

## IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE MEDICIÓN DE DISTANCIA CON SENSORES INFRARROJOS UTILIZANDO DISPOSITIVOS DE LÓGICA PROGRAMABLE

### Implementation of measurements system of distance with infrared sensors and programmable logical dispositive

#### RESUMEN

Se presenta la implementación de un sistema de medición de distancia con sensores infrarrojos utilizando Dispositivos de Lógica programable, para aplicaciones de levantamiento de mapas de entorno en aplicaciones de robótica móvil. Se muestran los resultados obtenidos a partir de los sensores implementados y de la utilización de diferentes tecnologías trabajando de manera sincronizada como son los Microcontroladores y las FPGAS.

**PALABRAS CLAVES:** Robot Móvil, Microcontroladores, FPGAS, Sensores Infrarrojos, Mapas de Entorno.

#### ABSTRACT

These papers present the implementations of measurements system of distance with infrared sensors and programmable logical dispositive for application of building environments maps. Shows obtained results from infrared sensors and utilization of differents technological basis microcontroller and FPGAS, working shincronized

**KEYWORDS:** Mobile Robot, Microcontrollers, FPGAS, Infrared Sensors, Environments Maps.

#### LUÍS HERNANDO RÍOS G.

Ingeniero Electrónico Ms.c  
Profesor Titular  
Universidad Tecnológica de Pereira  
lhgonza@utp.edu.co

#### MAXIMILIANO BUENO L.

Ingeniero Electricista Ms.c  
Profesor Catedrático  
Universidad Tecnológica de Pereira  
max@ohm.utp.edu.co

#### JHONNY A. VALENCIA.

Estudiante X Semestre Ingeniería Eléctrica.  
Universidad Tecnológica de Pereira

#### Grupo GIROPS

## 1. INTRODUCCIÓN

El reconocimiento del entorno hace parte del sistema de percepción sensorial del robot móvil y depende de la capacidad de captación de las diversas características de este por parte de los diferentes sensores del robot; uno de los sensores de mayor uso en robótica móvil es el denominado sensor Infrarrojo para la medición de distancias, lo cual permite que el sistema de percepción determine la distancia a la cual se encuentran los diferentes elementos del entorno, los cuales pueden ser de carácter estático o dinámico.

## 2. MEDICIÓN DE DISTANCIA CON DISPOSITIVOS INFRARROJOS

Para la medición de distancia con sensores infrarrojos, el sistema como tal se compone de:

- Un emisor que envía una señal de longitud de onda infrarroja al medio.
- Un obstáculo que sirve como superficie reflectora de la señal (punto de medición).
- Un sistema receptor, el cual dependiendo de la cantidad de energía con que es excitado, entrega una variación de voltaje proporcional a la distancia.

A partir de la ley de fotometría cuadrática-inversa y un reflector Lambertiano perfecto, se puede modelar la salida del sensor como se muestra en (1).

$$s(x, \theta) = \frac{\alpha}{x^2} \cos \theta + \beta \quad (1)$$

El parámetro  $\alpha$  define las características del transductor (intensidad de los emisores, sensibilidad al espectro de los fotodiodos y ganancia del sensor), así como del objeto (coeficiente de reflexión del objeto). Los tres primeros factores son constantes para todas las medidas realizadas con el mismo sensor, por lo cual puede expresarse  $\alpha$  como el producto de dos factores, uno constante  $\alpha_0$  en el cual se incluyen aquellos factores dependientes del transductor y se mide en Voltios por metro cuadrado ( $V.m^2$ ), y otro  $\alpha_i$  como coeficiente de reflexión que varía desde 0 para objetos negros hasta 1 para blancos. Por tanto la expresión para  $\alpha$  resulta como se muestra en (2):

$$\alpha = \alpha_0 \times \alpha_i \quad (2)$$

El parámetro  $\beta$  modela el desplazamiento de la señal debido a la luz ambiental. El valor del mismo puede ser obtenido mediante la lectura de la señal en el fotodiodo receptor dado en Voltios (V), con los emisores puestos a cero. Una vez obtenido el valor de  $\beta$ , se podrán realizar medidas, que corresponderán con una señal libre de influencias externas al sensor. De esta forma podemos

simplificar la ecuación del sensor como se muestra en (3):

$$y(x, \theta) = s(x, \theta) - \beta = \alpha_0 \frac{\alpha_i}{x^2} \cos \theta \quad (3)$$

