

DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DE UN BLOQUE DE PERCEPCIÓN SENSORIAL CON SENSORES INFRARROJOS, PARA EL LEVANTAMIENTO DE MAPAS DE ENTORNO EN ROBÓTICA MÓVIL.

Design and Implementation of a block of sensorial perception with infrared sensors for Mapping in mobile robotics.

RESUMEN

En el presente artículo se describe un bloque de percepción sensorial, utilizando sensores infrarrojos, el cual fué implementado en una FPGA's, Spartan 3E de Xilinx.

PALABRAS CLAVES: FPGA's, Hardware Reconfigurable, Sensores Infrarrojos.

ABSTRACT

The present article describes a block of sensorial perception, using infrared sensors, which was implemented in an FPGA's, Spartan 3E of Xilinx company.

KEYWORDS: FPGAS, Reconfigurable Hardware, infrared sensors.

LUIS HERNANDO RIOS

Ingeniero Electrónico, M. Sc.
Profesor Titular
Universidad Tecnológica de Pereira
lgonza@utp.edu.co

MAXIMILIANO BUENO

Ingeniero Electricista, M. Sc.
Estudiante de Doctorado
Universidad Nacional Autónoma de México
max@fi-b.unam.mx

ALEJANDRO MONTOYA O.

Ingeniero Electricista.
Universidad Tecnológica de Pereira.
Alejandromontoya333@hotmail.com

1. INTRODUCCIÓN

La construcción de un mapa de entorno se puede considerar una de las labores básicas que un robot móvil debe llevar a cabo, para planificar y ejecutar acciones de navegación, en sus entornos de trabajo. El principio adoptado por los científicos de la línea activista es "Usar el mundo como su propio modelo" [1]. De la forma más sencilla se podría pensar que un modelo es un conjunto de suposiciones (con mayor o menor duración temporal, precisión y complejidad en la representación) que el robot móvil hace sobre su entorno. Pero bajo esta premisa todos los robots, usan un modelo del mundo. En el robot de Braintenberg que sigue la luz [2], el modelo del mundo asume que existen luces y que es bueno seguir las. Una forma más elaborada de definir el modelo del mundo sería aquella proveniente de la definición de la representación del entorno de una forma matemática de la forma en que Gallistel [3] usa en la "neurocomputación".

Si por ejemplo el robot móvil tiene una representación del mundo en forma de rejilla (*grids*), existe un comportamiento que se adapta a esa característica (ocupación o no de las celdas) para evitar obstáculos o moverse de un punto a otro. De esta forma el modelo que se tiene, pasa a formar parte del estado del robot, ya que actúa como una variable que condiciona su comportamiento.

Dada la necesidad de tener un modelo del entorno, los robots móviles deben tener la capacidad de percibirlo y generar su propia representación. Para la percepción del entorno, el robot debe disponer de bloques de percepción sensorial, los cuales le proporcionen información básica, sobre las diferentes características del entorno por donde navega. Dichos bloques utilizan diferentes tipos de sensores (Infrarrojos, Ultrasónicos, laser y otros) y diferentes tipos de estrategias de percepción, una de ellas se hace a partir de la medición de la distancia de los objetos que circundan al robot, donde la información proporcionada por el bloque, se procesa para calcular la distancia, utilizando técnicas de procesamiento, las cuales aprovechan ciertas propiedades de los sensores que utilizan; en este artículo se hace la descripción de un bloque de percepción sensorial utilizando la información proporcionada por sensores infrarrojos, para el cálculo de la distancia a los objetos que circundan al robot.

La información que proporcionan los sensores infrarrojos ha sido utilizada en la mayoría de las aplicaciones en forma binaria (detección o no detección), aunque algunos trabajos referencian la información de amplitud de señal, sobretodo en aplicaciones que involucran la determinación de distancias. En [6], P. Novotny y N. Ferrier utilizan el modelo luminotécnico de Pong aplicado al haz de infrarrojos para determinar la distancia y las propiedades de una superficie plana. En [7] desarrollan un medidor de distancia de corto rango basado en la fusión de datos de amplitud de señal de dos

sensores infrarrojos de muy bajo costo, en combinación con sensores de ultrasonido para la construcción de mapas de entorno en aplicaciones de robótica móvil.

