSH-PULL FOUR CHANNEL DRIVERS

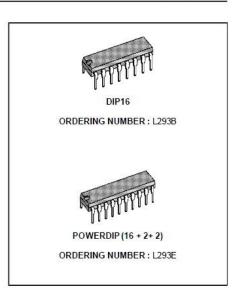
- OUTPUT CURRENT 1A PER CHANNEL
- PEAK OUTPUT CURRENT 2A PER CHANNEL (non repetitive)
- ÎNHIBIT FACILITY
- HIGH NOISE IMMUNITY
- SEPARATE LOGIC SUPPLY
- OVERTEMPERATURE PROTECTION

#### DESCRIPTION

The L293B and L293E are quad push-pull drivers capable of delivering output currents to 1A per channel. Each channel is controlled by a TTL-compatible logic input and each pair of drivers (a full bridge) is equipped with an inhibit input which turns off all four transistors. A separate supply input is provided for the logic so that it may be run off a lower voltage to reduce dissipation.

Additionally, the L293E has external connection of sensing resistors, for switchmode control.

The L293B and L293E are package in 16 and 20-pin plastic DIPs respectively; both use the four center pins to conduct heat to the printed circuit board.



#### **ELECTRICAL CHARACTERISTICS**

For each channel, V<sub>S</sub> = 24V, V<sub>SS</sub> = 5V, T<sub>amb</sub> = 25°C, unless otherwise specified

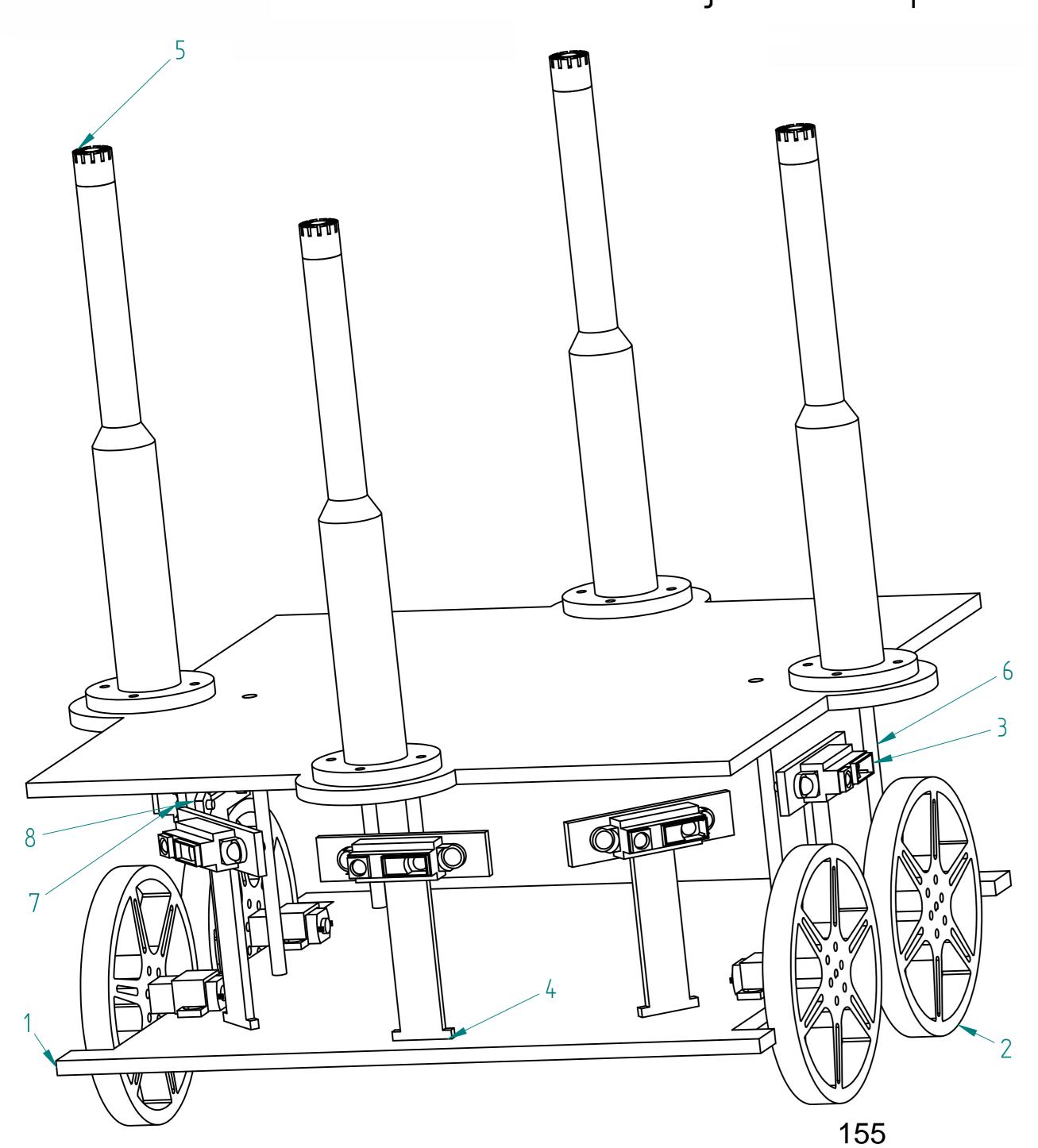
| Symbol              | Parameter                                | Test Conditions   | Min.       | TYp.           | Max.                 | Unit |
|---------------------|--|---|------------|----------------|----------------------|------|
| Vs                  | Supply Voltage                           |   | Vss        |                | 36                   | ٧    |
| Vss                 | Logic Supply Voltage                     |   | 4.5        |                | 36                   | ٧    |
| Is                  | Total Quiescent Supply Current           | $ \begin{array}{cccc} V_i = L & I_o = 0 & V_{inh} = H \\ V_i = H & I_o = 0 & V_{inh} = H \\ V_{inh} = L \end{array} $ |            | 2<br>16        | 6<br>24<br>4         | mA   |
| I <sub>SS</sub>     | Total Quiescent Logic Supply Current     |   |            | 44<br>16<br>16 | 60<br>22<br>24       | mA   |
| ViL                 | Input Low Voltage                        |   | -03.       |                | 1.5                  | ٧    |
| ViH                 | Input High Voltage                       | V <sub>SS</sub> ≤ 7V<br>V <sub>ss</sub> > 7V  | 2.3<br>2.3 |                | V <sub>ss</sub><br>7 | ٧    |
| liL                 | Low Voltage Input Current                | V₁ = 1.5V   |            |                | -10                  | μА   |
| I <sub>iH</sub>     | High Voltage Input Current               | 2.3V ≤ V <sub>IH</sub> ≤ V <sub>ss</sub> - 0.6V   |            | 30             | 100                  | μА   |
| VinhL               | Inhibit Low Voltage                      |   | -0.3       |                | 1.5                  | ٧    |
| $V_{\text{inhH}}$   | Inhibit High Voltage                     | V <sub>SS</sub> ≤ 7V<br>V <sub>ss</sub> > 7V  | 2.3<br>2.3 |                | V <sub>ss</sub>      | ٧    |
| linhL               | Low Voltage Inhibit Current              | V <sub>inhL</sub> = 1.5V  |            | -30            | -100                 | μА   |
| linhH               | High Voltage Inhibit Current             | 2.3V ≤ V <sub>inh H</sub> ≤ V <sub>ss</sub> - 0.6V  |            |                | ±10                  | μΑ   |
| V <sub>CEsatH</sub> | Source Output Saturation Voltage         | I <sub>o</sub> = -1A  |            | 1.4            | 1.8                  | ٧    |
| $V_{CEsatL}$        | Sink Output Saturation Voltage           | I <sub>o</sub> = 1A   |            | 1.2            | 1.8                  | ٧    |
| V <sub>SENS</sub>   | Sensing Voltage (pins 4, 7, 14, 17) (**) |   |            |                | 2                    | ٧    |
| tr                  | Rise Time                                | 0.1 to 0.9 V <sub>o</sub> (*)   |            | 250            |                      | ns   |
| tf                  | Fall Time                                | 0.9 to 0.1 V <sub>o</sub> (*)   |            | 250            | į.                   | ns   |
| ton                 | Turn-on Delay                            | 0.5 V <sub>i</sub> to 0.5 V <sub>o</sub> (*)  |            | 750            |                      | ns   |
| toff                | Turn-off Delay                           | 0.5 V <sub>i</sub> to 0.5 V <sub>o</sub> (*)  |            | 200            |                      | ns   |

<sup>\*</sup> See figure 1

\*\* Referred to L293E

Fuente: Disponibe en SGS-Thomson Microelectronics. [Citado 21 de febrero de 2013]. Disponible en internet : http://www.datasheetcatalog.org/datasheet/stmicroelectronics/1330.pdf

### Anexo B. Conjunto de la plataforma móvil



| Número de la Pieza | Número del Plano | Nombre de la pieza               | Cantidad | Material      |
|--------------------|------------------|----------------------------------|----------|---------------|
| 1                  | Plano 2          | Base inferior                    | 1        | Acrílico liso |
| 2                  | Plano 3          | Conjunto acople motor y rueda    | 4        |               |
| 3                  | Anexo H          | Sensor de proximidad             | 5        |               |
| 4                  | Plano 4          | Soporte del sensor de proximidad | 5        |               |
| 5                  | Plano 6          | Conjunto de la parte superior    | 1        |               |
| 6                  |                  | Tornillos M 4.6 L 93mm           | 5        |               |
| 7                  |                  | Tornillos M 3                    | 10       |               |
| 8                  |                  | Tuercas M 3                      | 10       |               |



UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA MECATRÓNICA

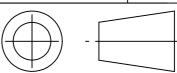
TITULO: Conjunto de la plataforma móvil

AUTORES: Hernán M. Cano y Juan M. Fresneda

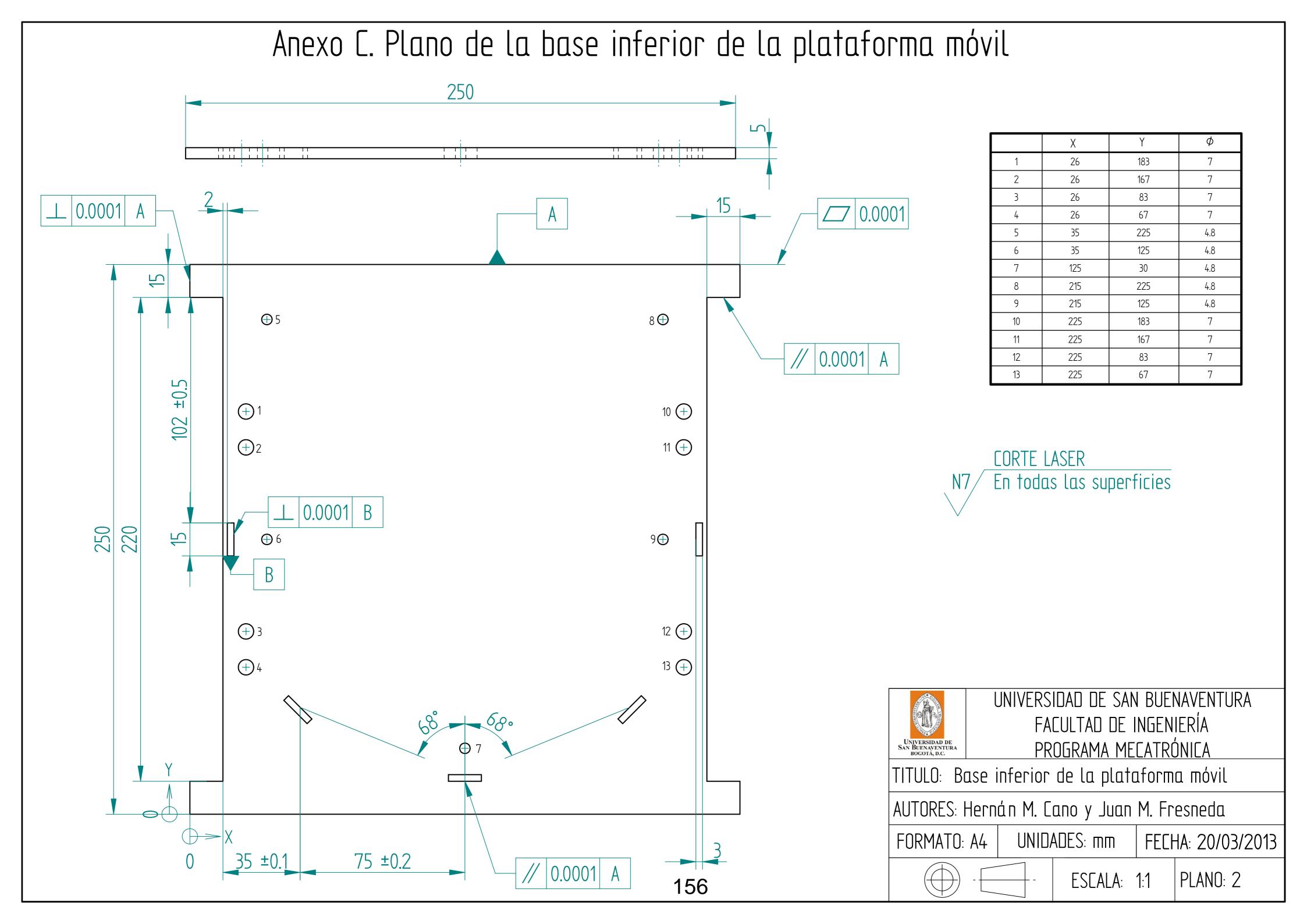
FORMATO: A4

UNIDADES: mm

FECHA: 20/03/2013

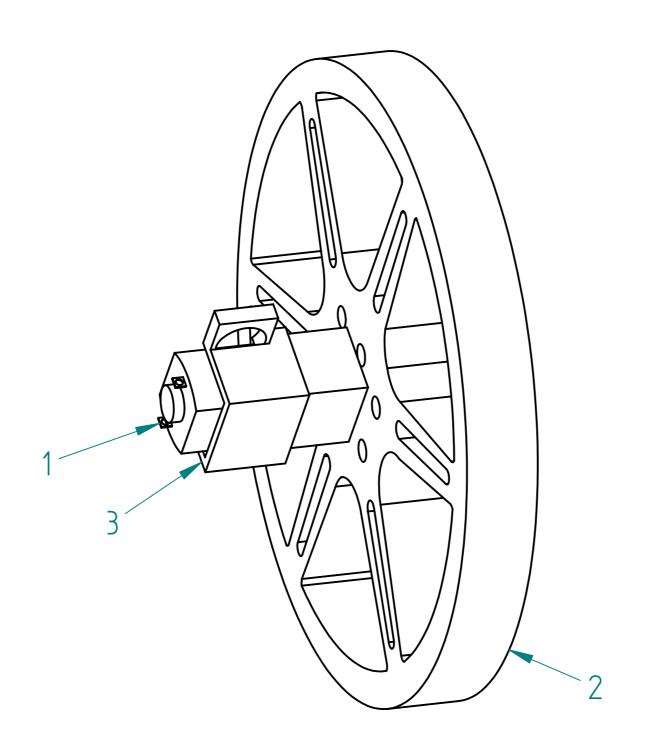


ESCALA: 1:1



#### Anexo D. Conjunto del acople del micromotor y la rueda

| Número de pieza | Número del plano | Nombre de la pieza     | Cantidad |
|-----------------|------------------|------------------------|----------|
| 1               | Anexo E          | Micromotor             | 1        |
| 2               | Anexo F          | Rueda                  | 1        |
| 3               | Anexo G          | Soporte del micromotor | 1        |
|                 |                  |                        |          |
|                 |                  |                        |          |





UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA MECATRÓNICA

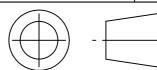
TITULO: Conj. del acople del micromotor y la rueda

AUTORES: Hernán M. Cano y Juan M. Fresneda

FORMATO: A4

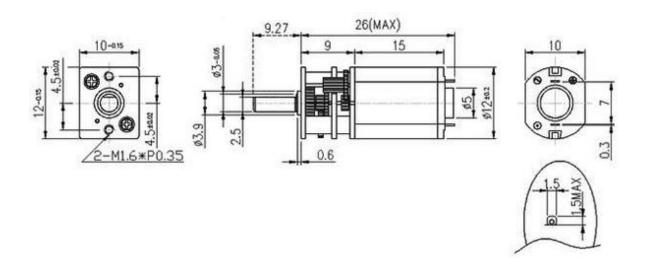
UNIDADES: mm

FECHA: 20/03/2013



ESCALA: 2:1

Anexo E. Planos del micromotor



Fuente: Disponibe en SparkfunElectronics. [Citado 21 de febrero de 2013]. Disponible en internet :<a href="https://www.sparkfun.com/products/8910">https://www.sparkfun.com/products/8910</a>

3/8" 3/8" 1/2"

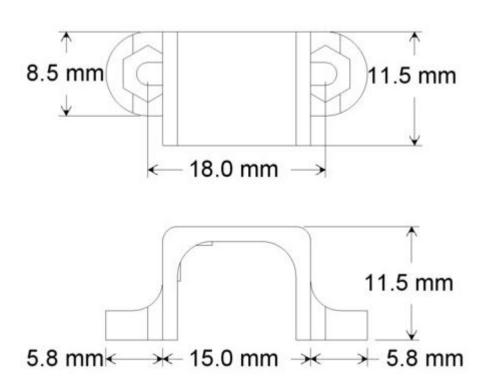
Anexo F. Plano de la Rueda Pololu

Fuente: Disponibe en Pololu Robotics and Electronics. [Citado 21 de febrero de 2013]. Disponible en internet :<a href="http://www.pololu.com/picture/view/0J2573">http://www.pololu.com/picture/view/0J2573</a>>

Ø 86.5mm

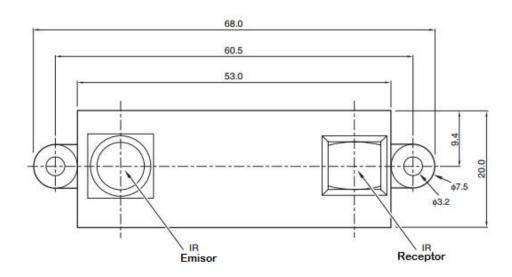
10mm 11.8mm

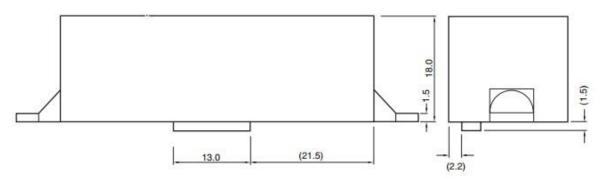
Anexo G. Plano del soporte del micromotor



Fuente: [Citado 20 de abril de 2013]. Disponible en internet: <a href="http://www.pololu.com/picture/view/0J771">http://www.pololu.com/picture/view/0J771</a>