Dentro de la literatura de medición de distancia con infrarrojos [1], [2] se tiene que para superficies reflectoras que formen un ángulo de 0 grados con el sensor de infrarrojos se tendrá una medida acertada, conociendo también las características de la superficie reflectora. Lo que lleva a pensar, ¿que ocurre cuando el ángulo de incidencia deja de ser de 0 grados?, o que ocurre cuando no se conoce las características de la superficie reflectora?; ante esta situación la medición estará acompañada de un error que depende directamente de la inclinación de la superficie reflectora y sus características, teniendo en cuenta este aspecto, se podría afirmar que al momento de hacer una medida, las principales variables que se consideran en el proceso son la distancia a la que se encuentra el objeto, el coeficiente de reflexión del objeto (dependiente a su vez del color del objeto, del brillo y de la textura) y el ángulo de incidencia del haz sobre la superficie reflectora, debe considerarse además la presencia de fuentes de luz, sea solar y/o artificial, que también adicionan un componente de ruido.

De acuerdo a lo anterior, para conocer la distancia entre el sensor y el objeto reflector es primordial conocer *a priori* el ángulo de incidencia  $\theta$  y la característica de reflexión  $\alpha_i$  de la superficie del objeto, basado en esto se genera la expresión (4).

$$x = \sqrt{\frac{\alpha_0}{y}} \sqrt{\alpha_i \cos \theta} \quad (4)$$

El modelo plantea la necesidad de posicionar dos sensores de la misma naturaleza en forma paralela y en la misma dirección, para así concluir que las variaciones en voltaje entregadas por cada uno de los sensores será de acuerdo al ángulo de incidencia que exista con la superficie reflectora, es decir, si la superficie esta colocada de forma paralela al conjunto de sensores, cada uno entregará la misma información, mientras que si la superficie no esta posicionada a 90 grados con la normal, las salidas de ambos sensores serán diferentes, esto se muestra en la figura 1.

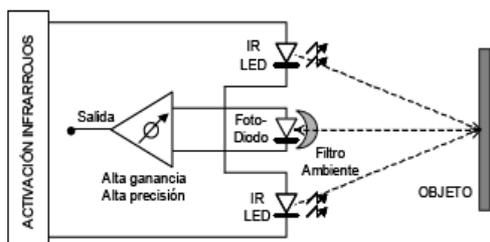


Figura 1. Modelo simple de Sensor Infrarrojo

Un sensor de distancias por infrarrojos esta compuesto típicamente por un emisor de Infrarrojos y un fotodiodo encerrado en una cápsula que filtra la radiación visible.

En su funcionamiento más básico, el emisor es excitado mediante un pulso de corriente continua, emitiéndose así un haz de luz del espectro infrarrojo que al ser reflejado por algún objeto, es captado por el fotodiodo el cual produce un pequeño voltaje de salida que depende de la cantidad de energía que alcance el receptor.

Dado que en entornos reales, el ángulo de incidencia  $\theta$  es desconocido, inicialmente se podría suponer que éste es igual a 0°, con lo cual puede ocurrir el riesgo de una sobreestimación de la distancia, cuando lo anterior no sea estrictamente cierto. De aquí que si se puede estimar mejor el ángulo de incidencia, se podría corregir la estimación de la distancia previamente hecha.

El ángulo de incidencia  $\theta$  se puede estimar si se fusiona la información proporcionada por un par de sensores de infrarrojos, que aunque estén separados una cierta distancia  $d$ , tengan la misma orientación, esto se muestra en la figura 2.

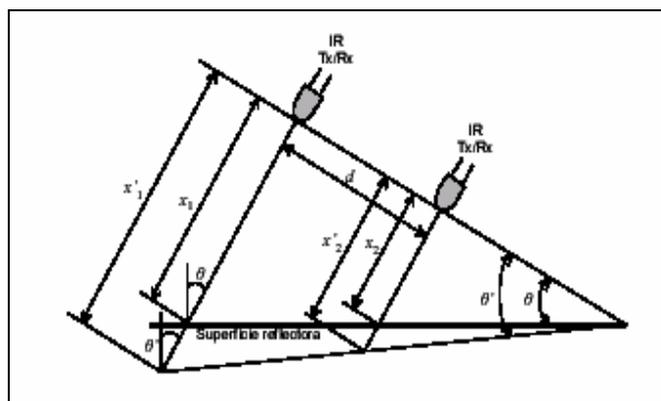


Figura 2. Incidencia del haz infrarrojo de dos sensores con igual orientación.