T. Aytaç y B. Barshan utilizan sensores infrarrojos de bajo costo en la clasificación y localización de paredes, esquinas, ángulos y columnas cilíndricas en ambientes interiores en aplicaciones de robótica móvil. En principio se basan en la información provista por un sólo sensor a la cual aplican algoritmos de mínimos cuadrados y filtros de correspondencia (*Matched-Filter*) a fin de clasificarlos y determinar su posición [5], mientras que en un segundo trabajo, con el mismo propósito, fusionan la información de dos sensores infrarrojos mediante un algoritmo basado en reglas [2]. En [3], definen el seguimiento de trayectorias definidas en el plano de rodamiento (*docking*) y en [4] implementan una estrategia de navegación evitando obstáculos a cortas distancias.

En la sección 2 de este artículo se presenta el funcionamiento de los sensores infrarrojos y se describen algunas técnicas y modelos para la medición de distancias. En la sección 3 se presenta el procedimiento experimental y los resultados en la sección 4 se presentan las conclusiones del trabajo realizado.

2. SENSORES INFRARROJOS

El sensor de infrarrojos se basa en la intensidad de una señal luminosa. La luz se puede definir como el conjunto de radiaciones electromagnéticas que forman parte del espectro visible. La radiación se puede definir como la emisión o transferencia de energía en forma de ondas electromagnéticas o partículas. Las ondas luminosas (ultravioleta, visible e infrarroja) ocupan sólo una parte muy pequeña del espectro de ondas electromagnéticas.

La luz visible se extiende sobre un pequeño rango de las ondas luminosas: 0.4 a 0.8 micrones. La parte infrarroja del espectro, la cual no es percibida por el ojo humano, se extiende sobre el rango de longitudes de onda que van desde 0.8 a 100 micrones. De acuerdo a lo anterior, uno de los principales inconvenientes de las aplicaciones de medición de distancias por infrarrojos es el efecto de otras señales luminosas que no son propiamente las del sensor (luz solar, luces artificiales)[4].

Un sensor de distancia por infrarrojos está compuesto típicamente por un emisor LED y un fotodiodo encerrado en una cápsula que filtra la radiación visible. En su funcionamiento más básico el emisor es excitado mediante pulsos 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 al receptor. La energía que refleja el objeto depende principalmente de la distancia a la que se encuentre, del coeficiente de reflexión del objeto (dependiente a su vez del color del objeto, del brillo y de

la textura) y del ángulo θ de incidencia del haz sobre la superficie reflectora, esto se observa en la Figura 1.

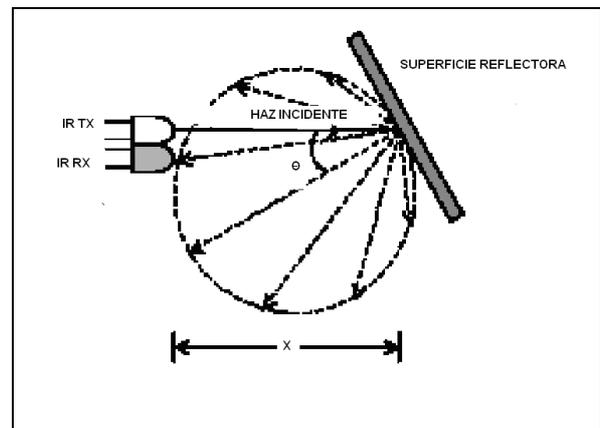


Figura 1. Principio del Medidor de Distancias con Sensores Infrarrojos. Tomado de [1]

2.1 Modelo de un Sensor de Infrarrojos

Un sensor de infrarrojos puede estar compuesto por dos diodos *LED* altamente directivos que son los emisores de infrarrojos y por un fotodiodo *PIN* que sirve como receptor de la energía radiada.

Para la determinación de la distancia, el sensor se basa en la medición directa de la energía infrarroja que se refleja del objeto. Se puede comprobar que la intensidad de la señal devuelta obedece a las siguientes características:

- Decae aproximadamente en forma cuadrática con la distancia entre el reflector y el receptor.
- Es mayor cuanto más reflectivo sea el objeto. El coeficiente de reflexión depende principalmente del color, brillo y textura del objeto.
- Es mayor cuanto más cercano sea a 0° el ángulo que forma el sensor con la normal al objeto reflector.

