

Sistema de Localización en Interiores por Ultrasonido

Pablo Chávez García^{1*}

¹*Colegio de Ciencias e Ingeniería – El Politécnico–, Universidad San Francisco de Quito
Diego de Robles s/n y Vía Interoceánica, Quito, Ecuador*

**Autor principal/Corresponding author, e-mail: pablo.a.chavez.g@gmail.com*

Editado por/Edited by: R. Játiva, M.Sc.

Recibido/Received: 06/01/2012. Aceptado/Accepted: 06/19/2012.

Publicado en línea/Published on Web: 06/30/2012. Impreso/Printed: 06/30/2012.

Abstract

This article explain the development of a prototype for tracking system, which is made for low cost, and for closed environments such as offices and rooms with low density of obstacles. The position is obtained from pseudo-ranges, which are calculated from the time taken by the ultrasound signal to travel from a known-point to the receiver. This process is repeated continuously until the receiver has received three pseudoranges, then the process of estimation starts based on the trilateration algorithm. [1]

Keywords. Time Of Arrival (TOA), Global Positioning System (GPS); Synchronization; Ultrasound (US); Radiofrequency (RF); Trilateration.

Resumen

En este artículo trata sobre el desarrollo del prototipo de un sistema de localización, de bajo costos, para ambientes cerrados tales como oficinas y habitaciones con baja densidad de obstáculos. La estimación de la posición se obtiene a partir de pseudo-rangos calculados del tiempo empleado por la señal sonora en viajar desde un punto conocido hacia el receptor. Este proceso se repite continuamente hasta que el receptor haya obtenido tres pseudo-rangos momento en el cual se inicia el proceso de estimación basado en el algoritmo de trilateración [1].

Palabras Clave. Tiempo de llegada (TOA), Sistema de Posicionamiento Global (GPS), Sincronización, Ultrasonido, Radiofrecuencia, Trilateración

Introducción

En la actualidad, los sistemas de localización se han establecido como una pieza esencial de la tecnología de vanguardia de última generación. Los teléfonos móviles actuales gozan de aplicaciones de localización, generalmente basadas en GPS, aunque es posible también estimar la posición de los suscriptores a partir del procesamiento de las señales intercambiadas con la red. El sistema GPS utiliza un conjunto de 21 satélites, los cuales emiten códigos de acceso que permiten determinar la distancia entre satélite y dispositivo a ser localizado usando el desfase entre los códigos que emite los satélites y los códigos que genera el receptor [2]. Cuando se han establecido al menos tres de estos pseudo-rangos, se inicia un proceso iterativo para estimar la ubicación del usuario, conocido como Matriz H. Si bien es cierto que las estimaciones basadas en GPS suelen ser las más exactas, debido a su capacidad de resolver la posición a partir de un conjunto determinado de ecuaciones, su problema radica en la falta de habilidad de operación

de estos sistemas en ambientes cerrados tales como edificios, casas, o cualquier otra estructura que obstruya la línea de visión directa que existe entre satélite y usuario.

Para solventar este problema, se han realizado numerosos estudios acerca de la localización en interiores y como resultado, se desarrollaron dos sistemas de localización por ultrasonido (US) conocidos como “*The Bat Ultrasonic Location System*” [3] y “*The Cricket Location-Support System*” [4]. Cada uno de estos sistemas funciona con señales de ultrasonido y radiofrecuencia; sin embargo, utilizan diferentes tipos de administración de los pulsos ultrasónicos. Por ejemplo, el sistema Bat tiene una unidad central que emite de manera secuencial y ordenada los pulsos de US. Por otro lado, el sistema Cricket posee diferentes unidades independientes que emiten los pulsos de ultrasonido de manera aleatoria. El único inconveniente con esta administración es que pueden existir colisiones de información de radiofrecuencia, las cuales son enviados antes de la emisión de cada pulso, con otras unidades de administración. Para superar este

ISSN 1390-5384



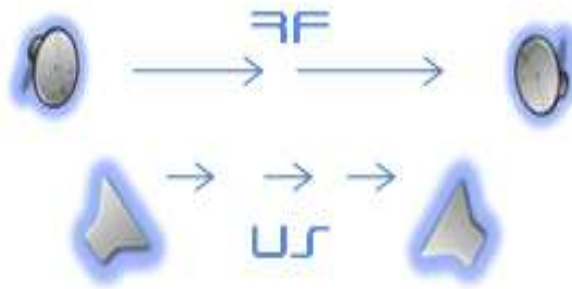


Figura 1: Funcionamiento de adquisición de sistemas de localización por ultrasonido.

problema, el sistema Cricket utiliza un tiempo de guarda, dentro del rango de los milisegundos, en el cual no se emite ninguna información de radiofrecuencia (RF) para evitar una eventual superposición y borrado de información [4].