Asumiendo que el ángulo de incidencia  $\theta'$  es muy próximo a cero, las distancias erróneas estimadas en cada sensor corresponden a la expresión (5).

$$x_1' = \sqrt{\frac{\alpha}{y_1}} \quad x_2' = \sqrt{\frac{\alpha}{y_2}} \quad (5)$$

Mientras que las distancias reales son las calculadas con (6).

$$x_1 = \sqrt{\frac{\alpha}{y_1}} \sqrt{\cos \theta} = x_1' \sqrt{\cos \theta}, \quad x_2 = \sqrt{\frac{\alpha}{y_2}} \quad (6)$$

El valor del ángulo  $\theta$  se puede calcular empleando la expresión (7).

$$\tan \theta = \frac{x_1 - x_2}{d} = \left( \frac{x_1' - x_2'}{d} \right) \sqrt{\cos \theta} = R \sqrt{\cos \theta} \quad (7)$$

Por lo que para obtener el valor exacto de  $\theta$  es necesario resolver una ecuación cúbica de la forma presentada en (8).

$$R^2 \cos^3 \theta + \cos^2 \theta - 1 = 0 \quad (8)$$

La ecuación es de tercer orden para el  $\cos \theta$ , por lo que se debe hacer un trabajo matemático extenso. Para obviar lo anterior una aproximación muy acertada se obtiene de la expresión (9).

$$R' = \frac{\tan \theta}{\sqrt{\cos \theta}} \quad (9)$$

De lo que se extrae una tabla que describe el comportamiento de los sensores con parejas de datos ( $R$ ,  $\theta$ ) y se hace una interpolación de forma digital, para hallar el ángulo de incidencia, como se muestra en (10).

$$\theta = aR' + bR'^3 \quad (10)$$

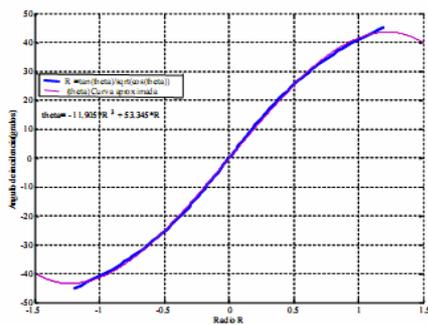


Figura 3. Interpolación para obtener el ángulo de incidencia

Al realizar algunas pruebas con el sensor implementando se obtuvieron los siguientes valores:  $a = 53.345441$  y  $b = -11.905434$ , con una desviación estándar de  $0.5830191^\circ$  y un coeficiente de correlación de  $0.9997581$ . Gráficamente esta variación se muestra en la figura 3.

Una vez obtenida una mejor aproximación del ángulo de incidencia  $\theta$ , se puede calcular la distancia media según (11).

$$x = \frac{x_1' + x_2'}{2} \sqrt{\cos \theta} \quad (11)$$

### 2.1. Implementación del Sensor

El medidor de distancia es un sistema que posee un circuito de emisión y un circuito de recepción. El circuito de recepción entrega una variación en la amplitud de la tensión de salida proporcional a la distancia de la superficie reflectora.

Para emitir la señal de trabajo se usa el dispositivo LD274 de Siemens emisor de infrarrojos el cual posee como características:

- Altamente directivo, con ángulo de emisión de  $\pm 10^\circ$
- Rango de emisión entre 880 y 1060 nanómetros de longitud de onda.
- Capacidad de ajustar el rango de emisión con la variación de corriente, aplicando un tren de pulsos de corriente directa.
- Emisión de 950 nm con 100mA y un pulso de 20 ms.

En la figura 4 se muestra la característica de emisión del dispositivo.

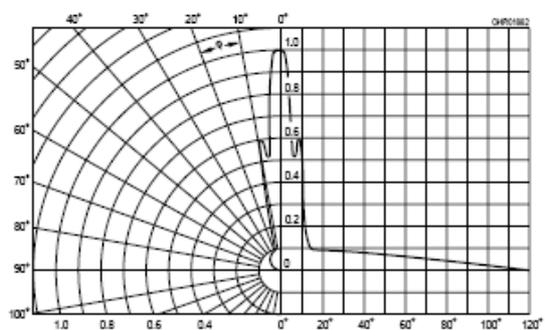


Figura 4. Característica de emisión en el plano.

