

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA



TESIS DOCTORAL

**”Alternativa de Medida de Distancias
Mediante la Aplicación del Modelo
Radiométrico.”**

Angel Enrique Cano García

2010

UNIVERSIDAD DE ALCALÁ

ESCUELA POLITÉCNICA SUPERIOR

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA



**“Alternativa de Medida de Distancias Mediante la
Aplicación del Modelo Radiométrico.”**

TESIS DOCTORAL

Autor

Angel Enrique Cano García

Directores

José Luis Lázaro Galilea y Óscar Esteban Martínez.

2010

A mis padres, mi esposa y mi hija.

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a mis directores en Cuba y España por las oportunas recomendaciones y dirección, y además por ser un ejemplo a seguir tanto en lo personal como en lo profesional.

A mis compañeros de Cuba como los nuevos amigos que he hecho en mis estancias en Alcalá que me han soportado y han tenido siempre una frase de ánimo durante todo el desarrollo de esta tesis.

Personalmente, merecen un reconocimiento más que especial mis padres, mi "Negra" y mi "Princesita" que han sufrido en carne propia el desarrollo de esta tesis, que sin su apoyo nada de esto hubiera sido posible y por ser el combustible que me ha motivado a superarme. (QDNMAL3SJ, QAS, Amen!)

A mis compañeros en la UO que me han apoyado y me han alentado a terminar el doctorado.

Y en general a todos los que una forma u otra han contribuido al desarrollo de esta tesis.

Resumen

En esta tesis se presenta un estudio del problema de la estimación de la distancia entre una cámara y una baliza de infrarrojo para lo que ha utilizado una alternativa de medida que toma como información fundamental los valores de gris que produce la energía emitida por la baliza.

La alternativa que se ha propuesto parte de una base radiométrica mediante la cual se obtiene una medida de la energía acumulada por la cámara. Se han estudiado e identificado las magnitudes que afectan a la energía acumulada por la cámara y se ha propuesto un modelo para relacionarlas.

A partir de este modelo, se ha definido una alternativa diferencial de medida de la distancia suponiendo que la cámara y la baliza son coplanares.

Por otro lado se presenta un estudio para incluir el ángulo de orientación de la baliza respecto a la cámara y su efecto en la energía acumulada, lo que ha permitido definir una metodología para obtener los parámetros del modelo.

El modelo de energía acumulada representa una ecuación que se extrae de las imágenes. Con el objetivo de aumentar el número de ecuaciones en la alternativa de medida se han definido nuevas características que se extraen de las imágenes y se han relacionado con las mismas magnitudes que afectan a la energía acumulada. En total se han definido tres características y sus correspondientes modelos, que han sido validados para la estimación de la distancia entre una cámara y una baliza de infrarrojo.

Utilizando las tres ecuaciones que se han definido se ha propuesto una metodología con independencia de la intensidad radiante de la baliza que se ha utilizado en la medida de la distancia y del ángulo de orientación.

La alternativa de medida final así como cada una de las características modeladas han sido utilizadas para la medida de distancias entre una cámara y una baliza y se ha demostrado su validez.



Abstract

This thesis deals the problem of estimating the distance between an infrared emitter and a camera using pixels gray level intensities as principal source of information extracted from images to proposed an alternative to solve it.

The proposed alternative is based on radiometrical point of view that is used to define a measure of the image accumulated energy. Magnitudes that affect accumulated energy have been detected and also have been related to the accumulated energy to propose a behavior model.

Using the proposed model, a differential alternative to estimate the distance between a camera and an emitter had been defined supposing that the camera and the emitter are aligned.

Besides, a method to include the emitter orientation angle on the camera to emitter distance estimation model have been presented, and also a calibration scheme have been proposed.

The model of accumulated energy represents one equation extracted from one image. To increase the number of equation to be used in the distance estimation problem, new characteristics extracted from images have been defined. New characteristics have been related to same magnitudes used on accumulated energy model. Then three equations can be obtained from one image. Each of one characteristic has been validated to estimate the distance between a camera and an emitter.

Using these three defined equations a radiant intensity free scheme has been proposed as an alternative to estimate the distance between the emitter and the camera and emitter the orientation angle.

The proposed alternative has been used to estimated the distance between the camera and the emitter and have been demonstrated that it is a useful alternative to measure the distance between an emitter and a camera.



Índice general

1. Introducción a la tesis	1
1.1. Introducción.	1
1.2. Motivación de la tesis.	2
1.3. Contexto de desarrollo.	2
1.4. Estructura de la tesis.	3
2. Revisión de conocimientos	5
2.1. Introducción.	5
2.2. Modelos geométricos.	5
2.2.1. Modelado de la cámara.	5
2.2.2. Estimación de profundidad a partir de dos cámaras. (Visión estereoscópica).	7
2.2.3. Medida de distancia a partir del movimiento.	8
2.2.4. Medida de Profundidad mediante el (des)enfoque.	10
2.2.5. Medida de distancia a partir de triangulación con luz estructurada.	12
2.3. Métodos no geométricos.	13
2.3.1. Introducción.	13
2.3.2. Respuesta radiométrica de la cámara.	14
2.3.3. Obtención de formas a partir de sombras.	21
2.4. Conclusiones de la revisión de conocimientos y objetivos de la tesis.	23
2.4.1. Conclusiones de la revisión de conocimientos.	23
2.4.2. Objetivos de la tesis.	24
3. Condiciones generales de desarrollo	27
3.1. Introducción.	27
3.2. Planteamiento general.	27
3.2.1. Energía detectada en un superficie receptora.	28
3.3. Baliza de infrarrojos.	29
3.4. La cámara.	31
3.5. Selección de la longitud de onda.	36
3.6. Medida de la energía relativa acumulada por la cámara.	42
3.6.1. Comportamiento de E_r con el tiempo de exposición.	44
3.6.2. Comportamiento de E_r con la intensidad radiante del emisor.	45
3.6.3. Comportamiento de E_r con la orientación del emisor respecto a la cámara.	46
3.6.4. Comportamiento con la distancia entre la cámara y el emisor.	47

3.7. Conclusiones.	48
4. Modelo para el sistema cámara-baliza de infrarrojos	51
4.1. Introducción.	51
4.2. Modelo radiométrico preliminar para E_r	51
4.3. Modificación del modelo preliminar.	54
4.4. Análisis de los errores en la estimación de distancias. Curvas de bañera.	59
4.5. Conclusiones.	64
5. Efectos de la variación de los parámetros en la estimación de distancias	65
5.1. Introducción.	65
5.2. Errores en el proceso de medida debido a la variación de los parámetros del modelo.	65
5.2.1. Error en la medida de distancias debido a variaciones en el tiempo de exposición en la cámara.	66
5.2.2. Error en la medida de distancias debido a variaciones en la corriente de polarización del emisor.	70
5.2.3. Error en la medida de distancias debido a variaciones en la energía relativa acumulada por la cámara.	72
5.3. Errores en la medida de distancia debido a variaciones en todos los parámetros.	73
5.4. Conclusiones.	75
6. Efectos del patrón de radiación de la baliza	77
6.1. Introducción.	77
6.2. Reformulación del modelo para incluir el ángulo de orientación del emisor.	77
6.2.1. Estimación del ángulo de orientación relativa del emisor respecto a la cámara.	79
6.3. Comportamiento de E_r con el ángulo de orientación de la baliza.	85
6.3.1. Errores en la estimación de distancias en función del error en el ángulo de orientación del emisor.	88
6.4. Conclusiones.	89
7. Propuesta de independización de la intensidad radiante del emisor	91
7.1. Introducción.	91
7.2. Componente de continua de la FFT de las imágenes.	92
7.2.1. Comportamiento de la componente de continua de la FFT de las imágenes con la intensidad radiante del emisor.	93
7.2.2. Comportamiento de la componente de continua de la FFT de las imágenes con el tiempo de exposición en la cámara.	94
7.2.3. Comportamiento de la componente de continua de la FFT de las imágenes con la distancia entre la cámara y la baliza.	95
7.2.4. Propuesta de modelo a partir de la componente continua de las FFT de las imágenes del emisor.	96
7.3. Consideración del ángulo de orientación de la baliza en el modelo para $ F(0,0) $	98