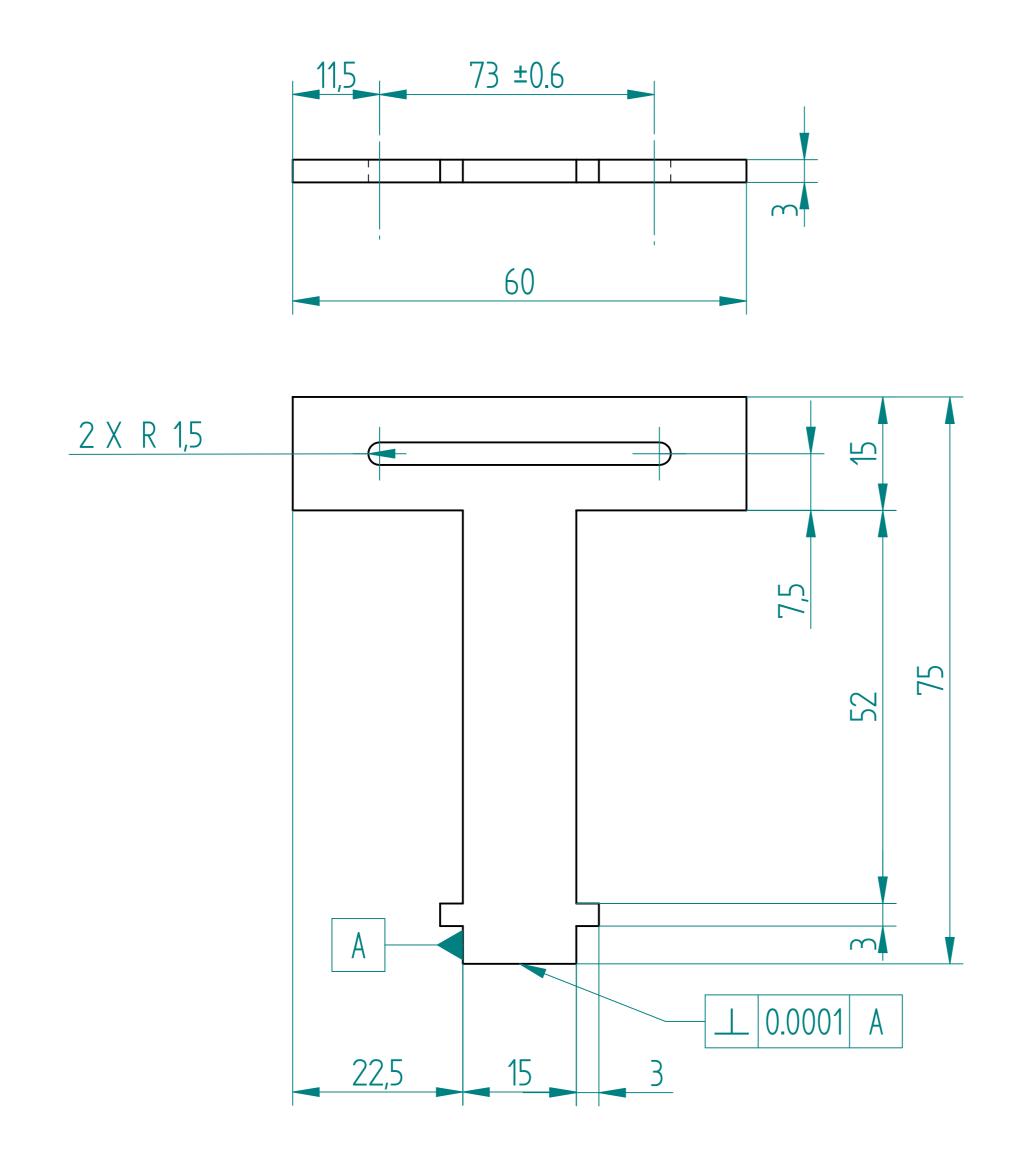
Anexo H. Plano del sensor de proximidad

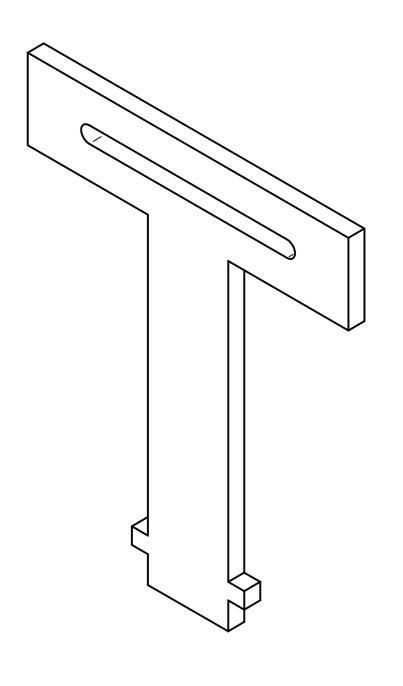




Fuente: [Citado 20 de abril de 2013]. Disponible en internet: <a href="http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/207652/SHARP/GP2Y3A003K0F.html">http://pdf1.alldatasheet.com/datasheet-pdf/view/207652/SHARP/GP2Y3A003K0F.html</a>

#### Anexo I. Plano del soporte del sensor de proximidad









UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA MECATRÓNICA

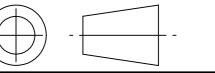
TITULO: Soporte del sensor de proximidad

AUTORES: Hernán M. Cano y Juan M. Fresneda

FORMATO: A4

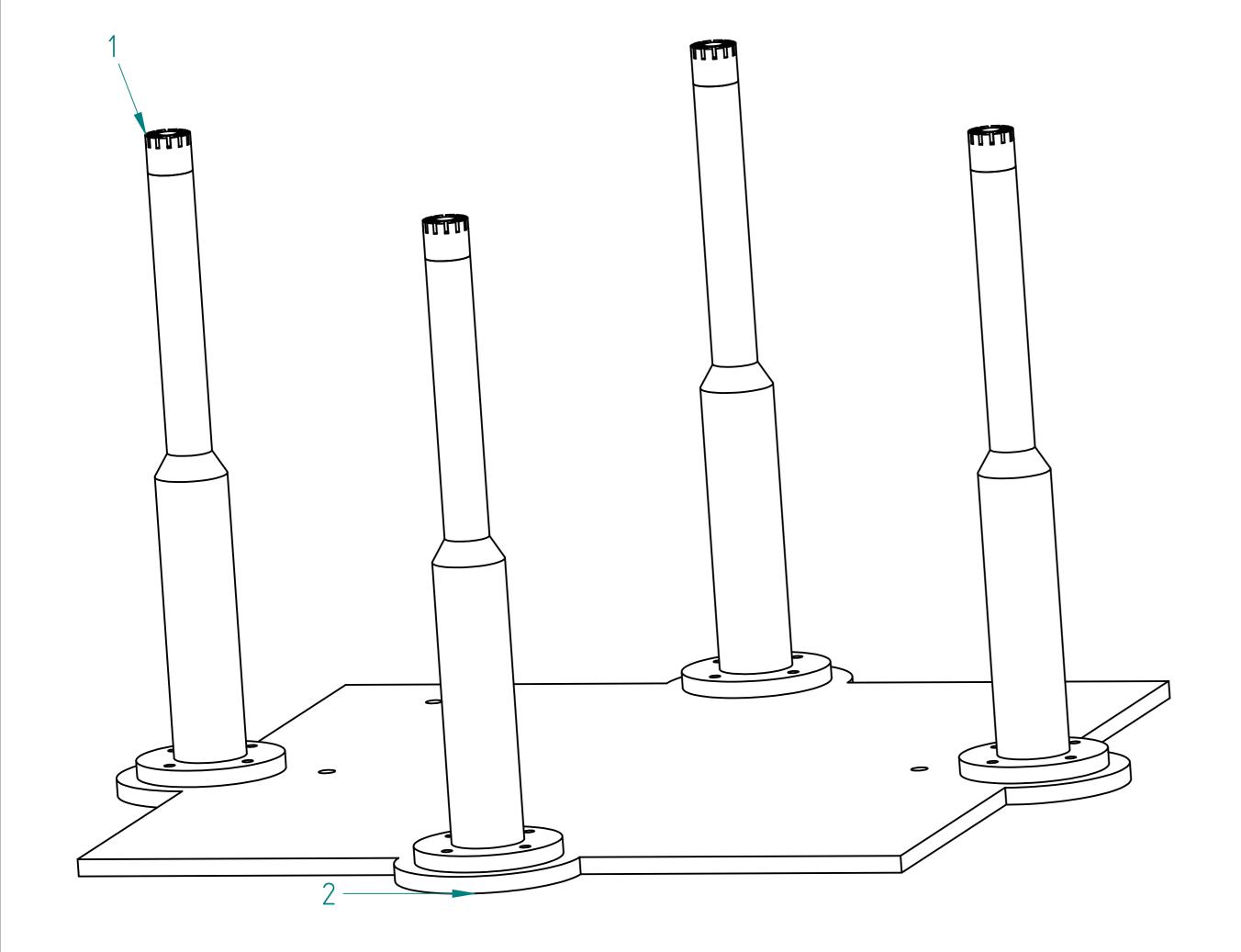
UNIDADES: mm

FECHA: 20/03/2013



ESCALA: 2:1

### Anexo J. Conjunto de la parte superior de la plataforma móvil



| Número de pieza | Número del plano | Nombre de la pieza     | Cantidad | Material      |
|-----------------|------------------|------------------------|----------|---------------|
| 1               | Plano 6          | Conjunto del micrófono | 4        |               |
| 2               | Plano 11         | Base superior          | 1        | Acrílico liso |



UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA MECATRÓNICA

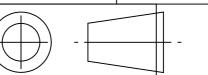
TITULO: Conj. parte superior de la plataforma móvil