Es necesario modular la emisión infrarroja a una frecuencia lo suficientemente alejada de las frecuencias en las que emiten las posibles fuentes de ruido, de tal forma que en la recepción de la señal ésta se pueda separar de las condiciones ambientales. La frecuencia a la cual se ha modulado la señal es de 40 kHz, que se encuentra en el rango de frecuencias de funcionamiento en las que son utilizados dispositivos de control remoto convencionales que suelen estar entre 30 y 40 kHz. La envolvente de la señal esta dada con una frecuencia de 500 Hz.

Establecer una característica especial en frecuencia de la señal a emitir es muy importante puesto que esta señal viaja al igual que otras ondas, para que al recibir la señal, se filtre sólo la que el emisor está enviando al ser reflejada por diferentes obstáculos. Y así saber que la señal de trabajo recibida sea la emitida por el sistema en cuestión.

El circuito receptor tiene varios factores a considerar, el entorno es el principal. Compitiendo con la débil señal infrarroja transmitida, están las fuentes de luz que en comparación tienen unas potencias mucho mayores, como pueden ser las lámparas fluorescentes, lámparas incandescentes y la luz del sol. Esto puede contribuir al problema de dos maneras:

- Producen un nivel de estimulación ambiente al sensor que aparece como una componente de frecuencia cero (DC), debido a fuentes de luz como la luz solar, que puede causar una disminución de la sensibilidad.
- Proporcionan un nivel de ruido cerca de 60 db, mayores que la señal deseada, especialmente en la forma de 100 Hz de frecuencia debido a la corriente AC en las fuentes de iluminación artificial como por ejemplo las lámparas incandescentes o bombillas. Es necesario recordar también que la sensibilidad de los detectores de silicio se extiende hasta bien superado el rango visible.

### 2.1.1 Sistema de Emisión.

El sistema de emisión de infrarrojos consta de 2 dispositivos infrarrojos LD274, dos transistores de propósito general 2N3904 polarizados para trabajar como interruptores sólidos, una fuente de corriente simétrica DC de +/-5V, dos resistores conectados al emisor y colector respectivamente del transistor y una fuente generadora de una señal modulada que consta de un oscilador con circuito integrado 555 y fuente de generadora de señal, también un acoplador de impedancia MOSFET TL-082 entre la base del transistor y la fuente de señal modulada. Este circuito se muestra en la figura 5.

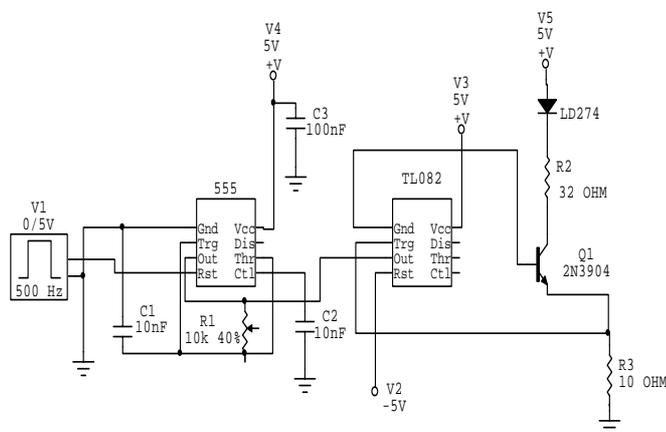


Figura 5. Circuito de emisión

### 2.1.2 Sistema de Recepción.

Recibir la señal de trabajo del medio es una tarea de vital importancia, puesto que la base para trazar mapas de entorno y navegación es la información que entregue el sistema de percepción sensorial.

El dispositivo receptor de infrarrojos de trabajo es el SFH203FA, un fotodiodo que para usarlo como fotorreceptor debe polarizarse inversamente, la magnitud de la señal que entrega el receptor es de orden de milivoltios. Antes de acondicionar la señal de trabajo, debe conocerse el comportamiento del receptor en

diferentes condiciones para saber qué componentes afectan la señal y minimizarlos o eliminarlos.

El fotorreceptor posee como características de funcionamiento las siguientes:

- Angulo de recepción de +/- 20°.
- Voltaje en circuito abierto entre 300 y 370 mV.
- Cuando recibe energía con longitud de onda de 950 nm alcanza la sensibilidad máxima

En la figura 6 se muestra la curva de sensibilidad del receptor contra la longitud de onda.