7.4.	Desviación estándar de los valores de gris de las imágenes de la baliza. .	100
7.4.1.	Comportamiento de la desviación estándar con la corriente de polarización del emisor.	100
7.4.2.	Comportamiento de la desviación estándar con el tiempo de exposición.	101
7.4.3.	Comportamiento de la desviación estándar con la distancia entre la cámara y el emisor.	102
7.4.4.	Propuesta de modelo de la desviación estándar para el cálculo de la distancia.	103
7.4.5.	Consideración del ángulo de orientación en el modelo de desviación estándar.	105
7.5.	Propuesta del modelo independizado de la intensidad radiante de la baliza.	107
7.6.	Metodología de calibración y ajustes de los parámetros del modelo. . .	110
7.7.	Modelo independiente de la intensidad radiante de la baliza para el cálculo de la distancia.	114
7.8.	Metodología para optimización del ángulo de orientación y la distancia.	117
7.9.	Conclusiones.	122
8.	Validación experimental	125
8.1.	Introducción.	125
8.2.	Modelo de la energía relativa acumulada por la cámara.	126
8.2.1.	Selección de tiempos óptimos.	128
8.3.	Modelo de la componente continua de la FFT de las imágenes de la baliza.	131
8.4.	Modelo de la desviación estándar de los valores de gris.	133
8.5.	Resultados del modelo independiente.	135
8.5.1.	Estimación de distancias mediante modelo independiente de la corriente de polarización de la baliza.	136
8.5.2.	Estimación de la distancia alimentando la baliza con una corriente aleatoria.	140
8.5.3.	Repetitividad en la estimación de distancias.	142
8.6.	Conclusiones.	144
9.	Conclusiones y trabajos futuros	147
9.1.	Introducción.	147
9.2.	Conclusiones y aportaciones de la tesis.	147
9.3.	Publicaciones derivadas de la tesis.	149
9.4.	Trabajos Futuros.	149
	Bibliografía	151

Capítulo 1

Introducción a la tesis

1.1. Introducción.

El desarrollo en los dispositivos sensores, conjuntamente con el desarrollo de la electrónica, ha permitido la realización de nuevas aplicaciones cada vez más complejas y eficientes; y además orientadas a casi todo tipo de aplicación dentro de la economía, la ciencia y la sociedad.

La construcción de dispositivos de captura de imágenes se ha beneficiado de este despegue científico-tecnológico, no sólo en el desarrollo de dispositivos para vídeo y fotografía, sino para aplicaciones mucho más específicas relacionadas con la visión artificial, la metrología usando cámaras, los espacios inteligentes y la robótica.

En muchas aplicaciones en las que se utiliza la visión artificial se demanda una relación precisa entre la métrica del sensor de imagen y la métrica del entorno, sobretodo para aplicaciones de posicionamiento de robots, metrología con cámaras, reconstrucción de entornos, entre otras.

Numerosos trabajos se han realizado en este campo y una buena parte de ellos se han orientado a realizar medidas cuantitativas del entorno. Sin embargo, la mayoría de los trabajos se han sustentado en una base geométrica del proceso de formación de imágenes.

El análisis de los sistemas de visión mediante el modelo geométrico supone que el entorno tri-dimensional se proyecta en el plano sensor, el cual es un espacio 2-D con la consiguiente pérdida de una de las dimensiones: la profundidad.

La recuperación de la profundidad ha abierto una línea de investigación. En este sentido es posible distinguir varias técnicas, pasivas o activas profundamente analizadas por multitud de autores. En las primeras, la visión estereocópica es la más representativa, porque intenta emular el sistema de visión humano. En las técnicas activas, por el contrario, se emite un patrón conocido al entorno, lo que matemáticamente significa incluir en el sistema de una nueva ecuación, con el mismo número de incógnitas y posibilita recuperar la profundidad.

Por otro lado, existen modelos para los sistemas de visión que su base principal no es la proyección perspectiva del entorno en el plano de imagen, sino la interacción de la luz con el entorno y su correspondiente efecto en el sensor.

Estas alternativas, al igual que la visión estéreo, emulan el comportamiento de la visión humana mediante la extracción de pistas relacionadas con la profundidad a través de las sombras (*Shape from Shading*).

Los métodos de *Shape from Shading* tienen una base predominantemente radiométrica-

ca, y su objetivo principal es el cálculo de la forma, la cual involucra estimaciones de profundidades relativas. Estos métodos usan como fuente principal de información los valores de gris de los píxeles y no su posición como en el caso de los métodos geométricos. Esta variante es un punto de partida importante en el desarrollo de una alternativa de medida de distancias basada en los niveles de luminancia de las imágenes. Considerando que la información de color no es relevante para la recuperación de la profundidad, se utilizarán en toda la memoria dispositivos de captura de imágenes monocolor.

1.2. Motivación de la tesis.

La existencia de métodos de estimación de formas (profundidades relativas) sugiere diferentes métodos de análisis y tratamiento en el campo del posicionamiento y la medida de distancias.

Por otro lado, algunas propuestas de posicionamiento en espacios inteligentes, como por ejemplo [1], utilizan una baliza a bordo del robot y mediante métodos geométricos estiman la posición de la baliza, así como su orientación. La baliza generalmente es una fuente de luz que facilita su detección y segmentación en las imágenes capturadas por la cámara.

En un sistema como el que se propone en [1], al menos un par de cámaras deben tener visibilidad directa con el robot para realizar un posicionamiento 3-D. Este hecho puede simplificarse al uso de una única cámara, si se calcula de forma paralela la distancia entre la cámara y la baliza a bordo del robot, basándose en métodos similares a los métodos de *Shape from Shading*.

Una vez comprobada la posibilidad de extraer la distancia entre una baliza a bordo de un robot y una cámara estratégicamente ubicada en el entorno, de forma individual, el modelo geométrico de la cámara permitiría estimar las coordenadas 2-D del punto de interés, y la propuesta basada en el modelo radiométrico daría la distancia entre la cámara y la baliza. Con estos datos, se podría interpretar que el modelo geométrico daría las coordenadas de la baliza en un plano y que la distancia entre dicho plano y la cámara se estimaría por el modelo radiométrico. En otras palabras, sería posible obtener un sistema de posicionamiento 3-D utilizando una baliza de infrarrojo y una única cámara.

1.3. Contexto de desarrollo.

La tesis se enmarca dentro de las actividades de investigación que se realizan en el grupo de investigación GEINTRA (Grupo de Ingeniería aplicada a los Espacios Inteligentes y el Transporte), perteneciente al Departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá.

Concretamente, esta tesis se ha desarrollado dentro de los proyectos:

- “*Sistema de localización y posicionamiento absoluto de robots*” (*SILPAR*) financiado por Ministerio de Ciencia y Tecnología de España, con referencia: DPI2003-05067, que tiene como objetivo principal estudiar nuevas estrategias para el posicionamiento y localización de robots, en espacios o entornos inteligentes; mediante

nuevos tipos de sensores basados en infrarrojos, fibra óptica y dispositivos optoelectrónicos.

- “*Desarrollo de un espacio inteligente integral, mediante técnicas de optoelectrónica y fotónica y arquitecturas de procesamiento avanzadas, para localización absoluta de robots*” (*SILPAR II*), financiado por el Ministerio de Ciencia y Tecnología de España, con referencia: DPI-2006-05835, el cuál utiliza los avances del *SILPAR I* y además tiene como objetivo estudiar nuevas alternativas de medida mediante el valor RMS de las señales, a partir de métodos diferenciales.
- “*Contribución a los Espacios Inteligentes mediante el Desarrollo e Integración de Sensores de Posicionamiento basados en Infrarrojo y Arquitecturas específicas de Procesado*” (*ESPIRA*) con referencia DPI2009-10143, financiado también por el Ministerio de Ciencia y Tecnología de España. En éste se continúa el trabajo en espacios inteligentes utilizando señales de infrarrojo y técnicas de optoelectrónica. Sin embargo, entre los objetivos de este proyecto está estudiar el comportamiento sistema cámara-emisor para formular una metodología de medida de la distancia y posteriormente reformular los modelos geométricos con alternativas radiométricas que permitan desarrollar un sistema de posicionamiento 3D con una única cámara.