El sistema de localización expuesto en este documento utiliza las mejores características de Cricket y Bat, dando como resultado un sistema de localización por ultrasonido de bajo costo y de buenas prestaciones para ambientes cerrados.

Metodología

Fundamentos y estrategia

El sistema GPS utiliza la diferencia de fase entre el código del transmisor y un código local de recepción para poder los pseudo-rangos; esto es la distancia entre el satélite y el usuario en línea de vista [2]. Dada la distancia entre la posición orbital de los satélites y el receptor en tierra, la estimación es posible con errores de hasta 5m. En forma análoga, si se utiliza una señal de ultrasonido como medio de medición de pseudo-rangos para interiores, el tiempo que tomaría en viajar a la onda hacia su destino podría contabilizarse sin ningún tipo de restricciones debido a que, la velocidad de propagación del sonido es de 343 ms/s a 20°C [5].

Para efectuar la medición de pseudo-rangos se requieren ciertas consideraciones que aseguren una operación óptima. Una de las consideraciones más importantes se refiere a la sincronización entre el transmisor y receptor. La sincronización establece el inicio del pulso y obliga al receptor a correr el temporizador, que contabiliza el tiempo que toma en llegar el pulso ultrasónico hacia el receptor, ver Figura 1. Cuando la temporización termina, la unidad de control y localización almacena dicho valor y prosigue con la adquisición de más datos provenientes de otros emisores de ultrasonido.

Una vez que la unidad de control y localización adquiere tres valores de pseudo-rangos; se inicia el proceso de estimación de la posición utilizando el algoritmo de trilateración expuesto en los posteriores apartados.

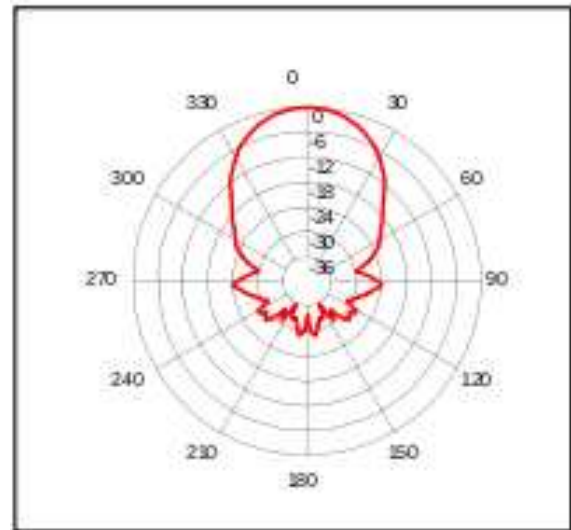


Figura 2: Lóbulo de radiación de los transductores de ultrasonido. La frecuencia de uso es de 40KHz.

Hardware e implementos

El sistema de localización en este proyecto busca ser lo más barato posible y que sus componentes se encuentren disponibles en el mercado. Por consiguiente, la mayor parte de los módulos diseñados son componentes analógicos y solo dos componentes son digitales, y que se usan para la transmisión y recepción de RF. Adicionalmente, se utilizaron dos módulos de radiofrecuencia de bajo costos en la banda no licenciada de 433 MHz para establecer los radio-enlaces entre los dispositivos. Para la parte de los módulos de transmisión de ultrasonido se utiliza un temporizador N555 en modo astable para conseguir una frecuencia nominal de 40KHz correspondiente al ultrasonido. Después de la etapa de oscilación, se tiene la etapa de amplificación de corriente con una configuración Dalington que se conecta a los transductores cerámicos de ultrasonido [6, 7]. Estos transductores son de uso común en aplicaciones de robótica, por lo que su lóbulo de radiación es de naturaleza direccional, como se observa en la Figura 2.

En el lado del receptor de ultrasonido tenemos tres etapas en su proceso. La primera etapa es la amplificación de la señal sonora con una ganancia total de 30dB seguida de un rectificador de medio puente el cual convierte la señal AC en DC para así; poder entrar a la etapa final de comparación. El comparador utiliza un voltaje ajustable que establece el umbral de recepción de la señal sonora.