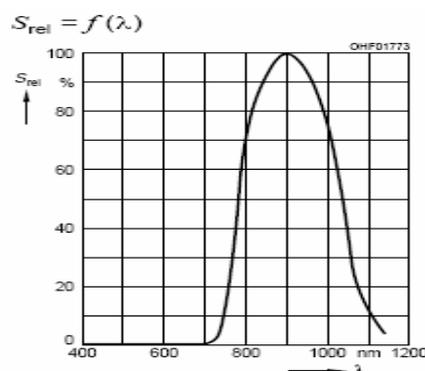


FIGURA 6. Sensibilidad del receptor contra longitud de onda

La señal proveniente del foto-receptor se adquiere por medio de un divisor de tensión con un resistor de valor aproximado al del dispositivo infrarrojo, la señal del divisor de tensión se acondiciona en dos etapas, la primera pasa por un amplificador de instrumentación AD620 el cual le da potencia a la señal, luego se pasa por la etapa de filtrado en la que se elimina la componente de ruido por medio de un filtro activo pas-alto con un amplificador operacional LM741 y una frecuencia de corte de 100Hz con ganancia de 15.

La posición de los dispositivos infrarrojos tanto del receptor como del emisor depende directamente del tipo de aplicación; como detección, control, y en este caso medición de distancia. La figura 7 muestra el circuito de recepción. Receptor y emisor están posicionados en la misma dirección.

## 3. MEDIDOR DE DISTANCIA, IMPLEMENTADO UTILIZANDO DISPOSITIVOS DE LOGICA PROGRAMABLE FPGAS (SPARTAN 3E).

Para el funcionamiento del circuito medidor de distancia se necesitan dos fuentes duales y un generador de audio con un circuito integrado LM555; lo cual denota una cantidad de hardware que para la implementación del sensor infrarrojo en una plataforma móvil ocuparía demasiado espacio. La implementación con dispositivos de lógica programable (FPGAS) permite optimizar aplicaciones en las que con un diseño que describa el

funcionamiento del sistema completamente, se elimine hardware innecesario. En este caso se ha sustituido el generador de audio y el circuito modulador implementado con el integrado LM555, por la señal generada por la tarjeta FPGA SPARTAN 3E.

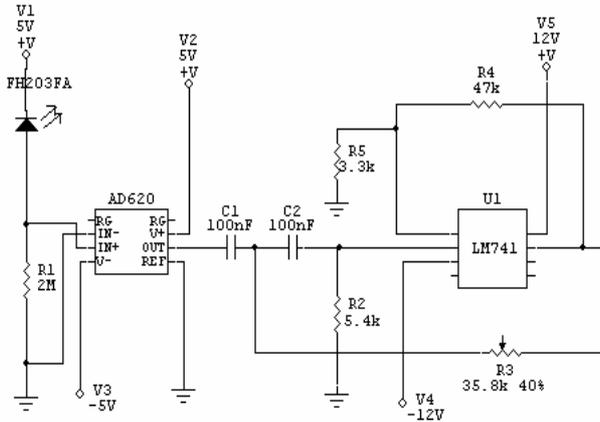


Figura 7. Circuito de recepción

### 3.1. Generación de la Señal Modulada

Para optimizar el medidor de distancia se diseñó en VHDL la descripción de hardware para generar la señal modulada, dentro de la descripción se generan dos divisores de frecuencia de 500 hz y 40 khz respectivamente, luego se hace un producto de ambas frecuencias generando así la señal modulada. La figura 8 muestra este proceso.

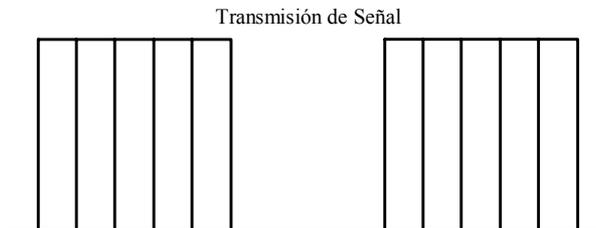


Figura 8. Señal generada por FPGA

Cuando la señal de control se activa con '1' lógico, la envolvente es generada para excitar el sensor y emitir una señal de rayos infrarrojos al medio. Con el oscilador de 50 Mhz de la SPARTAN 3E se inicia el generador de 40 Khz de frecuencia con un contador de flancos de subida hasta 1250 pulsos y la salida designada por "emiter\_signal\_out" se coloca en '1' y se mantiene durante 1250 pulsos mas de la señal de reloj de 50 Mhz para así generar la frecuencia de 40 Khz; luego el contador de ciclos se activa y cuenta 40 ciclos de la señal de "emiter\_signal\_out" y se cambia a cero durante 40 ciclos mas de la frecuencia generada de 40 Khz, para así obtener la envolvente de 500 hz con modulación a 40 Khz debido a que 40 pulsos de 40 Khz equivalen a un pulso de 500 Hz.