1.4. Estructura de la tesis.

En la redacción de la tesis se ha utilizado una división en capítulos que coinciden con los temas fundamentales que se han desarrollado en ella.

En el capítulo 2 se describen los métodos fundamentales que se utilizan en el cálculo de la distancia entre un punto y una cámara mediante los dos modelos fundamentales que suelen utilizarse en visión artificial: los modelos geométricos y modelos no geométricos.

En el capítulo 3 se describen las condiciones generales de desarrollo de nuestra propuesta, haciendo énfasis en el enfoque energético del proceso de formación de imágenes de una baliza de infrarrojo en una cámara. Además en este capítulo se definen, desde el punto de vista analítico y empírico los comportamientos de la energía acumulada por la cámara y las magnitudes que la afectan considerando que tanto la cámara como la baliza son coplanares, y que se sitúan una frente a la otra en una habitación oscura.

En el capítulo 4, basado en los comportamientos empíricos medidos se propone un modelo preliminar que relaciona la energía acumulada por la cámara con las magnitudes que la afectan, bajo la condición de que la cámara y la baliza estén alineadas y enfrentadas. También en este capítulo se propone una modificación del modelo preliminar para el cual se repitieron los experimentos empíricos en ambientes iluminados pero manteniendo la condición de coplanaridad entre la baliza y la cámara.

Por otro lado, en el capítulo 4 se demuestra que existe una relación entre la precisión en la estimación de la distancia con el tiempo de exposición con que se capturen las imágenes y en la que se evidencia que existen unos valores óptimos para realizar las medidas y que estos valores pueden extraerse del proceso de calibración del modelo.

En el capítulo 5 se simula el comportamiento de la medida de distancia frente a la variación de los parámetros del modelo para detectar en qué proporción afectan cada

uno de ellos por separado en la medida de distancia final.

Los capítulos anteriores asumen que la cámara y la baliza están alineadas y una frente a la otra, condición que en la realidad es muy difícil de conseguir. Por este motivo, en el capítulo 6 se describe el procedimiento para incluir el ángulo de orientación relativa de la baliza respecto a la cámara en el modelo de energía acumulada.

En el capítulo 7 se proponen nuevas características a extraer de las imágenes y se relacionan con las mismas magnitudes de las que depende la energía acumulada, con el objetivo de aumentar el número de ecuaciones en el modelo. Se define además, una metodología de medida que estima el ángulo de orientación conjuntamente con la distancia entre la cámara y la baliza.

Por su parte, en el capítulo 8 se muestran los resultados experimentales para la validación de cada una de las alternativas de modelo que se obtienen por cada una de las características que se extraen de las imágenes. A su vez, se muestran los resultados de la propuesta de medida de distancias con independencia de la intensidad radiante de la baliza.

Por último, en el capítulo 9 se exponen las conclusiones y trabajos futuros que se derivan de esta investigación así como las publicaciones con índices de calidad relativa que se han obtenido en el desarrollo de la tesis.

Capítulo 2

Revisión de conocimientos

2.1. Introducción.

La necesidad de realizar medidas cuantitativas del entorno usando visión artificial implica modelar los sistemas sensoriales con la suficiente precisión. Posteriormente, el modelado permitirá realizar una correspondencia entre la métrica de la cámara y la métrica del entorno.

Dentro de las medidas cuantitativas, la estimación de la distancia que separa la cámara de un punto específico del entorno (medida de profundidad), es una de las más importantes, ya que permite caracterizar el entorno; como por ejemplo: la detección de salientes, esquinas, obteniendo el posicionamiento tridimensional de un punto del entorno.

En este Capítulo se hace un resumen de los diferentes modelos aplicados al problema de la estimación de la distancia entre la cámara y un punto en el entorno, tanto geométricos como no geométricos.

2.2. Modelos geométricos.

Los modelos de cámara describen matemáticamente su comportamiento físico, y en el caso de los modelos geométricos, se basan en la relación precisa de las coordenadas de los puntos del entorno, caracterizado por un espacio 3D, y sus correspondientes imágenes en el sensor de la cámara (espacio bidimensional).

2.2.1. Modelado de la cámara.

El modelo geométrico de cámara parte del modelo *pin-hole*, en el que se considera una proyección perspectiva entre el espacio 2D y el entorno 3D. No obstante, existen algunas variantes que se basan en proyección ortográfica [2], proyección débil [3], proyección paraperspectiva y proyección afín [4].

La variante que utiliza proyección perspectiva es el método más usado debido a su sencillez y a los buenos resultados que se obtienen en la mayoría de las aplicaciones prácticas [1].

En la Figura 2.2.1 se muestra el modelo de proyección perspectiva de una cámara *pin-hole*.

Partiendo de la Figura 2.2.1, un punto \mathbf{P} definido en el sistema de coordenadas del entorno (RW) y dados por las coordenadas (X_i, Y_i, Z_i) se proyecta en el plano de imagen

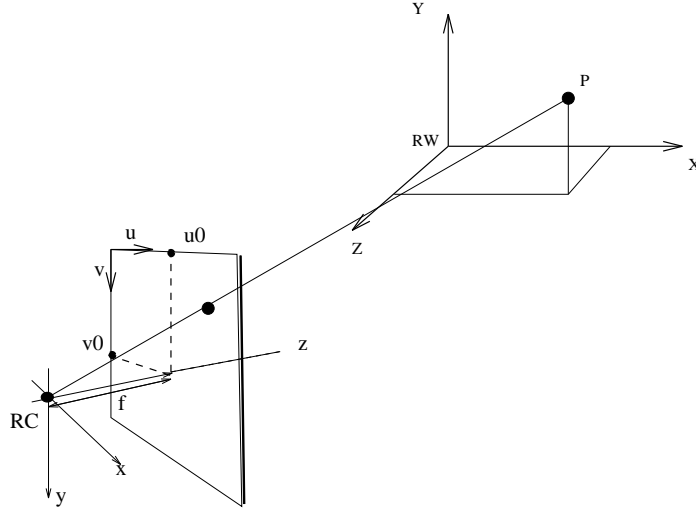


Figura 2.2.1: Modelo de proyección perspectiva.

en las coordenadas (x_i, y_i, z_i) definido en el sistemas de coordenadas de la cámara (RC) a través de:

$$\begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ z_i \end{bmatrix} = \lambda_i \mathbf{R} \begin{bmatrix} X_i + T_x \\ Y_i + T_y \\ Z_i + T_z \end{bmatrix} \quad (2.2.1)$$

donde $z_i = f$ que es la distancia focal de la cámara, λ_i es un factor de escala que mapea los puntos del entorno y del plano de imagen, (T_x, T_y, T_z) y \mathbf{R} representan el vector de traslación y la matriz de rotación entre RC y RW, respectivamente.

La matriz de rotación puede escribirse en función de los ángulos de Euler como:

$$\mathbf{R} = \begin{bmatrix} \cos \gamma \cos \beta & \text{sen} \gamma \cos \alpha + \cos \gamma \text{sen} \beta \text{sen} \alpha & \text{sen} \gamma \text{sen} \alpha - \cos \gamma \text{sen} \beta \cos \alpha \\ -\text{sen} \gamma \cos \beta & \cos \gamma \cos \alpha - \text{sen} \gamma \text{sen} \beta \text{sen} \alpha & \cos \gamma \text{sen} \alpha + \text{sen} \gamma \text{sen} \beta \cos \alpha \\ \text{sen} \beta & -\cos \beta \text{sen} \alpha & \cos \beta \cos \alpha \end{bmatrix} \quad (2.2.2)$$

siendo α la rotación alrededor de X , β la rotación alrededor de Y y γ la rotación alrededor del eje Z .