Implementación

En la etapa de implementación deben tomarse en cuenta los protocolos de comunicación entre el transmisor y receptor para mantener la sincronía entre ambos; así como la activación de las estaciones de ultrasonido y la ejecución de un tiempo de espera.



Figura 3: Trama de protocolo de comunicación de radiofrecuencia entre transmisor y receptor.

Protocolo de comunicación

La unidad de datos del protocolo está dividida en dos partes esenciales: el preámbulo y los datos, o información en sí. El preámbulo, dentro de la trama, cumple con la función de validar al receptor y asegurar que la información recibida sea verdadera y no producto del ruido u otros fenómenos. Ver Figura 3.

La información que contiene la trama ayuda a la identificación de cada emisor de ultrasonido. Por este motivo, podemos llamar a cada emisor "satélite" debido a que estos van a proporcionar los pseudo-rangos necesarios para estimar la posición.

Escritura de datos

Para la escritura de datos en el transmisor se utiliza un micro-controlador PIC16F84a, el cual envía los bits en un protocolo serial 8N1; es decir, 8 bits de información con un bit de parada para establecer la comunicación. La escritura de la comunicación serial viene dada por default en el lenguaje de programación de PICBASIC PRO y es enviada por un puerto del PIC hacia el dispositivo de RF, como última etapa. Como se mencionó, la trama esta formada por un preámbulo "Z" y la identificación del satélite, y es por este motivo que, el PIC envía encapsulado tanto el preámbulo como la información. Por otro lado, el receptor inicia la validación de la información de RF que le llega mediante la aceptación del preámbulo "Z" que se envía antes de los datos reales. Sin embargo, a nivel de hardware del PIC16F84a, los pines de entrada no gozan de una estructura independiente USART, por lo que la información que llega al pin se pierde si esta no esta en modo de lectura serial. Para mantener enlazado el receptor; es decir, para que no pierda información, se utilizó una sentencia nativa de PICBASIC PRO que es capaz de leer continuamente el puerto hasta encontrar el calificador "Z". Ver Figura 4.

```
SEROUT2 TX, 16572, ["Z",DATO]
SERIN2 RX,16572,[ WAIT("Z"), NUMERO]
```

Figura 4: Comandos PICBASIC PRO para la escritura del protocolo de comunicación [8].

Activación de satélites

Los módulos transmisores de ultrasonido se encuentran inicialmente apagados. Esta condición inicial es de suma importancia ya que, si los satélites se encuentran en-

cendidos al mismo tiempo, las señales emitidas formarían un patrón de interferencias en el espacio de búsqueda creando zonas en donde existen interferencias destructivas. Por este motivo, los satélites se encienden de manera sincrónica, específicamente después de que los identificadores de los satélites sean enviados por radiofrecuencia. Los pulsos de activación de los satélites tiene una duración de 2 ms, el cual es suficiente para expandir la onda sonora hacia los alrededores; cubriendo así un área mayor. Cada pulso es enviado por diferentes puertos del PIC hacia la entrada de los módulos de ultrasonido.

Tiempo de espera

Cuando la onda sonora se propaga por el aire, esta toma cierta cantidad de tiempo en viajar hacia su objetivo. Sin embargo, en la práctica la onda de sonido enfrenta varios fenómenos según la naturaleza del medio; es decir, puede que la onda sea refractada, o reflejada; lo cual produce adquisiciones erróneas en el receptor [4]. Para reducir estos errores en adquisición, se utiliza un tiempo de guarda que queda definido por el número de bits y la tasa de baudios. En este caso, la tasa de baudios es de 4.8 Kbps y se envían 32 bytes de datos que dan como resultado 60 ms; tiempo suficiente para que la onda sonora se haya propagado completamente [4].

Interrupciones

Al finalizar la emisión de los datos de radiofrecuencia, el receptor habilita una interrupción global que sirve para determinar cuando el pulso de ultrasonido ha llegado al receptor. En el diseño, el puerto de entrada B4 sirve como fuente de interrupción y se activa mediante el bit 3 del registro INTCON del PIC [9]. Por ejemplo: INTCON = %10101000. De esta manera, el PIC mantiene encendida las interrupciones globales producidas por el cambio de estado de los pines 4 a 7 del puerto B [9].