AUTORES: Hernán M. Cano y Juan M. Fresneda

FORMATO: A4

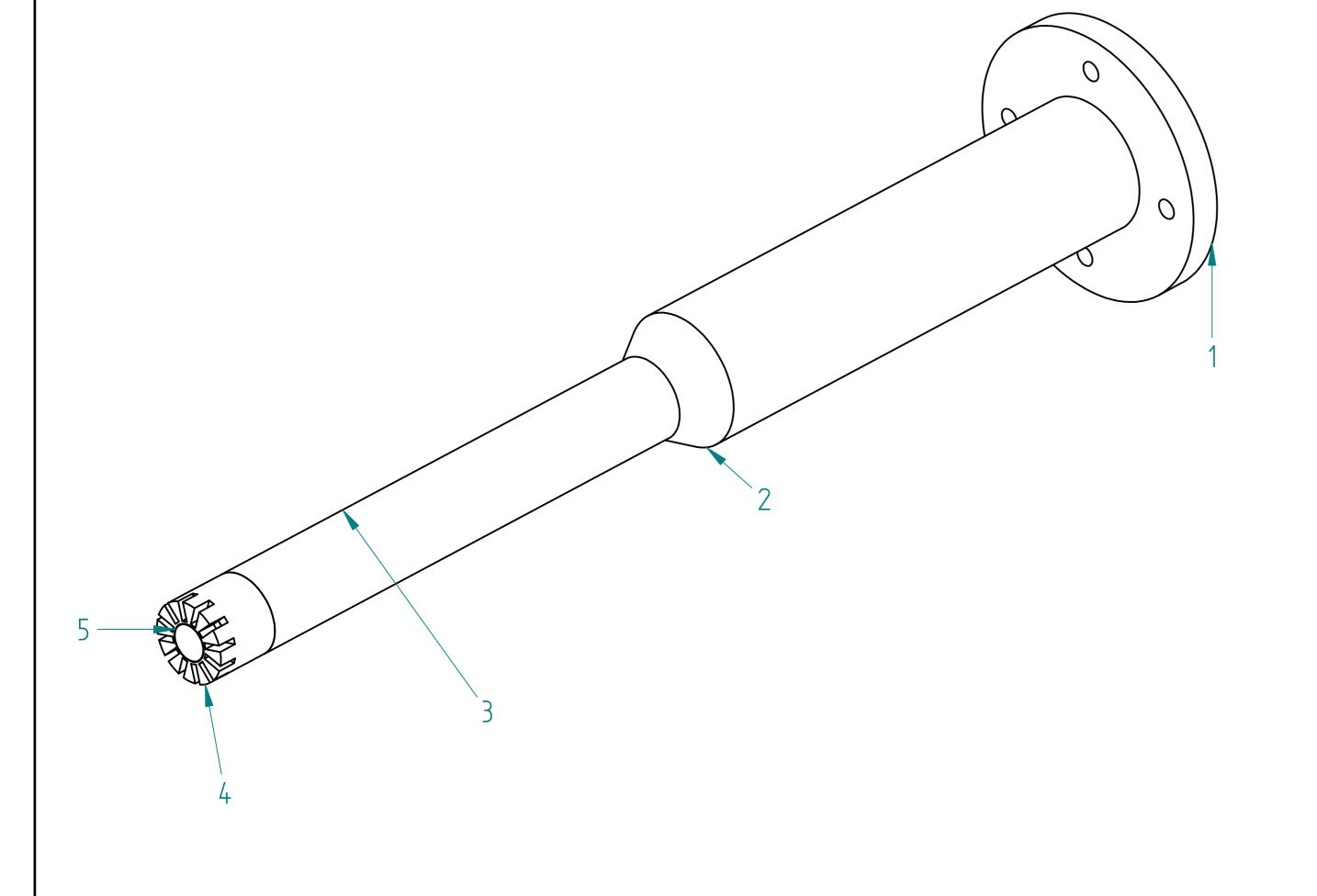
UNIDADES: mm

FECHA: 20/03/2013



ESCALA: 1:1

### Anexo K. Conjunto del micrófono



| Número<br>de la<br>pieza | Número del plano | Nombre de la pieza | Cantidad | Material        |
|--------------------------|------------------|--------------------|----------|-----------------|
| 1                        | Plano 7          | Base               | 1        | Aluminio AA6261 |
| 2                        | Plano 8          | Cuerpo bajo        | 1        | Aluminio AA6261 |
| 3                        | PLano 9          | Cuerpo alto        | 1        | Aluminio AA6261 |
| 4                        | Plano 10         | Cabeza             | 1        | Aluminio AA6261 |
| 5                        | Anexo P          | Cápsula            | 1        |                 |



UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA MECATRÓNICA

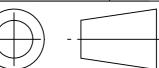
TITULO: Conjunto del micrófono

AUTORES: Hernán M. Cano y Juan M. Fresneda

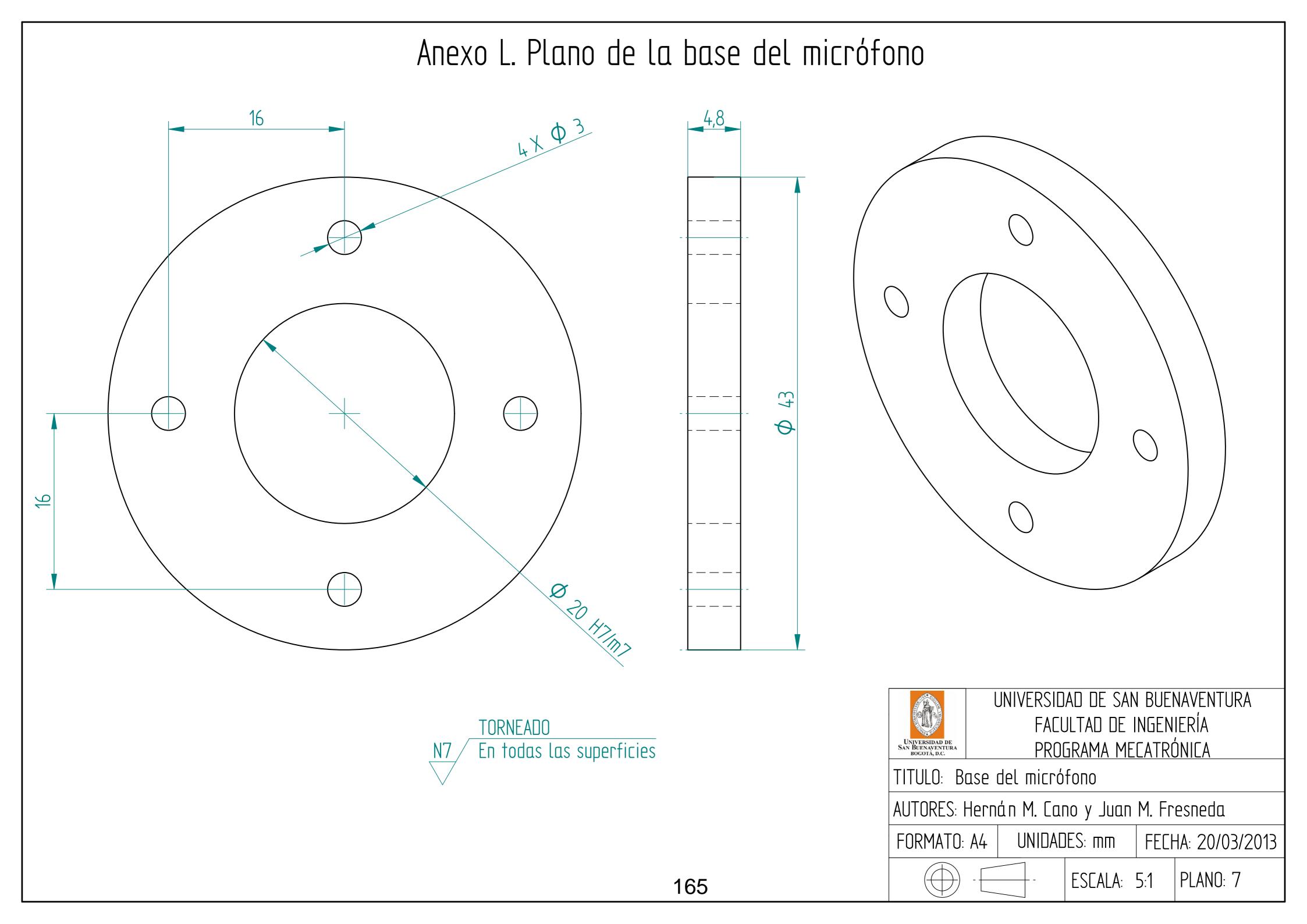
FORMATO: A4

UNIDADES: mm

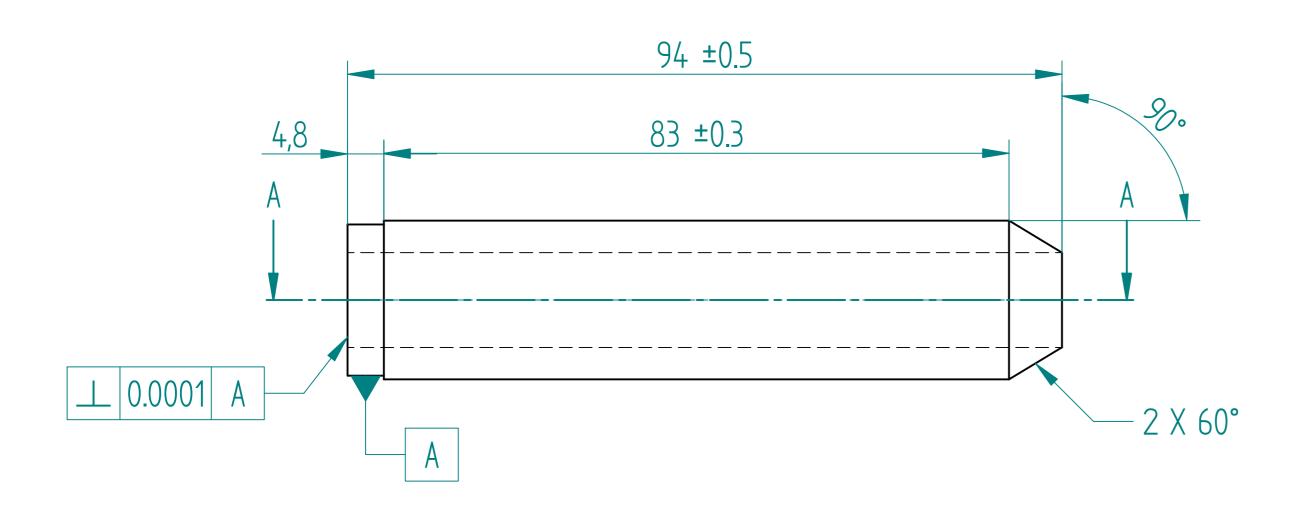
FECHA: 20/03/2013

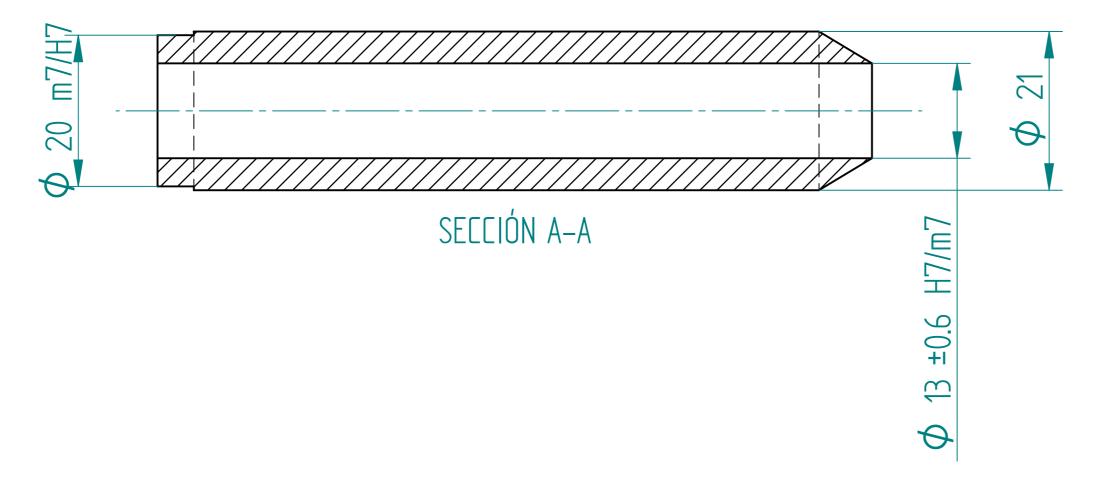


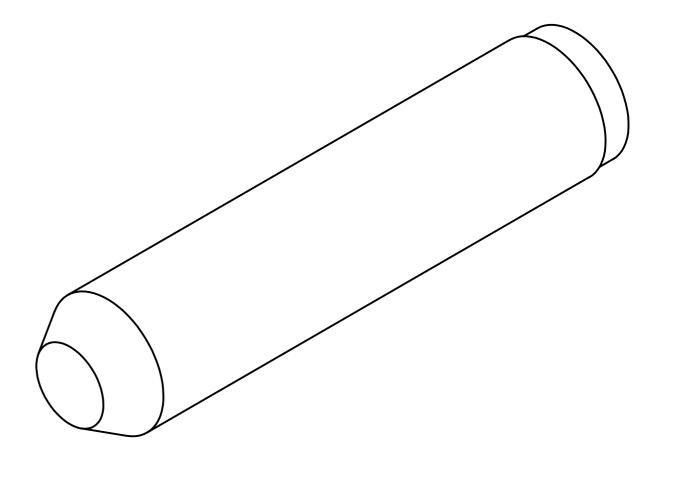
ESCALA: 2:1



### Anexo M. Plano del cuerpo bajo del micrófono











UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA MECATRÓNICA

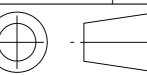
TITULO: Cuerpo bajo del micrófono

AUTORES: Hernán M. Cano y Juan M. Fresneda

FORMATO: A4

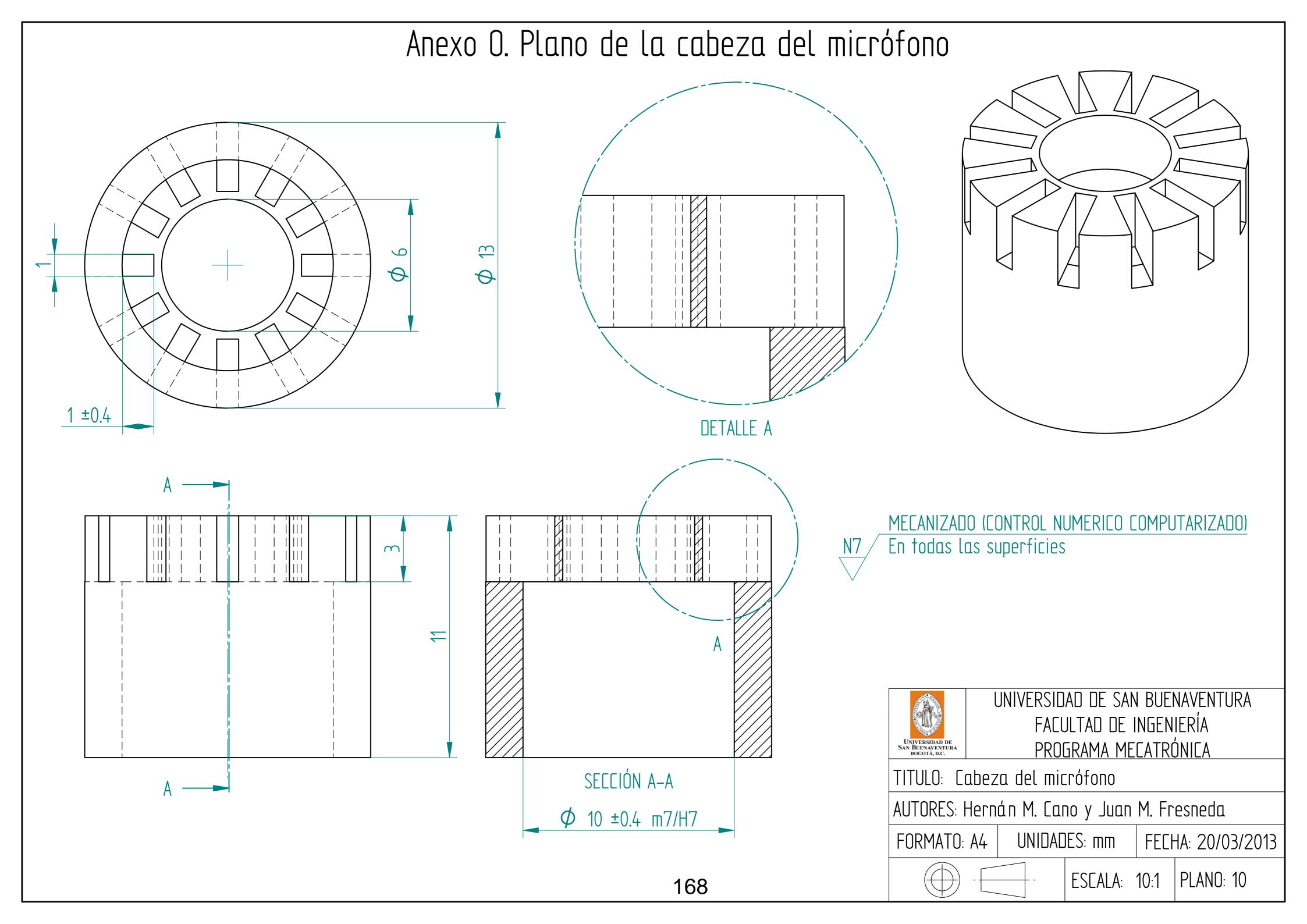
UNIDADES: mm

FECHA: 20/03/2013

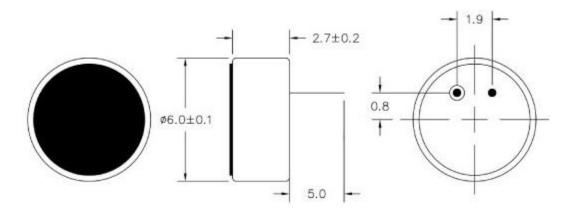


ESCALA: 2:1

## Anexo N. Plano del cuerpo alto del micrófono 100 82 ±0.5 0.0001 A \_\_ 0.0001 B В φ 10 ±0.4 H7/m7 9 SECCIÓN A-A TORNEADO En todas las superficies UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA MECATRÓNICA TITULO: Cuerpo alto del micrófono AUTORES: Hernán M. Cano y Juan M. Fresneda UNIDADES: mm FORMATO: A4 FECHA: 20/03/2013 ESCALA: 2:1 PLANO: 9 167



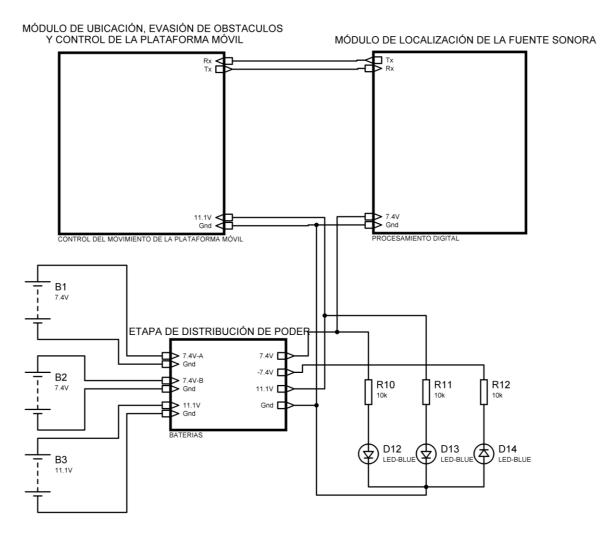
Anexo P. Planos de la cápsula Electret POM-2738P-C33-R



Fuente. Disponible en PUI Audio. [Citado 27 de marzo de 2013]. Disponible en internet:<a href="http://www.puiaudio.com/product-detail.aspx?categoryId=4&partnumber=POM-2738P-C33-R">http://www.puiaudio.com/product-detail.aspx?categoryId=4&partnumber=POM-2738P-C33-R</a>

# Anexo Q. Plano de la base superior de la plataforma móvil 4 X R 27,5 215 UNIVERSIDAD DE SAN BUENAVENTURA FACULTAD DE INGENIERÍA PROGRAMA MECATRÓNICA TITULO: Base superior de la plataforma móvil Corte laser AUTORES: Hernán M. Cano y Juan M. Fresneda En todas las superficies FORMATO: A4 UNIDADES: mm FECHA: 20/03/2013 PLANO: 12 ESCALA: 1:2 170