Las coordenadas (x_i, y_i, z_i) están dadas en unidades métricas. En la práctica las unidades métricas se convierten a unidades píxelicas mediante una matriz que contiene las dimensiones del píxel y las coordenadas píxelicas del centro de proyección (u_0, v_0) .

$$\lambda \begin{bmatrix} u \\ v \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_x & s & u_0 \\ 0 & f_y & v_0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_i \\ y_i \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.2.3)$$

siendo $f_x = \frac{f}{du}$, $f_y = \frac{f}{dv}$, du y dv las dimensiones del píxel y s es el parámetro de “skew”. La matriz triangular superior en la expresión (2.2.3) es llamada: *Matriz de Calibración* [5, 6, 4, 7]

El modelo *pin-hole* es válido para lentes delgadas donde el espesor de éstas se puede considerar despreciable y todos los rayos principales pasan por el mismo punto. Por el

contrario, cuando se trabaja con lentes gruesas, este modelo no tiene en cuenta que la transformación entre las coordenadas de los puntos en el espacio y sus correspondientes valores en el plano imagen, vienen dados por dos planos principales diferentes. Esto hace que el modelo deba ser corregido con la ayuda de otros parámetros que permitan considerar la distorsión radial y tangencial que se introduce [8, 1, 9]:

$$\begin{aligned} do_x &= do_{xr} + do_{xt} \\ do_y &= do_{yr} + do_{yt} \end{aligned} \quad (2.2.4)$$

En las referencias [10, 11, 7] se propusieron modelos matemáticos basados en polinomios para representar las distorsiones introducidas por la lente de la cámara. Por tanto, las distorsiones pueden aproximarse mediante:

$$\begin{aligned} do_{xr} &= (u - u_0) du (a_1 r^2 + a_2 r^4 + a_3 r^6) \\ do_{yr} &= (v - v_0) dv (a_1 r^2 + a_2 r^4 + a_3 r^6) \end{aligned} \quad (2.2.5)$$

y

$$\begin{aligned} do_{xt} &= p_1 [r^2 + 2(u - u_0)^2 du^2] + 2p_2 (u - u_0) du (v - v_0) dv \\ do_{yt} &= p_2 [r^2 + 2(v - v_0)^2 dv^2] + 2p_1 (u - u_0) du (v - v_0) dv \end{aligned} \quad (2.2.6)$$

siendo a_1 , a_2 y a_3 los coeficientes del polinomio que modela la distorsión radial, p_1 y p_2 los coeficientes del polinomio que modela la distorsión tangencial y r definido por:

$$r = \sqrt{(u - u_0)^2 du^2 + (v - v_0)^2 dv^2} \quad (2.2.7)$$

representa la distancia radial entre el punto en la imagen y el punto principal o centro de proyección.

En [12, 13, 1] se describe el proceso de calibración del modelo geométrico de una cámara, cuyo modelo final queda definido por:

$$\begin{aligned} u + e_u &= u_0 + do_x + f_x \frac{r_{11}(X+T_x)+r_{12}(Y+T_y)+r_{13}(Z+T_z)}{r_{31}(X+T_x)+r_{32}(Y+T_y)+r_{33}(Z+T_z)} = P(\Phi) \\ v + e_v &= v_0 + do_y \frac{f_y}{f_x} + f_y \frac{r_{21}(X+T_x)+r_{22}(Y+T_y)+r_{23}(Z+T_z)}{r_{31}(X+T_x)+r_{32}(Y+T_y)+r_{33}(Z+T_z)} = Q(\Phi) \end{aligned} \quad (2.2.8)$$

donde $\Phi = [u_0, v_0, a_1, a_2, a_3, p_1, p_2, f_x, f_y, T_x, T_y, T_z, \alpha, \beta, \gamma]^T$ es un vector que contiene los parámetros *intrínsecos* (características de la cámara y la lente) y *extrínsecos* (posición geométrica relativa entre RW y RC) y además, se incluye el error en las medidas de las coordenadas de los puntos en la imagen e_u y e_v .

La expresión (2.2.8) se resume de forma matricial como:

$$\mathbf{p} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{P} \quad (2.2.9)$$

donde \mathbf{P} representa el punto en el sistema de coordenadas del espacio y \mathbf{p} su correspondiente proyección en la imagen a partir de la *Matriz de Proyección* \mathbf{M} que constituye el modelo geométrico de la cámara [6].

2.2.2. Estimación de profundidad a partir de dos cámaras. (Visión estereoscópica).

Del modelo de cámara representado por la expresión (2.2.9), el cálculo del punto \mathbf{P} a partir de la matriz de proyección y las coordenadas del punto en la imagen es un

proceso que tiene infinitas soluciones. De hecho, el resultado de este proceso es una recta que pasa por el centro de la proyección, el punto \mathbf{P} y por \mathbf{p} en el plano de imagen. Si se incluye otro dispositivo de visión previamente calibrado, en el que se proyecte el mismo punto del entorno, las rectas que se obtienen de sus correspondientes modelos de proyección individuales se intersectan en el punto \mathbf{P} , y por tanto se pueden calcular sus coordenadas en el espacio y por tanto la profundidad. Esta metodología se conoce como triangulación y fue utilizada en [1, 8, 14, 15, 6, 16, 17].

Estas metodologías de dos cámaras (visión estéreo) intentan emular la visión humana y se describen además, por la *Geometría Epipolar*, la cual es independiente de la estructura de la escena y solamente depende de los parámetros intrínsecos de las cámaras y de su posición relativa.

La cuestión clave está en garantizar la correspondencia entre los puntos en ambas imágenes [17, 6]. La geometría epipolar ayuda a mejorar la eficiencia en el proceso de correspondencia de puntos.

Matemáticamente se ha demostrado que los puntos en correspondencia en parejas de imágenes de un par estéreo están en las respectivas rectas epipolares de ambas imágenes, con lo cual se reduce el espacio de búsqueda en las imágenes [6, 17, 16].

En cuanto a la correspondencia entre puntos del par estéreo, en [18] se realiza una evaluación y una clasificación de los algoritmos de correspondencia aplicados a visión estéreo que permite la selección óptima del algoritmo a utilizar, así como, desarrolla una metodología para la evaluación cuantitativa de dichos algoritmos.

Uno de los problemas comunes de este tipo de triangulación es el error en la intersección de las rectas de proyección. En ocasiones no se obtiene una única solución, esto quiere decir que las rectas de proyección se cruzan y no se intersectan. Por tanto, se obtienen un segmento que se corresponde con la distancia mínima entre las dos rectas.[1].

Algunos autores, como por ejemplo [6], asocian al punto final como el punto medio del segmento formado por ambas soluciones, sin embargo en [1] se utiliza una solución donde se premia la proximidad del punto final a la solución más precisa. En otras palabras, en [1] se considera la precisión en el proceso de calibración de cada cámara por separado.

2.2.3. Medida de distancia a partir del movimiento.

La medida de profundidad basada en movimientos puede verse también como un proceso de triangulación, que a diferencia de la visión estéreo, los diferentes puntos de vista se obtienen por movimientos de la cámara o de los objetos respecto a la cámara.

En la Figura 2.2.2 se muestra un esquema simplificado de dos dimensiones en la que se explica el fundamento del método de medida de profundidad a partir de movimientos.

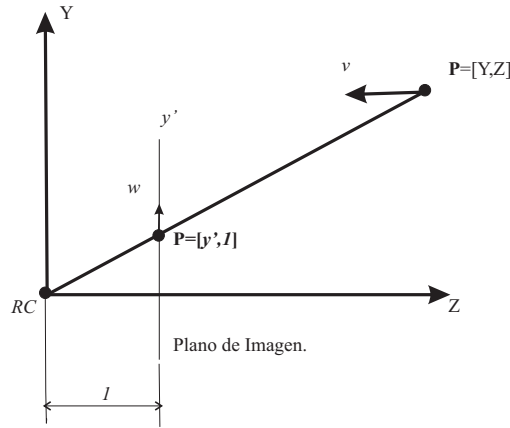


Figura 2.2.2: Esquema simplificado para el análisis de los métodos de estimación de profundidad a partir de movimientos.