La impedancia vista por la base del transistor Q1 del circuito emisor de la figura 9 se hace baja sin tener que utilizar el acoplador de impedancia FET TL-082 por lo que se elimina del sistema de emisión de infrarrojos y se conecta directamente del acoplador PC817 a la base de Q1.

Para aumentar el nivel de potencia emitida por los sensores IR se tomó para cada emisor excitación independiente es decir por cada emisor hay un transistor 2N3904.

El sistema de emisión queda optimizado como se muestra a continuación para el circuito emisor del medidor de distancia 1

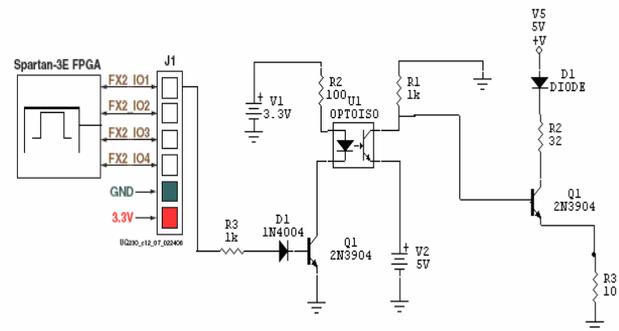


Figura 9. Circuito Emisor

Se continúa con el circuito de recepción, el cual tiene una etapa de acondicionamiento y una etapa de amplificación.

### 3.2. Adquisición de Señal, conversión Análogo/Digital e interfaz grafica con PC

Prueba para tratamiento de señal proveniente del receptor infrarrojo.

Una vez adquirida la señal proveniente del SFH203FA, y acondicionada por el amplificador de instrumentación AD620, se procede a digitalizarla. La digitalización de la señal adquirida se hace por medio de un conversor Análogo/Digital, para este caso, se utiliza un conversor externo a la tarjeta contenido en un microcontrolador Motorola de la familia HC08 JK8, el cual contiene 8 canales de conversión, el cual se programa para que funcione a una velocidad máxima de muestreo de 71.5 KHz, de tal forma que el tiempo entre muestras es de 14 uS. Dado, que la señal de trabajo es de 500 Hz ( 2 mS ) el criterio de Nyquist se cumple plenamente para recuperar la señal obtenida. Tanto en el Microcontrolador, como en la tarjeta SPARTAN 3E, debe implementarse una trama de comunicación para la Transmisión-Recepción de los datos, además de una interfaz que convierta niveles de voltaje de 5 V a 3.3 V. Dado que los datos enviados a la tarjeta SPARTAN 3E, son adquiridos por una sola línea de entrada se debe implementar en VHDL la descripción para recibir la trama de datos provenientes del Microcontrolador, el paso siguiente es verificar que la señal halla sido efectivamente adquirida enviando la cantidad de datos

muestreados a una interfaz gráfica que permita ver que la señal ha sido efectivamente adquirida, y filtrada. El proceso final es la aplicación de la interfaz gráfica por medio de comunicación serial entre la SPARTAN 3E y el PC.

#### 4. RESULTADOS OBTENIDOS.

Antes de iniciar las pruebas de caracterización debe hacerse un montaje sobre el emisor y el receptor; direccionarlos y aislarlos, principalmente el receptor que sólo puede tener descubierta el área activa de la cápsula.

Se tomaron 50 muestras por cada situación para diferentes superficies reflectoras, se cambió la distancia en intervalos de 5 cm, considerando el ángulo de incidencia fijo en 90 grados con respecto a la normal y nivel de iluminación fijo. En la figura 10 se muestra la relación distancia voltaje.