#### Anexo R. Circuito esquemático general del sistema

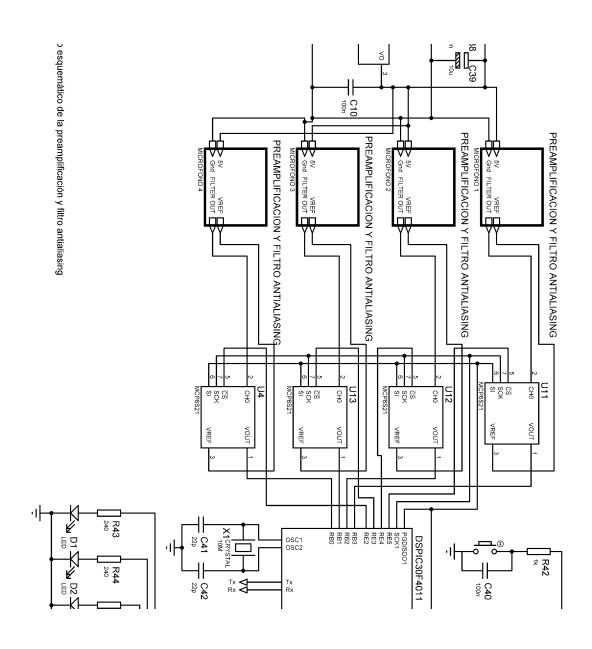


Anexo S. Circuito esquemático del módulo de localización de la fuente sonora

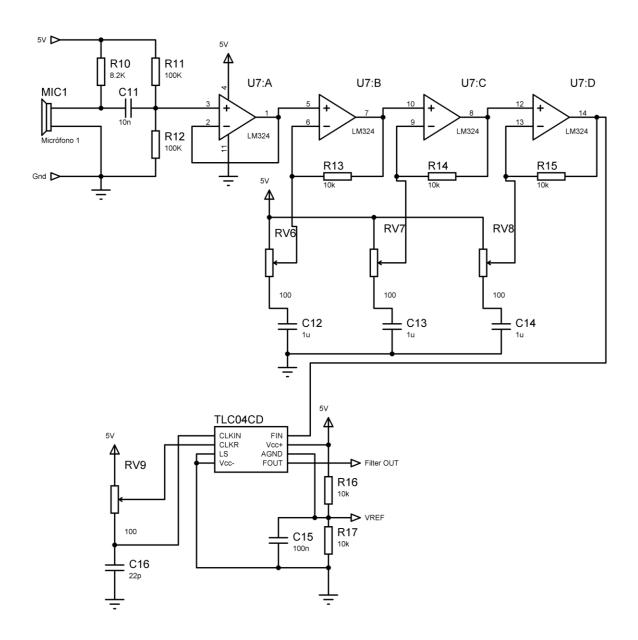
Anexo U. Circuito esquemático del módulo de ubicación, evasión de obstáculos y control de la plataforma móvil

Anexo V. Circuito esquemático de la etapa de distribución de poder

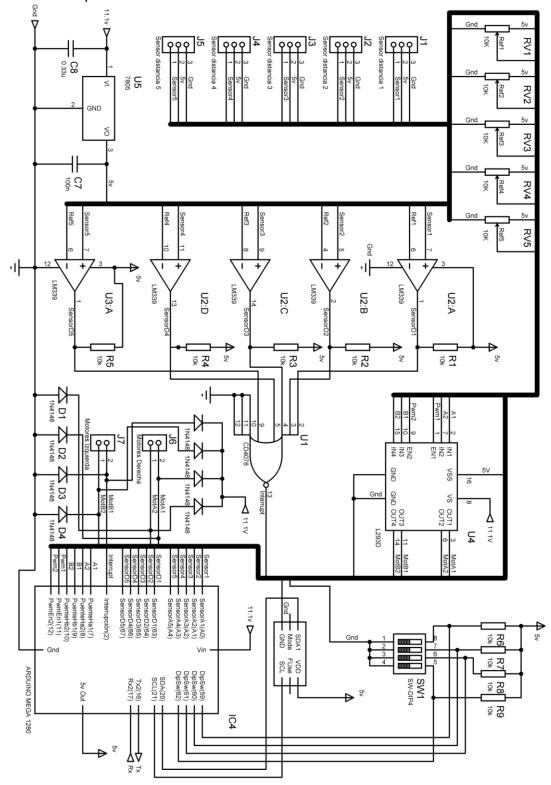
Anexo S. Circuito esquemático del módulo de localización de la fuente sonora



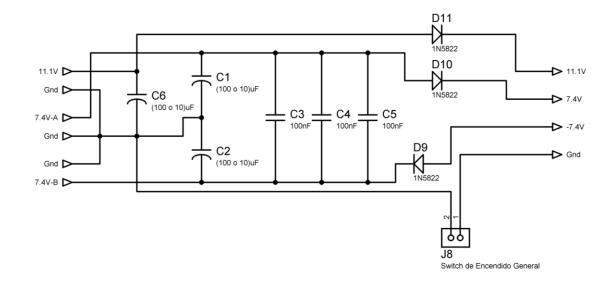
Anexo T. Circuito esquemático de la preamplificación y filtro antialiasing



Anexo U. Circuito esquemático del módulo de ubicación, evasión de obstáculos y control de la plataforma móvil



Anexo V. Circuito esquemático de la etapa de distribución de poder



Anexo W. Tabla de las variables de los algoritmos

| Variable             | Descripción   |
|----------------------|---|
| GN                   | Representa la ganancia del filtro (GA y GB ya que son iguales)**  |
| GA1, GA2, GB1 y GB2  | Representa a los coeficientes del filtro (A1, A2, B1 y B2)**      |
| BUFFER_SIZE          | Tamaño del vector que tiene cada señal                            |
| umbral               | Variable que determina el nivel de referencia deseado de SPL      |
| llegueprimero        | Indica cuál de los micrófonos recibió la señal primero            |
| lleguesegundo        | Indica cuál de los micrófonos recibió la señal de segundas        |
| Muestrasdiferencia   | Diferencia de muestras de la llegada de las dos primeras señales  |
| validacion           | Banderas para validación de procesos                              |
| validacionmuestras   | Banderas para validación de procesos                              |
| Inext, buu, i, j y k | Contadores para estructura de tipo FOR                            |
| а                    | Variable buleana de validación de las señales                     |
| mic2 mic3 y mic 4    | Variables temporales de la adquisición de las señales             |
| mic1                 | Var. temporal de adq. de la señal y variable para otros procesos  |
| mic01, mic02         | Señales capturadas de los micrófonos                              |
| Mic03, mic04         | Señales capturadas de los micrófonos                              |
| Qk2 y Qk1            | Retardos de la variable Qk***                                     |
| Pk2 y Pk1            | Retardos de la variable Pk***                                     |
| Pk, Hk y Qk          | Variables de las ecuaciones del filtro***                         |
| Х                    | Señal discreta a correlacionar con respecto a Y                   |
| У                    | Señal discreta  |
| mx                   | Promedio de la señal x  |
| my                   | Promedio de la señal y  |
| maximo               | Variable que guarda el valor máximo de la función de correlación  |
| desfase2             | Variable que guarda el argumento máximo de la función de          |
| retardo              | Contador que indica cual es el desfase que se calcula en el ciclo |
| sxy                  | La sumatoria del todo el numerador de la ecuación (10)            |
| sx y sy              | Las sumatorias de los dos términos del denominador de la          |
| r                    | La correlación de x, y  |
| Fuente: Autores      |   |

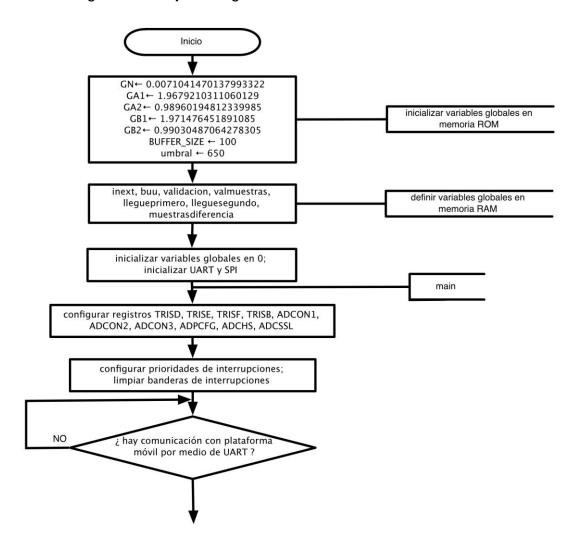
<sup>\*</sup> Las variables de esta tabla se utilizaron en los algoritmos que están en los anexos

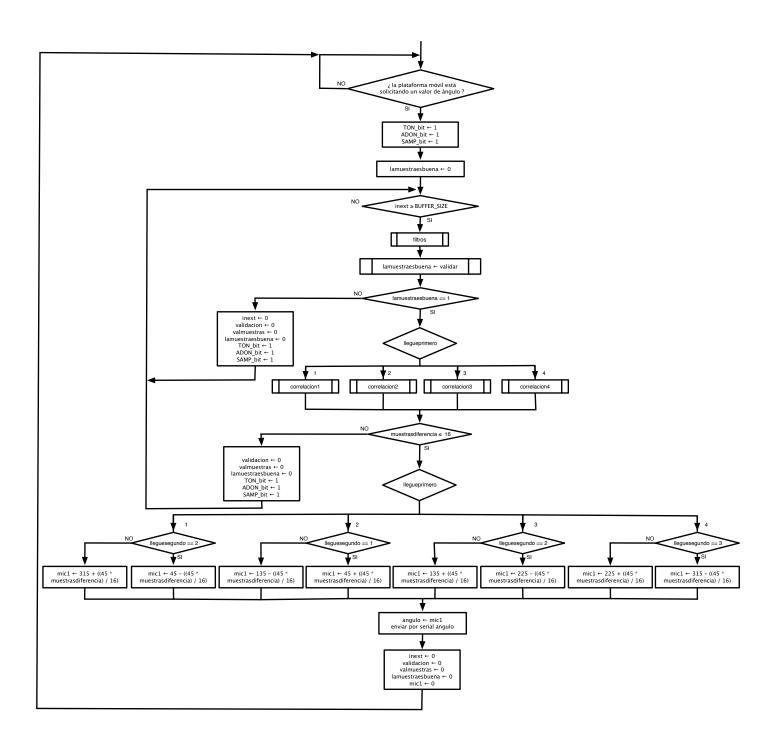
Nota: Todas las variables que no están descritas en esta tabla, son variables propias de los registros del dsPIC