Suponiendo el sistema con distancia focal unitaria y el punto \mathbf{P} del entorno se mueve en dirección a la cámara con una velocidad $v = \frac{dZ}{dt}$, su correspondiente proyección en la imagen $\mathbf{p} = [y', 1]$ con $y' = \frac{Y}{Z}$, se moverá entonces con una velocidad $w = \frac{dy'}{dt}$, que es la proyección del movimiento de \mathbf{P} en la imagen. Si se sustituye $y' = \frac{Y}{Z}$ en la expresión de la velocidad del punto en la imagen, al resolver las derivadas se obtiene que: $Z = -\frac{y'v}{w}$. De modo que si un punto en el espacio describe una traslación con una velocidad conocida, y además si se conoce la proyección en la imagen de dicha velocidad, es posible estimar la profundidad.

Uno de los primeros análisis para la estimación de la profundidad a partir del movimiento fue publicado en [19], donde plantea que cuando el sensor de imágenes se mueve realizando una traslación pura, ya sea acercándose a los objetos en la escena o en sentido contrario, la proyección de los puntos de la escena siguen un movimiento en la imagen que se conoce como: curvas de flujo, y para el caso de movimientos paralelos al eje óptico de la cámara, estas curvas convergen en un punto conocido como: *foco de expansión o contracción* (expansión o contracción si el movimiento que se realiza es hacia delante o hacia atrás respectivamente).

En [19] se plantea que puede estimarse la distancia entre la cámara y un punto en la escena, a partir del foco de expansión o contracción y la distancia recorrida por la cámara de imagen a imagen. En caso de que solo se tenga conocimiento de que el movimiento del sensor de imágenes es constante, pero no se conozca la distancia recorrida, la distancia estimada tendrá un carácter relativo.

El análisis anterior está basado en proyección perspectiva, sin embargo en [20] se demuestra que para proyección ortográfica sucede algo diferente, y es que la información de profundidad a partir de movimientos solo puede extraerse de la componente rotacional del movimiento.

En la práctica los movimientos no solamente se limitan a traslaciones y además, se trata de que el sistema de medida sea lo suficientemente automático como para extraer cada una de las componentes del movimiento y a su vez la distancia. Una de las metodologías que se utiliza en la detección y cuantificación de movimientos a partir de imágenes se conoce con el nombre de *flujo óptico*.

En [21, 22] se describen las expresiones del movimiento de un punto \mathbf{P} y su correspondiente proyección en la imagen.

Las aplicaciones que utilizan flujo óptico existen dos vertientes fundamentales: el uso de flujo óptico para la detección de movimientos y estimar la velocidad de los objetos que se mueven [23, 24, 25] y la segunda vertiente enfocada en la detección de la forma, caracterización de los objetos y medida de la profundidad [22, 21, 26].

En la referencia [27] se analizan las diferentes técnicas de detección de flujo óptico como mecanismo de medida inicial para otras aplicaciones tales como, la interpretación pasiva de escenas y la exploración activa, entre otras.

En dependencia de la aplicación en la que se usarán estas técnicas, la selección del método para estimar flujo óptico es crítica. Por ejemplo, en [27] se plantea que para la caracterización pasiva de una escena se requiere medidas de flujo óptico precisas y densas, hasta el punto de necesitar medidas de flujo óptico con menos de un 10 % de error.

2.2.4. Medida de Profundidad mediante el (des)enfoque.

El punto de partida de los métodos para estimar la profundidad a partir del enfoque (desenfoque), está basado en los principios de la óptica geométrica y el concepto conocido como: *Profundidad de Campo*.

En la Figura 2.2.3 se muestra un esquema simplificado de los principios básicos del método de estimación de distancias por desenfoque:

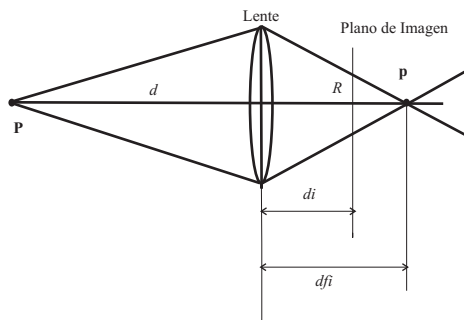


Figura 2.2.3: Esquema básico que describe el método de estimación de distancias por enfoque/desenfoque.

Todos los rayos emitidos por el punto **P** que pasan a través de la lente, son refractados por el sistema para converger en el punto **p** en el plano imagen. De modo que, si en el sistema óptico la posición del plano de imagen respecto a la lente es la adecuada, en **p** se obtendrá una imagen enfocada de **P**, de lo contrario, la energía que proviene del entorno se distribuye en un área determinada y produciría una imagen desenfocada de **P** [28, 29].

Para el caso de lentes delgadas, existe una relación que tiene en cuenta la distancia al objeto (distancia entre la cámara y el punto **P**, (d)), la distancia focal de la lente (f) y la distancia del plano imagen a la lente (d_{fi}), que se conoce como *ley de Gauss* [30, 28, 31, 32]:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{d_{fi}} = \frac{1}{f} \tag{2.2.10}$$

y que puede utilizarse para estimar el radio R de la mancha sobre la cual se distribuye la energía proveniente de \mathbf{P} . Por lo tanto, a partir de las dimensiones de la imagen desenfocada de \mathbf{P} y la *ley de Gauss*, puede calcularse la distancia entre la cámara y el objeto [33, 29].

En resumen, la diferencia principal entre los métodos de estimación de distancias a partir del enfoque(desenfoque) radican en la forma con que se estiman el desenfoque en las imágenes.

En el cálculo de los niveles de enfoque/desenfoque interviene la función de dispersión del punto (*PSF: Point Spread Function*), la cual, describe la respuesta del sistema de imágenes a una fuente puntual o a un punto en la escena [33, 34]. La literatura resume dos formas para la PSF, una forma cilíndrica y una forma gaussiana bi-dimensional[35].

La PSF y su par transformado, la función de transferencia óptica (*OTF: Optical Transfer Function*) constituyen la esencia de los indicadores enfoque/desenfoque. Estos indicadores son: la energía de la imagen que se calcula en el dominio frecuencia usando la OTF, la energía del gradiente de la imagen y la energía del laplaciano de la imagen. En todos los casos, un mayor enfoque implica mayor contenido de alta frecuencia (entropía) en la imagen y por tanto, valores elevados para los indicadores antes mencionados [35].

El objetivo de estos métodos consiste en relacionar los indicadores de enfoque con la distancia a partir de la ley de Gauss. Sin embargo, el problema se complica cuando se aplica a escenas arbitrarias. Por ejemplo: una imagen donde aparecen bordes “suavizados”, puede ser resultado de una imagen desenfocada de bordes abruptos o una imagen enfocada de bordes suaves[29]. Por lo tanto, al menos dos imágenes de la misma escena con diferentes enfoques se requieren para estimar las medidas de enfoque.

Pentland en [36, 33, 37] implementó de forma práctica las técnicas de medida de enfoque para extraer la profundidad. En [33] propuso un sistema para medidas de distancias que emplea una óptica común que proyecta, en dos sensores de imagen la misma zona de la escena; pero asegurando diferentes condiciones de enfoque para ambos sensores. Es decir, asume que la segunda imagen es captada con una abertura muy pequeña, tal que pueda modelarse con el modelo de *pin hole*. A partir de este montaje práctico y asumiendo una PSF cilíndrica, demostró que la diferencia de los espectros logarítmicos de las imágenes captadas es una función creciente del desenfoque en la primera imagen. Luego a partir de la ley de Gauss relacionó la distancia con la medida del desenfoque, logrando alcanzar precisiones de 2.5% a 4 frames por segundos.

Por otro lado, Subbarao asumió una PSF gaussiana y obtuvo las ecuaciones que relacionan los cambios en las condiciones de enfoque con la PSF gaussiana y finalmente con la distancia. Además desarrolló un estudio teórico para una solución más general en la que elimina la restricción de Pentland de usar una imagen formada a partir de una abertura muy pequeña (*pin-hole*) [38, 39, 40, 41].

A diferencia de los trabajos anteriores, en [28] define algunos detalles que habían sido pobremente analizados anteriormente, como por ejemplo: la necesidad de correspondencia entre las diferentes imágenes, el manejo de escenas con pocas texturas, la variación de la magnificación con el cambio del enfoque; entre otros.