Temporización

El PIC16F84a no tiene en su estructura un contador de 16 bits en hardware; solo tiene un contador de 8 bits para varios usos. Sin embargo, si se define en PICBASIC PRO una variable del tipo WORD, entonces el temporizador queda definido por la suma de los registros en tiempos discretos. Para lograrlo, se utilizó una máquina de estados controlado por una bandera de interrupción que nace de la llegada del pulso de ultrasonido. De esta manera, el temporizador comienza a contabilizar el tiempo en que toma en llegar la señal sonora. El valor del tiempo establecido para el muestreo del temporizador es de 11,5us; el cual se ajusta al formato 8 bits enteros y 8 bits decimal. Por ejemplo, la primera muestra marca a 11,5us que equivale a 3.9mm, suponiendo que la velocidad del sonido es de 334 m/s. De igual manera, con el formato Q8,8 el primer registro constaría con un valor real de 3.9mm. Por consiguiente, se tiene una representación acertada entre el tiempo y la distancia medida, y el valor real. Los valores consiguientes se

van acumulando en un registro similar al del vector de satélite. En PICBASIC PRO, no es posible la escritura de números de punto fijo Q8,8; sin embargo, la presentación de números enteros si lo es. Por lo tanto, para expresar un valor real de 1.5 metros a nivel de PIC; se debe multiplicar por un entero de 256 que representan los 8 bits menos significativos del formato Q8,8. Por ejemplo: 75cm a nivel de PIC es 192 ya que este valor es igual a la multiplicación entre 75cm y 256. De esta manera, se puede presentar todos los números reales entre 0 y 123,99 metros.

Localización

La trilateración es un algoritmo de localización basado en la adquisición de las distancias desde puntos referenciales, que son estáticos, distribuidos en el espacio hasta la posición a estimar del receptor, como variables experimentales. La Figura 5 muestra como deben estar alineados los satélites para poder trilaterar y la Ecuación 1 expone el resultado de este sistema de ecuaciones. Sin

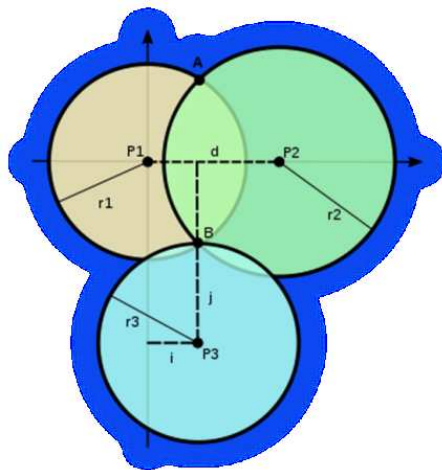


Figura 5: Esquema de algoritmo de trilateración. Este esquema esta dibujado en el plano x-y, pero se interpolar hacia el eje Z en un plano tridimensional.

embargo, para llegar a la estimación de las ecuaciones 1, 2 y 3, los satélites deben estar todos a la misma altitud. De esta manera, el eje Z en el plano tridimensional queda establecido como una constante y se puede resolver el sistema de ecuaciones con simples cálculos.

$$x = \frac{r_1^2 - r_2^2 + d^2}{2d} \quad (1)$$

$$y = \frac{r_1^2 - r_3^2 + i^2 + j^2}{2j} - \frac{i}{j}x \quad (2)$$

$$z = \sqrt{r_1^2 - x^2 - y^2} \quad (3)$$

Las ecuaciones 1, 2 y 3 contienen sumas, multiplicación y división como operadores matemáticas, pero a nivel de PIC, estas operaciones pueden ser complejas al momento de ejecutarse cuando se tiene un formato de punto fijo. Sin embargo, gracias a las funciones nativas de PICBASIC PRO, tanto la suma como multiplicación

quedan definidas. Por ejemplo, la suma se realiza con el operador (+) mientras que la multiplicación se ejecuta con el operador (*) ya que solo escoge los 16 bits de la mitad del resultado de 32 bits para mantener el formato establecido Q8,8 [8].

Distribución de satélites

Los satélites, que componen el sistema, están distribuidos de manera que sea posible trilaterar según las ecuaciones 1, 2 y 3. Sin embargo, nuestro sistema no sólo cuenta con tres satélites, sino con cuatro satélites que segmentan el área de cobertura en dos zonas (Norte y Sur). Ver Figura 6.