<sup>\*\*</sup> Variables nombradas en la página 110

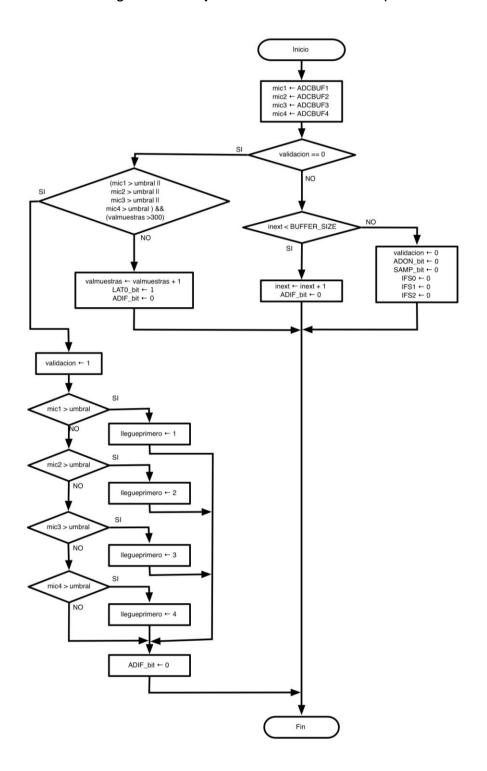
<sup>\*\*\*</sup> Variables nombradas en la página 112

Anexo X. Diagrama de flujo del algoritmo de localización de la fuente sonora

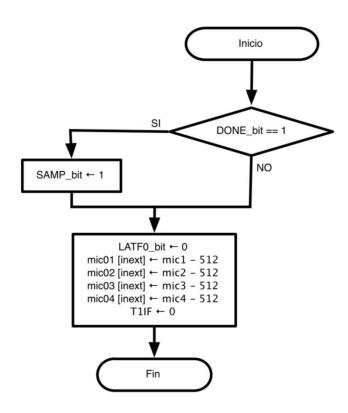




Anexo Y. Diagrama de flujo de la función de interrupción ADC



Anexo Z. Diagrama de flujo de la función de interrupción Timer

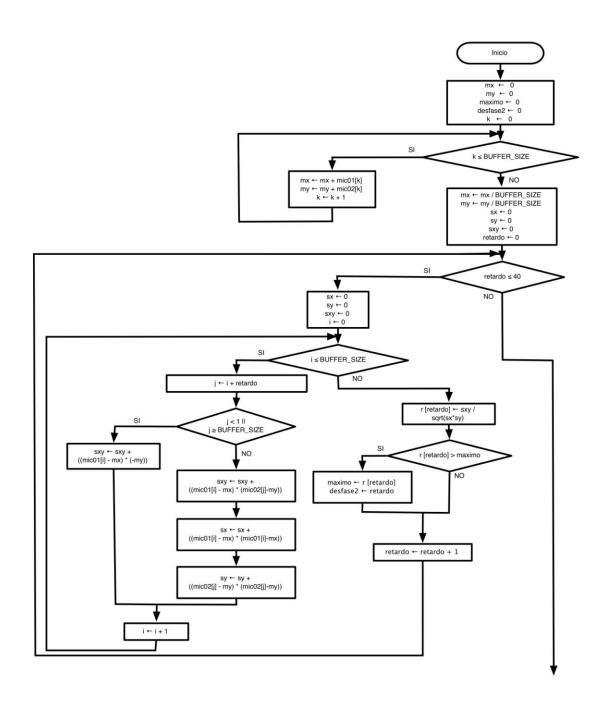


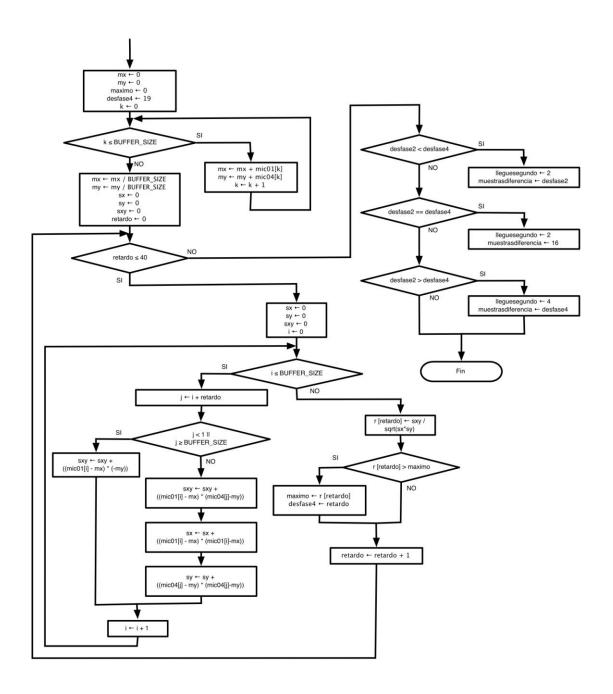
Anexo 1. Diagrama de flujo de la función Filtros Inicio Qk2 ← 0 Qk1 ← 0 Qk ← 0 Hk ← 0 Pk2 ← 0 Pk1 ← 0 Pk ← 0 i ← 0 SI i≤BUFFER\_SIZE NO  $\begin{array}{c} \textbf{V} \\ \textbf{Qk} \leftarrow mic01[i] + GA1 * Qk1 - GA2 * Qk2 \\ \textbf{Hk} \leftarrow GN * Qk - GN * Qk2 \\ \textbf{Pk} \leftarrow \textbf{Hk} + GB1 * Pk1 - GB2 * Pk2 \\ mic01[i] \leftarrow GN * Pk - GN * Pk2 \\ Qk2 \leftarrow Qk1 \\ Qk1 \leftarrow Qk \\ Pk2 \leftarrow Pk1 \\ Pk1 \leftarrow Pk \\ i \leftarrow i + 1 \\ \end{array}$ Qk2 ← 0 Qk1 ← 0 Qk ← 0 Hk ← 0 Pk2 ← 0 Pk1 ← 0 Pk ← 0 i ← 0 SI i≤BUFFER\_SIZE NO Qk ← micO2[i] + GA1 \* Qk1 − GA2 \* Qk2 Hk ← GN \* Qk − GN \* Qk2 Pk ← Hk + GB1 \* Pk1 − GB2 \* Pk2 micO2[i] ← GN \* Pk − GN \* Pk2 Qk2 ← Qk1 Qk1 ← Qk Pk2 ← Pk1 Qk2 ← 0 Qk1 ← 0  $Qk \leftarrow 0$   $Hk \leftarrow 0$   $Pk2 \leftarrow 0$   $Pk1 \leftarrow 0$   $Pk \leftarrow 0$   $i \leftarrow 0$ Pk1 ← Pk  $i \leftarrow i + 1$ SI i≤BUFFER\_SIZE NO  $\begin{array}{c} \textbf{Qk} \leftarrow \text{mic03[i]} + \textbf{GA2} * \textbf{Qk1} - \textbf{GA2} * \textbf{Qk2} \\ \textbf{Hk} \leftarrow \textbf{GN} * \textbf{Qk} - \textbf{GN} * \textbf{Qk2} \\ \textbf{Pk} \leftarrow \textbf{Hk} + \textbf{GB1} * \textbf{Pk1} - \textbf{GB2} * \textbf{Pk2} \\ \textbf{mic03[i]} \leftarrow \textbf{GN} * \textbf{Pk} - \textbf{GN} * \textbf{Pk2} \\ \textbf{Qk2} \leftarrow \textbf{Qk1} \\ \textbf{Qk1} \leftarrow \textbf{Qk} \\ \textbf{Pk2} \leftarrow \textbf{Pk1} \\ \textbf{Pk1} \leftarrow \textbf{Pk} \\ \textbf{i} \leftarrow \textbf{i} + \textbf{1} \end{array}$ Qk2 ← 0 Qk1 ← 0 Qk ← 0 Hk ← 0 Pk2 ← 0 Pk1 ← 0  $i \leftarrow i + 1$ Pk ← 0 i ← 0 i≤BUFFER\_SIZE NO  $\begin{array}{l} \P \\ \mbox{Qk} \leftarrow \mbox{mic04[i]} + \mbox{GA1} * \mbox{Qk1} - \mbox{GA2} * \mbox{Qk2} \\ \mbox{Hk} \leftarrow \mbox{GN} * \mbox{Qk} - \mbox{GN} * \mbox{Qk2} \\ \mbox{Pk} \leftarrow \mbox{Hk} + \mbox{GB1} * \mbox{Pk1} - \mbox{GB2} * \mbox{Pk2} \\ \mbox{mic04[i]} \leftarrow \mbox{GN} * \mbox{Pk} - \mbox{GN} * \mbox{Pk2} \\ \mbox{Qk2} \leftarrow \mbox{Qk1} \\ \mbox{Qk2} \leftarrow \mbox{Qk1} \\ \mbox{Qk2} \leftarrow \mbox{Qk1} \\ \mbox{Pk2} \leftarrow \mbox{Pk1} \\ \mbox{Pk1} \leftarrow \mbox{Pk} \\ \mbox{i} \leftarrow \mbox{i} + \mbox{I} + \mbox{I} \\ \mbox{I} \leftarrow \mbox{I} + \mbox{I} + \mbox{I} + \mbox{I} \\ \mbox{I} \leftarrow \mbox{I} + \m$ Fin