En [28] se demuestra que el cambio de enfoque puede producir cambios en las coordenadas de los puntos de interés, y para evitar las inminentes variaciones en las coordenadas utiliza un sistema telecéntrico, tal que el rayo que pasa por el centro de la apertura sea paralelo al eje óptico de la cámara, aunque se disminuya el ángulo de

visión del sistema.

Otro de los problemas que se enuncia en [28], se deriva del uso de varias imágenes por lo que es necesario realizar correspondencia de puntos. La correspondencia requiere que la superficie que se analice tenga texturas que permita la selección de puntos de interés en las imágenes. En ocasiones se tienen superficies, como por ejemplo una hoja de papel, donde es imposible seleccionar puntos de interés. Para esos casos [28] propone un sistema de medida *activo* a partir de la proyección en el entorno de un patrón de iluminación que ha sido optimizado para obtener un mejor desempeño en los indicadores de enfoque.

Con este sistema, [28] obtiene mapas de profundidades de 512x480 píxeles a una frecuencia de 30 Hz con un error promedio de 0.2%. La desventaja fundamental radica en que es válido en un espacio de trabajo de tan solo 30cm.

En el año 2000 Schechner *et al.* [42, 43] pone en consideración los conceptos usados para la medida de distancia por desenfoque y los conceptos aplicados en la triangulación, y concluye que estos métodos tienen la misma base teórica, una base geométrica, y que solamente se diferencian en aspectos técnicos desde el punto de vista de la implementación.

2.2.5. Medida de distancia a partir de triangulación con luz estructurada.

Otras de las variantes para la medida de la distancia, tomando como base la geometría del entorno y su proyección en el plano de imagen de la cámara, lo constituyen los sistemas que emplean luz estructurada, denominados sistemas activos.

Estos sistemas emiten un determinado patrón que se forma utilizando accesorios ópticos para una fuente de luz específica para conseguir diferentes formas, como por ejemplo: puntos, planos (paralelos o perpendiculares) o circunferencias. De manera que, si se conoce la forma, la posición y la orientación del patrón emitido respecto a un sistema de coordenadas de referencia, entonces, se puede estimar a partir de la triangulación las coordenadas 3-D de cada punto en la escena donde impacta dicho patrón.

Comúnmente se utilizan patrones en forma de planos y desde el punto de vista matemático, los sistemas activos introducen una ecuación adicional dentro del modelo geométrico, convirtiéndolo en un sistema compatible determinado [44, 45, 46, 47, 48, 49].

Una mayor definición en la medida de profundidades se obtiene cuando se proyectan múltiples planos de luz en la escena. En este caso, mientras mayor sea el número de planos, mayor definición se tendrá, pero con el correspondiente aumento de la carga computacional. Una variante eficiente es considerar planos paralelos equidistantes [50]. Por otro lado, el plano puede desplazarse tal que ilumine la mayor parte de la escena [51] independientemente que disminuya la rapidez de cálculo.

Otro de los ejemplos de métodos activos para medidas de distancias lo constituye [52], donde se mide el nivel de un líquido contenido en un tanque mediante un emisor láser con un patrón de rectas perpendiculares y una cámara con sensor CCD instalados en extremos opuestos de la tapa.

Lázaro en [15, 44, 46, 47, 48, 49] estudió el problema de la detección de las coor-

denadas 3-D de los puntos del entorno, la cual involucra la medida de la profundidad, mediante visión activa. Expuso el modelo matemático para el sistema cámara-emisor láser, y además, modificó la metodología de calibración del sistema sensor, con el objetivo de incluir los errores producidos por la distorsión de la lente.

A su vez Luna *et. al.* [8, 14, 53] utiliza un sistema basado en este principio para detectar la posición de los cables de contacto que alimentan a los trenes de tracción eléctrica, con el objetivo de detectar posibles deterioros y anomalías en la distribución geométrica de los mismos. Una de las novedades expuestas en [8, 14, 53] es que el sistema es instalado a bordo de una superficie afectada por vibraciones, de ahí que se propone una metodología para medir los movimientos causados por las vibraciones y compensarlos en el proceso de medida de la posición de los cables.

Desde el punto de vista geométrico, la emisión de patrones (técnicas activas) presenta desventajas que limitan el rango de distancias a medir y por lo tanto, el tipo de aplicación en la que se emplearán. Estas desventajas son producto de la naturaleza física de la propagación de la luz donde pueden encontrarse fenómenos como: dispersión del haz emitido que produce errores en el patrón, atenuación con la distancia de la energía emitida, interferencia con otras fuentes de luz, etc.

2.3. Métodos no geométricos.

2.3.1. Introducción.

Los dispositivos de visión artificial realizan una medida de la cantidad de luz proveniente de la escena y que incide en el sensor. Por tanto, como resultado del proceso de formación de imágenes se obtienen unos valores de gris que guardan relación con la distribución de iluminación en el entorno, la dirección de las fuentes de luz, las características de las superficies del entorno y la geometría de la escena [54, 55].

Muchos investigadores se han planteado el problema de la reconstrucción de entornos a partir de la iluminación de la escena y su correspondiente imagen en la cámara. Su solución implica manejar un sistema matemático con muchos grados de libertad. Sin embargo, se han estudiado la posibilidad de obtener información 3-D del entorno o de determinados objetos a partir de imágenes asumiendo un punto de vista energético y bajo determinadas condiciones en la escena. Este análisis se basa en la radiometría.

El punto de vista energético utiliza como fuente de información la variación de los valores de gris en las imágenes. Por ejemplo: se plantea que el perfil de una determinada superficie puede extraerse a partir de las zonas claras y oscuras en las imágenes.

Para usar los valores de gris de las imágenes como fuente principal de información para reconstrucción 3-D de la escena o de algún objeto es necesario conocer su relación con la intensidad de la luz que incide en la superficie del sensor.

En algunos casos, esta relación se asume que es lineal, pero en la práctica no es así, y por tanto se hace necesario estimarla a partir de un proceso de calibración radiométrica.

2.3.2. Respuesta radiométrica de la cámara.

La imagen en una cámara digital, se forma mediante la acumulación de la energía que incide en la superficie del sensor (irradiancia) y que proviene de la escena, durante el tiempo que se encuentra abierto el obturador (tiempo de exposición). La energía acumulada por cada pixel del sensor se convierte en una señal eléctrica que se muestrea, cuantifica y codifica, para obtener a la salida un valor de gris discreto que, evidentemente, guarda una relación con la radiancia de la escena.

Matemáticamente, puede afirmarse que los valores de gris de cada pixel de una imagen (b), se relacionan a partir de una función monótona creciente de la irradiancia (E) acumulada durante el tiempo de exposición (t):

$$b = f(Et) \quad (2.3.1)$$

Esta relación se conoce como: *Respuesta Radiométrica de la Cámara* (f) y al procedimiento usado para estimarla: *Calibración Radiométrica* [54, 56, 57, 58, 59].

A partir de lo anterior, puede escribirse que:

$$g(b) = Et \quad (2.3.2)$$

donde $g = f^{-1}$ es la función inversa de respuesta de la cámara. Por otro lado, se incluye el efecto de la apertura del diafragma que regula la cantidad de luz que entra al sensor de la cámara. De manera genérica: $g(b) = Ee$, siendo e la exposición la cual tienen en cuenta el tiempo de exposición de la cámara y el diafragma de apertura.

La restricción principal para los métodos de calibración radiométrica multimagen establece que la irradiancia en el sensor de la cámara permanece constante cuando se analizan varias imágenes de una escena estática que han sido captadas con diferentes exposiciones¹. Esta restricción implica que la cámara y la escena permanezcan estáticas.

Para dos imágenes $j = 1, 2$, de la misma escena captadas con diferentes exposiciones e_1 y e_2 puede plantearse que:

$$g(b_{i,1}) = \frac{e_1}{e_2} g(b_{i,2}) \quad (2.3.3)$$

la cual se obtiene al considerar iguales las irradiancias en cada imagen y donde $b_{i,j}$ representa los niveles de gris de los píxeles i de la imagen j .