Considerando la ley de fotometría cuadrática-inversa [1] y un reflector Lambertiano perfecto, se puede modelar la salida del sensor. Ver Ecuación (1).

$$S(x, \theta) = \left(\frac{\alpha * \cos \theta}{x^2} \right) + \beta \quad (1)$$

En α se incluyen las características del transductor (intensidad de los emisores, sensibilidad al espectro de los fotodiodos y la 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 que se puede expresar α como el producto de dos factores, uno constante α_0 en el cual se incluyen aquellos factores dependientes del transductor y se mide en Voltios por metro cuadrado y otro α_i como coeficiente de reflexión

que varía desde 0 para objetos negros a 1 para objetos blancos. Por lo anterior la expresión para α se puede expresar:

$$\alpha = \alpha_0 * \alpha_i \tag{2}$$

El parámetro β modela el desplazamiento de la señal debido a la luz ambiental. El valor del mismo puede ser obtenido fácilmente mediante la lectura de la señal en el fotodiodo receptor, con los emisores puestas a cero. Una vez obtenido el valor de β , se podrán realizar medidas, que al restarle dicho coeficiente, corresponderán con una señal libre de influencias externas al sensor. De esta forma se puede simplificar la ecuación del sensor como en (3).

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

Donde y define la distancia x al objeto y θ , el ángulo de incidencia.

2.2 Técnicas de Medición de Distancias utilizando Sensores de infrarrojos.

2.2.1 Técnica de Fusión Bisensorial

A partir de la ecuación de la señal de salida del sensor de infrarrojos en (3), para conocer la distancia x entre el sensor y el objeto reflector es primordial conocer a priori el ángulo de incidencia θ y la característica de reflexión α_i de la superficie del objeto. Partiendo del hecho que se puede determinar a priori la característica de reflexión típica α_i del entorno de trabajo de un robot, es entonces el ángulo de incidencia θ el que juega el papel mas importante en la determinación de la distancia x a un objeto. Ecuación (4).

$$x = \sqrt{\left(\frac{\alpha_0}{y}\right)} * \sqrt{(\alpha_i * \cos \theta)} \tag{4}$$

Aunque en un entorno real el ángulo de incidencia θ es desconocido, como una primera aproximación se podría suponer que la incidencia es cercana a 0°. Esto supondría una sobreestimación de la distancia cuando lo anterior no sea estrictamente cierto. De aquí que si se puede estimar mejor el ángulo de incidencia θ , se podría corregir la estimación de la distancia previamente hecha.

Para implementar la técnica de fusión, el ángulo de incidencia θ se puede calcular mejor, si se fusiona la información proporcionada por un par de sensores de infrarrojos, que aunque estén separados una cierta

distancia L , tengan la misma orientación.

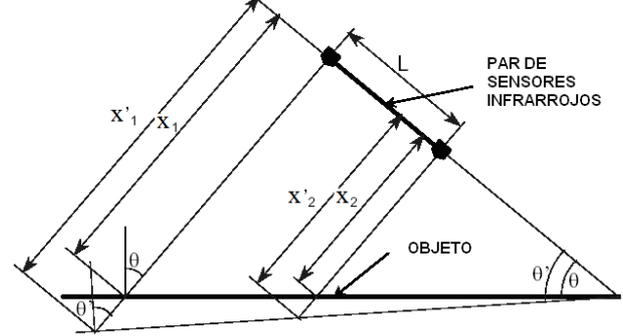


Figura 2. Incidencia del haz Infrarrojo de dos Sensores con Igual Orientación. Tomado de [1].