181

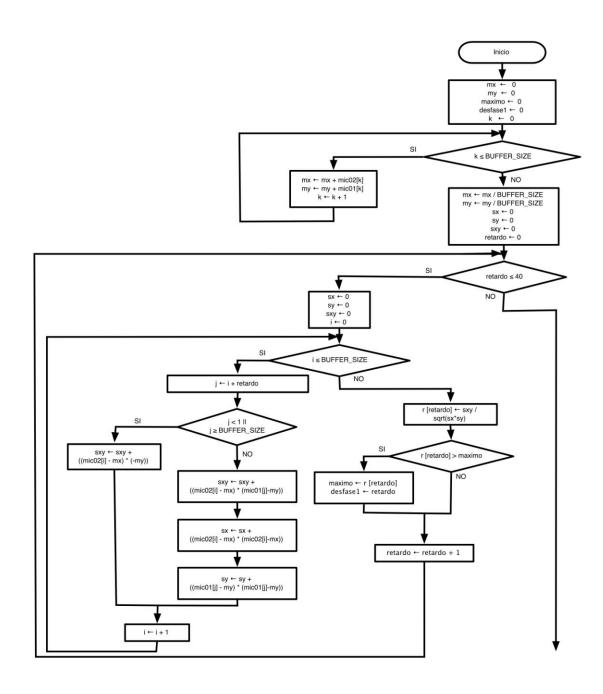
Anexo 2. Diagrama de flujo de la función Validar valido ← 0 i ← 10 i ≤ BUFFER\_SIZE NO mic01[i] > 20 i≤BUFFER\_SIZE mic02[i] > 20 valido ← 1 i ≤ BUFFER\_SIZE mic03[i] > 20 ¥ SI i ← 10 i ≤ BUFFER\_SIZE NO mic04[i] > 20 valido ← 1 escribir valido

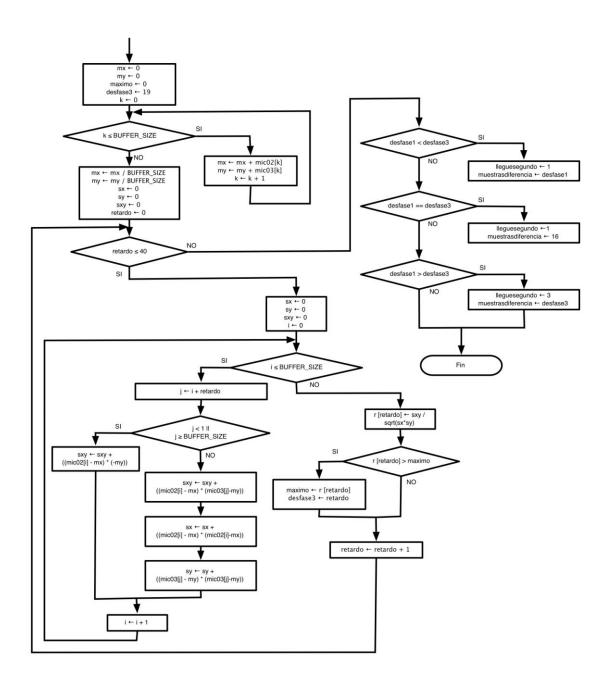
Anexo 3. Diagrama de flujo de la función Correlación 1



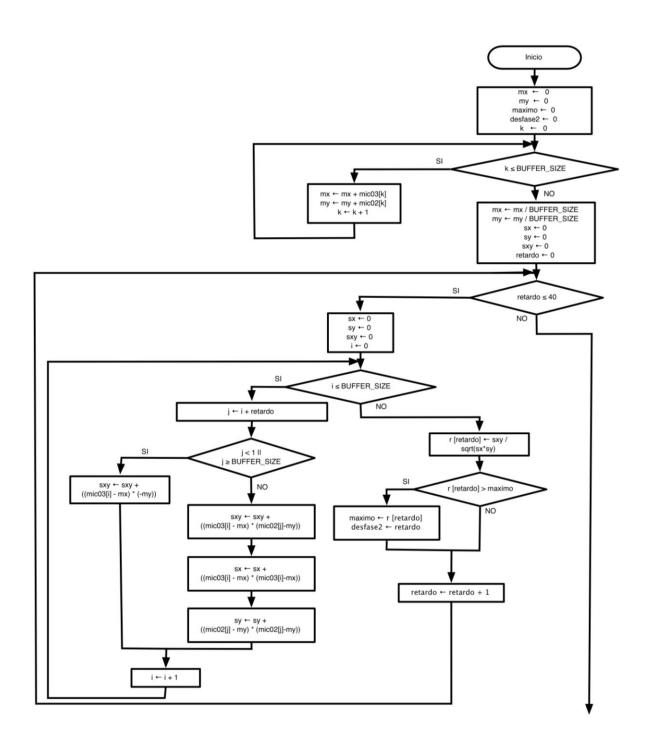


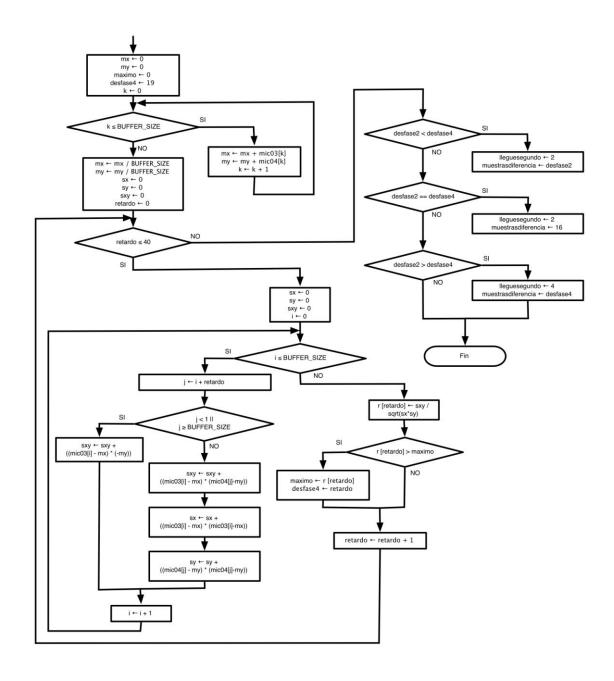
Anexo 4. Diagrama de flujo de la función Correlación 2



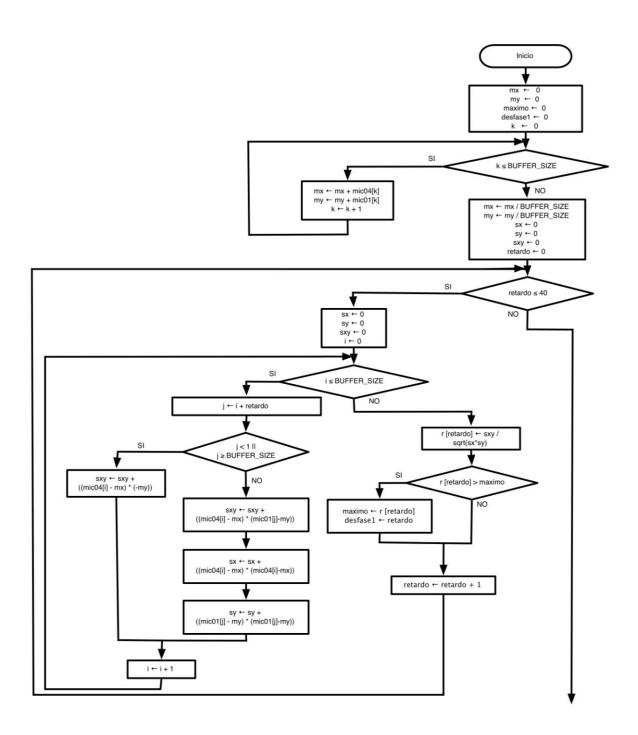


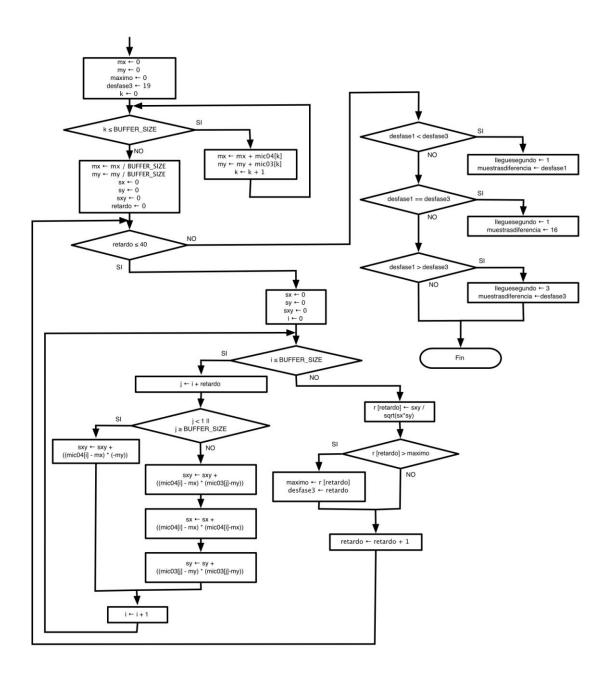
Anexo 5. Diagrama de flujo de la función Correlación 3



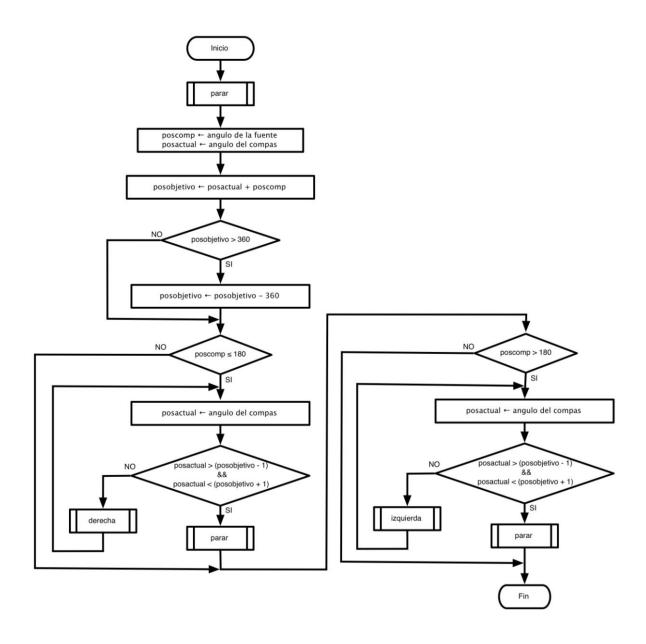


Anexo 6. Diagrama de flujo de la función Correlación 4





Anexo 7. Diagrama de flujo del algoritmo de ubicación de la plataforma móvil



Anexo 8. Diagrama de flujo del algoritmo de evasión de obstáculos