Los métodos utilizados en la calibración radiométrica multimagen de una cámara se basan en la restricción anterior, y sus diferencias más notables radican en la forma matemática que asumen para la función de respuesta.

Mann y Picard en [60] asumieron que la función de respuesta f tiene una forma similar a la función gamma:

$$f(E) = \alpha + \beta E^\gamma \quad (2.3.4)$$

usando diferentes imágenes de la misma escena, las cuales fueron capturadas con diferentes exposiciones pueden calcular los valores para α , β y γ con los cuales se caracteriza la respuesta de la cámara.

¹La exposición de una imagen depende del tiempo de exposición y de la apertura del diafragma de la óptica de la cámara.

El mecanismo de calibración propuesto en [60] utiliza dos imágenes I_1 e I_2 con exposiciones $e_1 < e_2$ y busca en la imagen más oscura (la imagen I_1 que se ha sido capturada con una exposición menor) el valor de gris $b_{0,1}$ y las coordenadas (x_0, y_0) para un píxel oscuro y plantea que este valor de gris se ha producido por una cantidad de luz q_0 . Posteriormente, busca el valor de gris del píxel correspondiente ($b_{0,2}$), que se encuentra en las coordenadas (x_0, y_0) , este valor de gris se debe a una cantidad de luz kq_0 , donde $k = \frac{e_2}{e_1}$.

Posteriormente, se busca en la imagen I_1 las coordenadas (x_1, y_1) de un píxel que tenga un valor de gris $b_{0,2}$ que es equivalente a una cantidad de energía kq_0 . En la imagen I_2 este píxel tendrá un nivel de gris $b_{1,2}$ que se debe a una cantidad de luz $k(kq_0)$.

Si este procedimiento se repite, se obtendrán relaciones $kq_0, k^2q_0, k^3q_0, \dots, k^nq_0$ que al representarlo gráficamente quedaría una función como la que se muestra en la Figura 2.3.1.

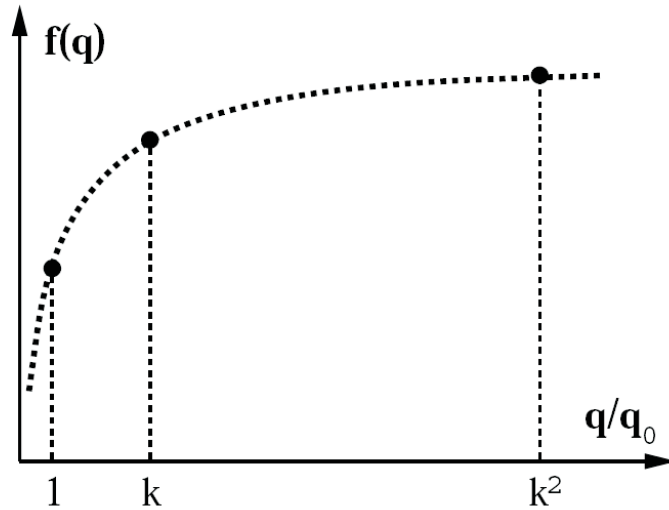


Figura 2.3.1: Valores de gris en función de la cantidad de energía que inciden en dos imágenes captadas con diferentes tiempos de exposición.

Las relaciones entre $b_{i,j}$ y sus correspondientes k^nq_0 , que permiten obtener la Figura 2.3.1 se utilizan para resolver la ecuación (2.3.4) sustituyendo las cantidades de energía (q) por E .

Mann y Picard, en este caso han calculado la respuesta de la cámara pero con el objetivo de mejorar la calidad visual de imágenes de escenas de alto contraste y no para realizar medidas absolutas de la cantidad de luz que incide en el sensor y por otro lado, la función de respuesta de una cámara puede diferir considerablemente de la función γ .

Por otro lado, en la referencia [56] se ha considerado una función de respuesta basada en un polinomio, de manera que:

$$g(b) = \sum_{n=0}^N c_n b^n \quad (2.3.5)$$

donde $g(b)$ representa la función inversa de respuesta de la cámara, b los niveles de gris, c_n los coeficientes del polinomio de respuesta y N su correspondiente orden.

Partiendo de la restricción principal de los métodos de calibración radiométrica multimagen y considerando una función de respuesta polinómica puede escribirse que:

$$\sum_{n=0}^N c_n b_{i,1}^n - k \sum_{n=0}^N c_n b_{i,2}^n = 0 \quad (2.3.6)$$

donde k es la relación entre las exposiciones e_1 y e_2 . Esta expresión establece que la energía acumulada por la cámara en la formación del píxel i debe ser constante para dos imágenes de una escena estática, captadas con diferentes exposiciones.

A su vez, en la referencia [56] se ha extendido este análisis no solamente a dos imágenes, sino a una secuencia de M imágenes captadas en una escena estática con diferentes exposiciones. En cada par de imágenes la energía total en la imagen debe ser la misma, puesto que las condiciones en la escena no han cambiado.

De esta forma, los autores proponen estimar los coeficientes c_n de la función de respuesta de la cámara tal que minimicen la siguiente expresión de error:

$$\sum_{i=1}^P \sum_{j=1}^Q \left[\sum_{n=0}^N c_n b_{i,j}^n - k_{j,j+1} \left(\sum_{n=0}^N c_n b_{i,j+1}^n \right) \right]^2 = \epsilon \quad (2.3.7)$$

donde $i = 1, \dots, P$ representa cada pixel de la imagen, $j = 1, \dots, Q$ cada imagen que se utilice para la calibración radiométrica, como mínimo $Q = 2$.

Por su parte, la referencia [61] propone un método paramétrico de calibración radiométrica mutimagen, por lo tanto, parte de la expresión (2.3.2) y aplica logaritmo a ambos miembros:

$$\ln g(b) = \ln E + \ln t \quad (2.3.8)$$

Esta ecuación es la restricción matemática fundamental del método de calibración multimagen que se ha propuesto en [61]. La diferencia fundamental con los métodos de [60, 56] es que en [61] no se busca una forma precisa para la función de respuesta, sino los correspondientes valores de $\ln g(b)$ y $\ln E$.

Además, impone una restricción de suavidad a los valores de la función de respuesta y asume que para el valor de gris medio (128, en caso de que $b_{max} = 255$) el valor de $\ln g(b) = 0$.

La función de suavidad que se propone en [61] es:

$$w(m) = \begin{cases} m - b_{min} & \text{para } m \leq \frac{1}{2} [b_{min} + b_{max}] \\ b_{max} + m & \text{para } m > \frac{1}{2} [b_{min} + b_{max}] \end{cases} \quad (2.3.9)$$

Posteriormente, la función objetivo que propone para obtener los valores de la respuesta radiométrica de la cámara quedaría:

$$O = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^Q [\ln g(b_{i,j}) - \ln E_i - \ln t_j]^2 + \lambda \sum_{m=b_{min}+1}^{b_{max}-1} [w(m)h''(m)]^2 \quad (2.3.10)$$

donde $h''(m) = \ln(m-1) - 2\ln(m) + \ln(m+1)$ representa la segunda derivada de los valores de la función de respuesta y se introduce para garantizar variaciones suaves en

la respuesta radiométrica de la cámara y λ una constante que determina la cantidad de suavidad que se introduce dentro de la función objetivo.

En la Figura 2.3.2 se muestran la secuencia de imágenes utilizadas para la calibración propuesta por la referencia [61] y el resultado del comportamiento de los niveles de gris en función del logaritmo de la energía acumulada.

Uno de los resultados que se obtiene con [61] es la creación de unos mapas de irradiancia de la imagen que son de utilidad en la construcción de imágenes de alto rango dinámico.

En la Figura 2.3.3 se muestra el correspondiente mapa de irradiancias obtenidas a partir del método de calibración radiométrica propuesto en [61].

Un análisis más general se propone en [59, 57, 58], en las que se analiza el espacio teórico de las posibles funciones respuesta y se propone un modelo empírico, basado en un polinomio que relaciona las bases de dicho espacio teórico.