Asumiendo que el ángulo de incidencia θ' es muy próximo a cero, las distancias erróneas estimadas en cada sensor corresponden a los valores de x_1' y x_2' . Ver Ecuaciones (5) y (6).

$$x_1' = \sqrt{\left(\frac{\alpha}{y_1}\right)} \tag{5}$$

$$x_2' = \sqrt{\left(\frac{\alpha}{y_2}\right)} \tag{6}$$

Mientras que las distancias reales son,

$$x_1 = \sqrt{\left(\frac{\alpha}{y_1}\right)} * \sqrt{(\cos \theta)} = x_1' * \sqrt{(\cos \theta)} \tag{7}$$

$$x_2 = \sqrt{\left(\frac{\alpha}{y_2}\right)} * \sqrt{(\cos \theta)} = x_2' * \sqrt{(\cos \theta)} \tag{8}$$

$$\tan \theta = \frac{(x_1 - x_2)}{L} = \frac{\sqrt{(\cos \theta)} * (x_1' - x_2')}{L} \tag{9}$$

Por lo que para obtener el valor exacto de θ es necesario resolver una ecuación cúbica de la Ecuación (10).

$$R^2 * \cos^2 \theta - 1 = 0 \tag{10}$$

2.2.2 Técnica con el modelo Phong

Un haz de luz que impacta sobre una superficie es dispersado, absorbido o reflejado de acuerdo a las características particulares de cada superficie. Por ejemplo una superficie de color negro absorbe más energía que una de color blanco, mientras que una superficie brillante refleja más energía que una superficie

opaca. El modelo de Phong contempla estos efectos mediante el uso de 4 constantes: C_0 , C_1 , C_2 y n . La ecuación de Phong para la intensidad de la energía reflejada por una superficie se define en la ecuación (11).

$$I = C_0(\mu_s * \mu_n) + C_1 * (\mu_r * \mu_v)^n + C_2 \quad (11)$$

Donde μ_s , μ_n , μ_r , y μ_v son los vectores unitarios del haz incidente, de la normal a la superficie, del haz reflejado y del punto de observación respectivamente. Ver Figura 3.

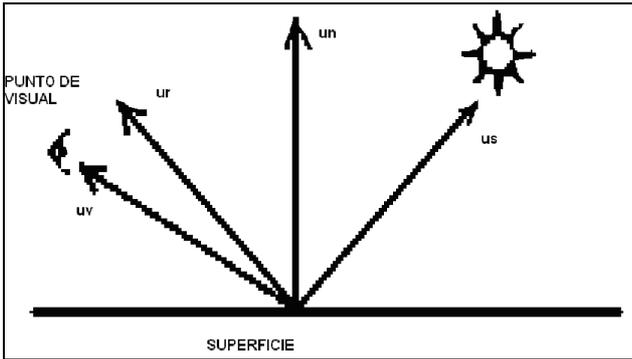


Figura 3. Modelo Phong. Tomado de [1].

Comparando el modelo de Phong mostrado en la Figura 3, con el haz emitido por un sensor de infrarrojos mostrado en la Figura 4 se puede deducir la ecuación (12).

$$\mu_s * \mu_n = \text{Cos } \theta \quad (12)$$

También, si se asume que tanto el emisor como el receptor de infrarrojos están en el mismo punto:

$$\mu_v \approx \mu_s \quad (13)$$

$$(\mu_s * \mu_v) = \text{Cos } 2\theta \quad (14)$$

Así, la ecuación de intensidad en el receptor se puede escribir como:

$$I = C_0 * \text{Cos } \theta + C_1 * \text{Cos}^n(2\theta) + C_2 \quad (15)$$

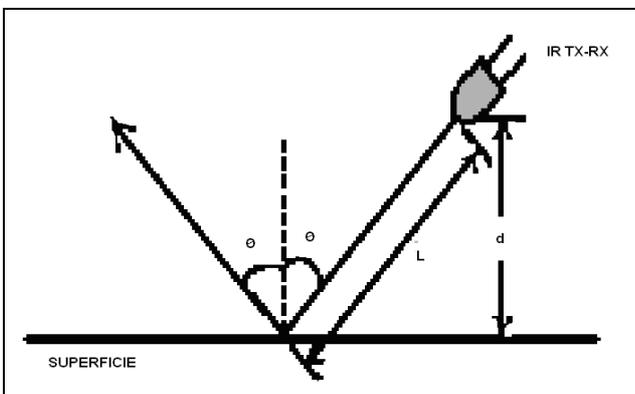


Figura 4. Incidencia del Haz Infrarrojo. Tomado de [1].