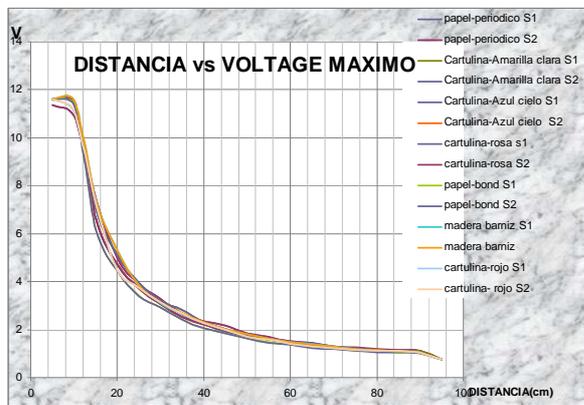


Figura 10. Curva de Tensión contra distancia, respuesta del sensor según el color del reflector.

La medida de distancia con el sensor de infrarrojos sigue el comportamiento que se muestra en las gráficas mostradas anteriormente con un rango de trabajo de 5 cm a 80 cm característica no lineal, considerando el ángulo de incidencia de 0 grados, al cambiar el ángulo de incidencia de la superficie con respecto al sensor, entrega como respuesta en voltaje valores menores a los entregados con ángulo de incidencia 0 como se muestra a continuación.

Con respecto al eje común del par de sensores se cambió el ángulo de incidencia desde 0 grados hasta +/- 90 grados con respecto al eje común. Y se obtuvo las curvas mostradas para diferentes distancias. La figura 11 muestra la respuesta angular del sensor

#### 5. CONCLUSIONES

Se obtuvieron diferentes características Distancia-Voltaje Máximo para diferentes superficies. Características que son de vital importancia para la

determinación de distancias a objetos próximos y para el cálculo del ángulo de incidencia  $\theta$ .

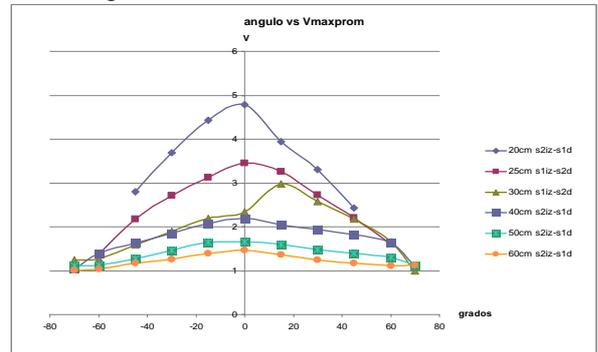


Figura 11. Respuesta angular real del sensor

Se presentó la implementación de un sistema de medición de distancia con sensores infrarrojos utilizando Microcontroladores y Dispositivos de Lógica programable, trabajando de manera sincronizada para la obtención de las distancias, utilizando diversos tipos de superficies.

El sistema implementado es la base para la construcción de un anillo de sensores infrarrojos para el levantamiento de mapas de entorno en ambientes de Robótica móvil.

#### 6. BIBLIOGRAFIA

- [1] G. Benet, F. Blanes, J. E. Simó and P. Pérez. Using infrared sensors for distance measurement in mobile robots. *Robotics and Autonomous Systems, Volume 40, Issue 4, 30 September 2002, Pages 255-266*
- [2] Blanes Noguera Juan Franciso. Percepción y representación del entorno en Robótica móvil. Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia. 2000
- [3] Tayfun Aytac and Billur Barshan Differentiation and localization of target primitives using infrared sensors Proceedings of the 2002 IEEE/RSJ Intl. Conference on Intelligent Robots and Systems EPFL, Lausanne, Switzerland • October 2002
- [4] Javier de Lope Asiaín. Emisión y recepción de infrarrojos. Departamento de Inteligencia Artificial Facultad de Informática .Universidad Politécnica de Madrid. Noviembre de 2001
- [5] Javier de Lope Asiaín. Sensor omnidireccional. Departamento de Inteligencia Artificial Facultad de Informática .Universidad Politécnica de Madrid. Febrero de 2002
- [6] Tayfun Aytac, Billur Barshan. Rule-based target differentiation and position estimation based on infrared intensity Measurements. Bilkent University Department of Electrical Engineering 06800 Bilkent Ankara, Turkey
- [7] P.M. Novotny & N.J. Ferrier Using Infrared Sensors and the Phong Illumination Model to Measure Distances Department of Mechanical Engineering University of Wisconsin – Madison Madison, WI 53706.