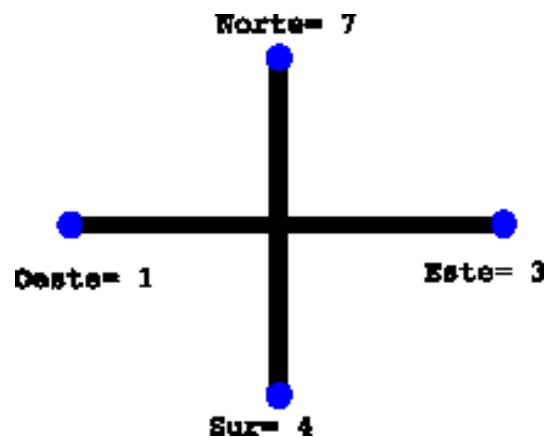


Figura 6: Distribución de satélites en un área de cobertura definida por intersección de las huellas producidas por los lóbulos de radiación de los transductores. Cada satélite tiene un identificador caracterizado por un entero.

La distancia máxima que existe de separación entre los satélites no excede el valor de 1.60 cm. Esta condición nace de la necesidad de conseguir una mayor cobertura empleando transductores con lóbulos de radiación directivos. Si la separación de los satélites no excede este valor, las ondas sonoras cubren el espacio suficiente para la adquisición; y la trilateración dependerá de la identificación de los satélites. La trilateración entra en funcionamiento cuando el vector de satélites y los registros de temporizador han alcanzado el valor óptimo de datos. Este valor óptimo es de tres ya que con estos valores de adquisición; la estimación de la posición queda resultado para un plano tridimensional. Sin embargo, el PIC está limitado en memoria y no se puede programar un sistema de ecuaciones para cada combinación de arribo de satélites. Por ejemplo, el método de resolución para el arribo de datos con identificadores (1,3,4,7) difiere totalmente de los identificadores (3,7,4,1). Para solucionar este inconveniente, cada recepción de identificador de satélites debe comenzar en "1". En caso, que no se cumpla esta condición, el receptor inicializa las variables hasta captar el identificador del primer satélite. En consecuencia, el orden de los registros captados por el receptor se mantiene fijo; provocando que las ecuaciones permanezcan estáticas [1].

	Oeste	Este
Promedio	2.1830	2.1745
Desviación Standard	0.0043	0.0033
Moda	2.1797	2.1758

Tabla 1: Distancias obtenidas de los satélites ubicados OE

	Sur	Norte
Promedio	2.1628	2.1696
Desviación Standard	0.0036	0.0020
Moda	2.1602	2.1680

Tabla 2: Distancias obtenidas de los satélites ubicados NS

	X	Y
Promedio	0.0097	0.0112
Desviación Standard	0.0060	0.0128

Tabla 3: Estimación final de la posición en base a los datos obtenidos en las Tablas 1 y 2.

Resultados

Para caracterizar el sistema se realizaron varios experimentos concernientes a la estimación de la posición. Debido a la facilidad en la obtención de los datos, se tomó como experimento base la localización en un punto fijo del plano. En este caso, el punto (0,0) fue sujeto a pruebas para poder caracterizar la simetría del sistema y observar que tan acertado es el proceso de estimación. En esta primera versión del sistema, la altura de cada satélite con respecto al piso no superó los 2,10 cm por lo cual se trata esencialmente de un problema de localización en dos dimensiones (2D)

La metodología de caracterización del presente proyecto consistió en la toma de datos por intervalos de tiempo. Por ejemplo, los cuatro satélites envían pulsos de ultrasonido en tiempos discretos en el cual, el receptor mide el tiempo de llegada de la señal. Estos datos son almacenados en un registro dentro del PIC para luego ser enviados por un puerto serial hacia un ordenador. El registro que es enviado contiene las medidas de distancia en el siguiente orden: oeste, este, sur y norte. (1,3,4,7). El tiempo total de cada envío no supera los 100 ms para los cuatro satélites, por lo que en total se tomó 3015 muestras en un intervalo aproximado de cinco minutos.

Como se observa en la Tabla 1(a), las distancias que mide el receptor desde el punto (0,0) hacia los satélites ubicados en el oeste y este no tienen una variación pronunciada. Es decir, que las muestras adquiridas tienen una fuerte tendencia a ser estables en su medición. Así mismo, la Tabla 1(b) muestra que la variación estándar no alcanza a ser un valor significativo con respecto al valor medio. De hecho, el valor nominal de los datos recolectados tienden a ser cero, tanto para (x,y). Finalmente, la Tabla 2 muestra la estimación final de la posición utilizando los datos de la Tabla 1.