Por otra parte, también se sabe que la energía E absorbida por el fotodiodo y que se transformará en un voltaje de salida, es una función de la intensidad I , de la distancia viajada $2L$, y del área A del fotodiodo.

$$E = \frac{(I * A)}{(2-L)^2} = \frac{(C_0 * \text{Cos } \theta + C_1 * \text{Cos}^n(2\theta) + C_2) * A}{\left(\frac{2-L}{\text{Cos } \theta}\right)^2} \quad (16)$$

$$E = \frac{A * \text{Cos}^2 \theta * (C_0 * \text{Cos } \theta + C_1 * \text{Cos}^n(2\theta) + C_2)}{4 * L^2} \quad (17)$$

Asumiendo que la superficie reflectora es un reflector pasivo, entonces se puede establecer que $C_2 = 0$ y que $n = 1$. También, ya que A es una constante, se puede integrar al resto de los coeficientes, por lo que el modelo de energía absorbida por el receptor de infrarrojos queda como se define en la ecuación (18).

$$E = \frac{\text{Cos}^2 \theta * (C_0' * \text{Cos } \theta + C_1' * \text{Cos}^n(2\theta) + C_2)}{4 * L^2} \quad (18)$$

Aquí, C_0' y C_1' modelan las características integrada de la superficie reflectora y del receptor de infrarrojos; y dado que las mismas pueden ser determinadas a priori mediante la experimentación controlada en el entorno típico de trabajo del robot, entonces es el ángulo de incidencia la variable de mayor peso en la determinación de la distancia.

P. Novotny y N. Ferrier [6] hacen uso de un anillo de sensores de infrarrojos para determinar el ángulo de incidencia θ . Basándose en la amplitud de señal recogida por cada sensor, siguen una estrategia de búsqueda del máximo global el cual esta directamente relacionado con la dirección normal a la superficie reflectora.

Una vez determinada la orientación entre la superficie y el sensor más próximo al máximo, la distancia se determina mediante la lectura de la energía captada por el sensor y la ecuación,

$$d = \left(\frac{\sqrt{(C_0' * \text{Cos } \theta + C_1' * \text{Cos } \theta)}}{E} \right) * \frac{\text{Cos } \theta}{2} \quad (19)$$

3. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

3.1 Diseño y construcción del bloque de percepción sensorial con sensores infrarrojos.

El trabajo propuesto por Blanes [1] para posicionar los sensores Infrarrojos e implementar el modelo de medición de distancias y la técnica de fusión bisensorial

es usar una estructura física hexagonal para los sensores Infrarrojos donde éstos se puedan posicionar y capturar los datos del entorno perimetral. En este trabajo se optó por implementar la misma estructura sugerida por Blanes, pero solo usar dos tercios de la misma en la plataforma móvil, ya que para construir mapas de entorno dinámicos, y poder generar un plan de viaje con desplazamiento hacia delante, la información que proporciona el bloque sensorial implementado, es mas que suficiente. Se diseñó un plano hexagonal con 5 lados activos que contienen cada uno, un par de sensores.

Se diseñó un circuito que incluye la emisión, recepción de infrarrojos, acondicionamiento de señal, captura y envío de datos para cada par de sensores. En la figura 5 se muestra el esquema del circuito implementado.

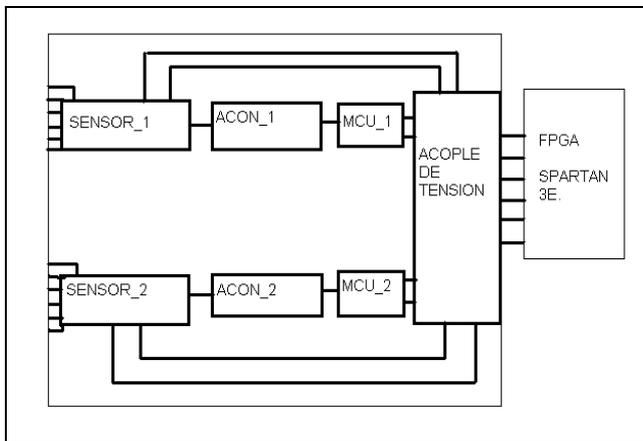


Figura 5. Componentes para el Circuito de Arreglo Bisensorial y Medición de Distancia.

3.2 Resultados prueba medición de distancia con ángulo de incidencia de 0 grados.

Las curvas obtenidas confirman el modelo de medición de distancias con Sensores Infrarrojos, cuando se conoce el coeficiente de reflexión de la superficie. Las superficies utilizadas fueron superficies planas, lisas de diferentes materiales(Cartón, madera), de diferentes colores y colocadas perpendicularmente con respecto a la posición del sensor y a diferentes distancias.

Las curvas conservan el mismo comportamiento para las diferentes superficies utilizadas, pero las amplitudes de voltaje entregadas por el medidor de distancia varían para la misma situación (misma distancia) en el orden de milivoltios. Retomando el modelo del sensor de infrarrojos como medidor de distancia (18) y el ángulo de incidencia de 0 grados, la función Cos θ es igual 1 por lo que da como resultado(20).

$$S(x, \theta) = \left(\frac{\alpha * \text{Cos} \theta}{x^2} \right) + \beta \tag{20}$$

$$S(x, \theta) = \left(\frac{\alpha}{x^2} \right) + \beta, \tag{21}$$

Como α esta constituido por un parámetro propio del sensor y el coeficiente de reflexión de la superficie reflectora (19), se toma como conocido el coeficiente de reflexión α_i, obtenido de la ecuación (2)

En la prueba se conoce la distancia, la superficie (para el coeficiente de reflexión de la misma), la componente de voltaje DC, definida como β y el voltaje entregado por el sensor para cada situación de distancia y superficie reflectora. Debe mencionarse que los resultados de la prueba tenían como constante primordial el ángulo de incidencia fijo a 0 grados. (Figura 6).

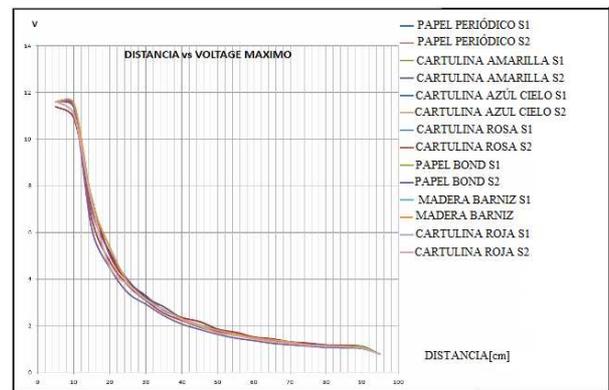


Figura 6. Comportamiento del sensor medidor de distancias para diferentes superficies y distancias

3.3 Resultados Prueba con variación en ángulo de incidencia y variación de distancia

Como se observa en la Tabla 1 y la figura 7, el voltaje entregado por el medidor de distancia decae cuando el ángulo de incidencia es diferente de 0 grados, y también la magnitud del voltaje decae en mayor escala cuando la superficie esta mas cercana al sensor (menor distancia), pues el área de ocupación de la señal emitida en la superficie es mayor, pero los rayos de reflexión no quedan direccionados al receptor por lo que el mismo no es excitado con la misma intensidad que si estuviera a 0 grados con la superficie. Lo cual resalta la importancia del uso de la técnica de fusión bisensorial .

3.4. Resultados pruebas para caracterizar el medidor de distancia implementado en Hardware reconfigurable, Tarjeta SPARTAN 3E DE XILINX.

Con una regresión de datos se genera una ecuación que modela el comportamiento del sensor de infrarrojos, éste difiere del modelo basado en la ley de la fotometría debido a que la prueba empírica refiere dos suposiciones que físicamente alejan el modelo conocido con el modelo hallado en la prueba.

DIST(cm)	Max(V)	Min(V)	AMPLITUD	DC	voltaje de sal
5	4,25	0,8	3,45	4,24	4,6432
10	4,176	0,76	3,416	4	4,1008
15	2,88	0,72	2,16	3,04	3,0848
20	2,5	0,64	1,86	0,88	0,9052
25	2,16	0,72	1,44	1,2	1,216128
30	1,84	0,72	1,12	1,44	1,4512
35	1,76	0,607	1,153	1,55	1,55822
40	1,76	0,96	0,8	1,4	1,4063
45	1,52	0,607	0,913	1,24	1,244977
50	1,35	0,96	0,39	1,18	1,184032
55	1,2	0,607	0,593	1,08	1,083332
60	1	0,74	0,26	0,92	0,9228
65	1,07	0,508	0,562	0,9	0,9023858
70	1,09	0,588	0,502	0,9	0,902057
75	1,05	0,76	0,29	0,96	0,961792
80	1	0,76	0,24	0,9	0,901575