Cabe recordar que la trilateración ocurre dentro del PIC. Por lo tanto, este proceso se realiza netamente por software y está sujeto a errores de redondeos provocados por las multiplicaciones y divisiones que tienen las ecuaciones de trilateración. Los errores de redondeo pueden

desplazar la estimación de su valor óptimo produciendo aumento en la varianza; y por ende, existe un aumento del porcentaje de error en la estimación. Sin embargo, la Tabla 2 indica que la estimación de la posición es acertada y solo presenta errores que son imperceptibles a nivel macro, tomando en cuenta las dimensiones de una habitación.

Fuera del punto central (0,0), se tomó otras lecturas para poder tener una idea más clara con respecto a la localización. Los puntos que se incluyeron en la caracterización fueron los extremos de cada cuadrante del plano. Por ejemplo, los puntos fueron: (-20,-20), (20,20), (-20,20); y finalmente, (20,-20). Las Tablas 3a-3d muestran los resultados de manera correspondiente con respecto a la estimación para los puntos anteriormente mencionados.

Como se observa en los datos registrados en la Tabla 3a, 3b, 3c y 3d, la estimación conseguida es muy buena ya que existen variaciones menores a dos centímetros con respecto a los valores de prueba en todos los casos; esto significa errores inferiores al 10 % del rango de medición. Adicionalmente, si comparamos los resultados del punto central (0,0) con los resultados de las Tablas 3, se puede observar que la estimación del punto central es más acertada con respecto a los demás puntos estimados. Esto se debe a que, en (0,0) los rangos medidos no tienen variaciones pronunciadas como en el caso de los demás puntos. Sin embargo este valor muestra la presencia de un sesgo originado posiblemente en la posición espacial de los sensores respecto del plano de medición 2D. Estas variaciones son el resultado de pequeñas reflexiones con cualquier superficie que se encuentre a las cercanías del receptor. Como resultado de estas variaciones, se propagan tanto errores en la medición como en el redondeo en las operaciones aritméticas.



Figura 7: Montaje final del sistema de localización por ultrasonido.

Conclusiones

Cada proceso se ha completado de manera satisfactoria. Adicionalmente, el proceso de adquisición de datos reconoce las distancias con un alto grado de fiabilidad, lo

cual puede ser utilizado para más aplicaciones concernientes a la medición de distancias. Finalmente, el proceso de triangulación confirma el buen funcionamiento del sistema de localización.

Los resultados de las posiciones tienen valores muy cercanos a los valores de posición teóricos, esto indica que la estimación es válida aunque existan pequeñas variaciones con respecto a su valor nominal ya que, estas pequeñas variaciones son producidas por efectos de la propagación de ondas sonoras y se amplifican al momento de realizar operaciones matemáticas por acarreo de error de redondeo. No obstante, el sistema de localización funciona de acuerdo a las expectativas establecidas

Agradecimientos

La idea original desarrollada en este artículo es parte de un proyecto de grado sugerido por el Profesor Carlos Loza quien asesoró su desarrollo. El Profesor René Játiva me ayudó en la revisión y edición de este artículo.

Referencias

- [1] Chávez, P. and De la Torre, D. 2012. "Prototipo de un Sistema de Tracking y Monitoreo de un Robot Transportador". *Tesis de Grado. Universidad San Francisco de Quito. 04 de mayo.*
- [2] Bao, J. and Tsui, Y. 2000. "*Fundamentals of Global Positioning System Receivers: A Software Approach*", Estados Unidos: John Wiley & Sons, Inc. Electrónico.
- [3] Ward, A. 2000. "The Bat Ultrasonic Location System". *AT&T Laboratories Cambridge. Extraído de <<http://www.cl.cam.ac.uk/research/dtg/attarchive/bat>>.*
- [4] Priyantha, N., Chakraborty, A., and Balakrishnan, H. 2000. "The Cricket Location-support System". *MIT Papers. Extraído de <<http://nms.lcs.mit.edu/papers/cricket.pdf>>.*
- [5] Moreno, E. 2000. "Propagación de Ondas Mecánicas y Aplicaciones de Ultrasonido". *Centro de Ultrasonica. Pp. 2-3. Extraído de <www.iai.csic.es/ritul/Cursos/Eduardo/Curmoreno.doc>.*
- [6] Datasheet. 2000. "Temporizador N555". *Electrónico.*
- [7] Unicrom, E. 2000. "Transistor Darlington". *Electrónico. Extraído de <http://www.unicrom.com/tut_darlington.asp>.*
- [8] MicroEngineering. 2000. "Manual PICBASIC PRO". *Inc Labs. pp. 78 - 87.*
- [9] MICROCHIP. 2000. "PIC16F84a". *Datasheet. Electrónico.*