TABLA 1. Datos para Calcular la Constante Propia del Sensor de Infrarrojos

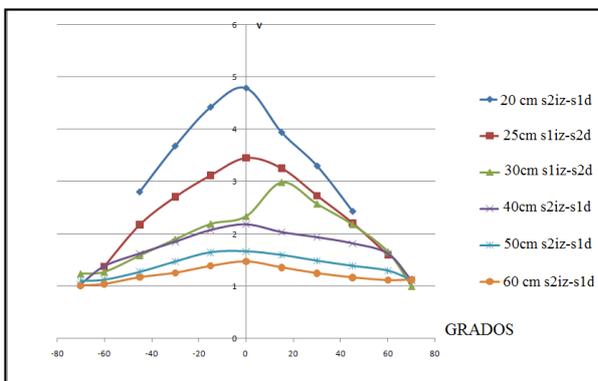


Figura 7. Respuesta del Sensor a la Variación del Ángulo de Incidencia.

El comportamiento de la curva sigue una tendencia potencial la cual se adecua a la ley de los inversos cuadrados de la fotometría(1):

$$S(x, \theta) = (\alpha * \cos \theta / x^2) + \beta, \rightarrow (18)$$

Durante la prueba se tomaron ciertos factores en cuenta:

- $\theta = 0$ debido al ángulo de incidencia de 0° el factor $\cos \theta$ es igual a 1.
- β siendo componente DC.
- $\alpha_i = 1$ coeficiente de reflexión de la superficie.

Para las siguientes condiciones se obtuvo un α_0 de $0.042885V.m^2$:

1. $S(x) = 1.12$ Voltios Salida en voltios del sensor

2. $X = 0.3$ metros, Distancia de posicionamiento obstáculo, sensor
3. $\alpha_i = 1$, coeficiente de reflexión supuesto para una superficie regular blanca.

4. CONCLUSIONES

Se Implementó un bloque de percepción sensorial basado en un anillo de sensores de infrarrojos.

Se diseñó e implementó el hardware de emisión y recepción de la señal infrarroja para diferentes tipos de superficies y distancias.

Hallar α_0 es una tarea muy importante pues es el parámetro característico del sensor, este dato hace parte de las condiciones para medir distancia con sensores infrarrojos.

Se corroboró la viabilidad de la implementación en Hardware reconfigurable FPGAS, para la implementación de tareas propias de robótica móvil, en este caso la medición de distancias a los objetos cercanos a la plataforma móvil, utilizando sensores infrarrojos, donde los resultados fueron muy satisfactorios, dado que el error de distancia fue del 1%.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] Blanes, F, "Percepción y Representación del Entorno en Robótica Móvil.", PhD. Tesis. Departamento de Informática de Sistemas y Computadores. Universidad Politécnica de Valencia. Valencia, España. Septiembre de 2000.
- [2] Aytaç T y Barshan, B, "Differentiation and localization of target primitives using infrared sensors.", Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, pp. 105 - 110. Lausanne, Suiza Octubre 2002.
- [3] Aytaç T y Barshan, B, "Rule-based target differentiation and position estimation based on infrared intensity measurements.", Optical Engineering, vol.42, N°.6, pp.1766-1771, June 2003.
- [4] Adams. M.D, "Sensor Modelling, Design and Data Processing for Autonomous Navigation.", World Scientific Publishing, Series in Robotics and Intelligent Systems. Singapore, 1999.
- [5] Parker, L. "Current State of the Art in Dist Distributed Autonomous Mobile Robotic", Distributed Autonomous Robotic Systems. Tokyo. Vol 4, (2000); p. 3-12.
- [6] Novotny P y Ferrier N, "Using infrared sensors and the Phong illumination model to measure distances." Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation, pp. 1644 - 1649. Detroit, 1999.
- [7] Borges, G, Nogueira, A y G. S. Deep, "Characterization of a Trajectory Recognition Optical Sensor for an Automated Guided Vehicle.", IEEE Transactions on Instrumentation and measurement, Vol. 49, N°. 4, pp. 813 - 819. 2000