El espacio teórico que se define en [58] se formó mediante el Análisis de Componentes Principales (PCA) a una base de datos de 200 curvas de respuesta² que fueron medidas o estimadas por otros métodos de calibración radiométrica. Del análisis de PCA se obtiene una función de respuesta promedio ($g_0(b)$) y los autovectores asociados a los autovalores de la matriz de covarianza que representan las bases del espacio teórico ($h_n^{inv}(b)$) que se propone en [58].

A partir del espacio teórico que propone Grossberg [58], plantea que cualquier función de respuesta puede estimarse usando la curva de respuesta promedio del espacio $g_0(b)$ y las bases del espacio $h_n^{inv}(b)$, mediante la expresión:

$$g(b) = g_0(b) + \sum_{n=1}^N c_n h_n^{inv}(b) \quad (2.3.11)$$

donde c_n son los coeficientes para reconstruir la función de respuesta.

En la Figura 2.3.4 se muestran los componentes del modelo empírico propuesto por Grossberg [58].

El proceso de calibración radiométrica basado en el modelo empírico que se propone en la referencia [58] es un procedimiento multimagen que parte de la ecuación (2.3.3) de manera que si se sustituye $g(b)$ por el modelo empírico de la ecuación (2.3.11) quedaría:

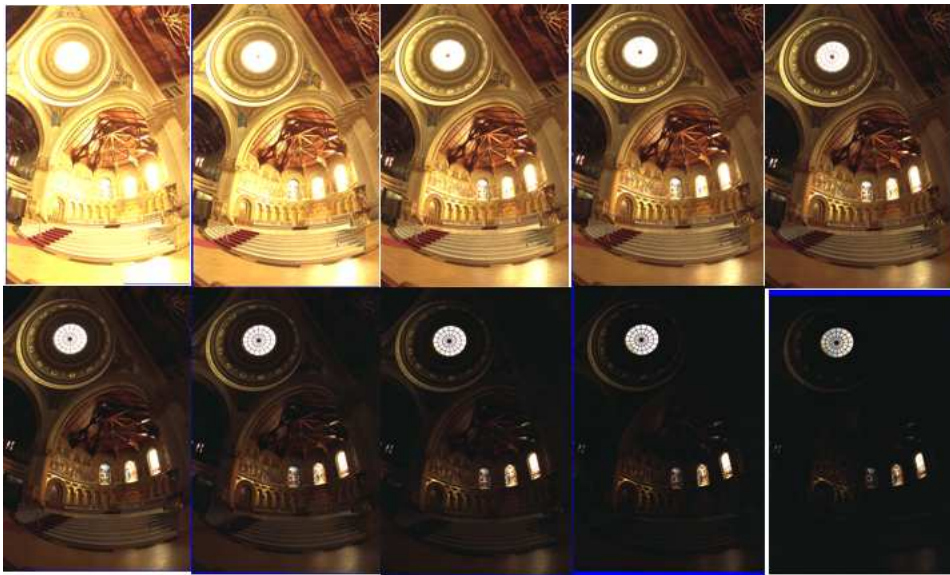
$$g_0(b_{i,j}) + \sum_{n=1}^N c_n h_n^{inv}(b_{i,j}) - \frac{e_j}{e_{j+1}} \left[g_0(b_{i,j+1}) + \sum_{n=1}^N c_n h_n^{inv}(b_{i,j+1}) \right] = 0 \quad (2.3.12)$$

donde $\frac{e_j}{e_{j+1}}$ es la relación entre la exposición de la imagen j y $j + 1$.

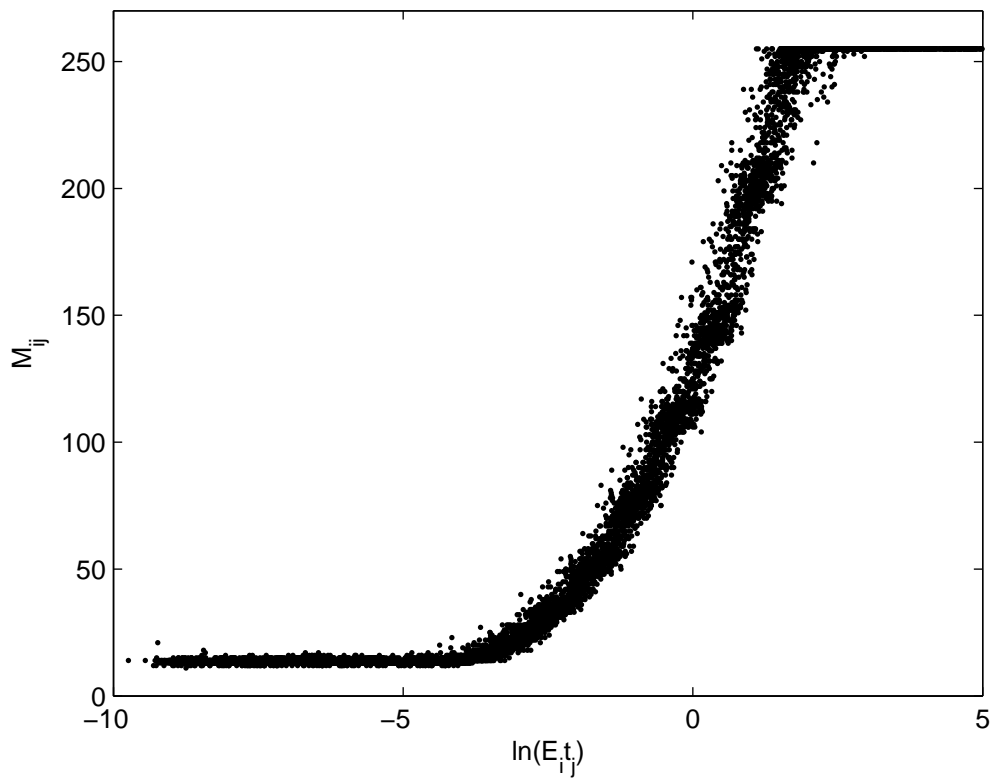
La expresión (2.3.12) tiene como incógnitas los coeficientes c_n mientras que los valores para $g_0(b)$ y $h_n^{inv}(b)$ son conocidos, por lo tanto puede escribirse que:

$$\sum_{n=1}^N c_n \left[h_n^{inv}(b_{i,j}) - \frac{e_j}{e_{j+1}} h_n^{inv}(b_{i,j+1}) \right] = \frac{e_j}{e_{j+1}} g_0(b_{i,j+1}) - g_0(b_{i,j}) \quad (2.3.13)$$

²La base de datos y las bases del espacio teórico para las funciones de respuestas están disponibles en <http://www1.cs.columbia.edu/CAVE/software/softlib/dorf.php>



(a)



(b)

Figura 2.3.2: Método de estimación de la respuesta radiométrica propuesto en [61]. 2.3.2a Secuencia de imágenes usada en la calibración. 2.3.2b Niveles de gris en función del logaritmo de la energía acumulada $b_i = \ln Et$

Además, la referencia [58] propone que para asegurar la convergencia a la solución

óptima de los coeficientes de la función de respuesta de la cámara se realice un proceso de optimización considerando la restricción de que la función de respuesta debe ser una función monótona creciente de los niveles de gris. Por lo tanto, esto quiere decir que:

$$\frac{\partial g(b)}{\partial b} \geq 0 \quad (2.3.14)$$

$$\frac{\partial g(b)}{\partial b} = \frac{\partial g_0(b)}{\partial b} + \sum_{n=1}^N c_n \frac{\partial h_n^{inv}(b)}{\partial b}$$

Finalmente, los coeficiente se calculan minimizando la ecuación (2.3.15):

$$\sum_{n=1}^N c_n \left[h_n^{inv}(b_{i,j}) - \frac{e_j}{e_{j+1}} h_n^{inv}(b_{i,j+1}) \right] - \left[\frac{e_j}{e_{j+1}} g_0(b_{i,j+1}) + g_0(b_{i,j}) \right] = \epsilon \quad (2.3.15)$$

sujeto a que: $\sum_{n=1}^N c_n \frac{\partial g(b)}{\partial b} + \frac{\partial g_0(b)}{\partial b} \geq 0$.

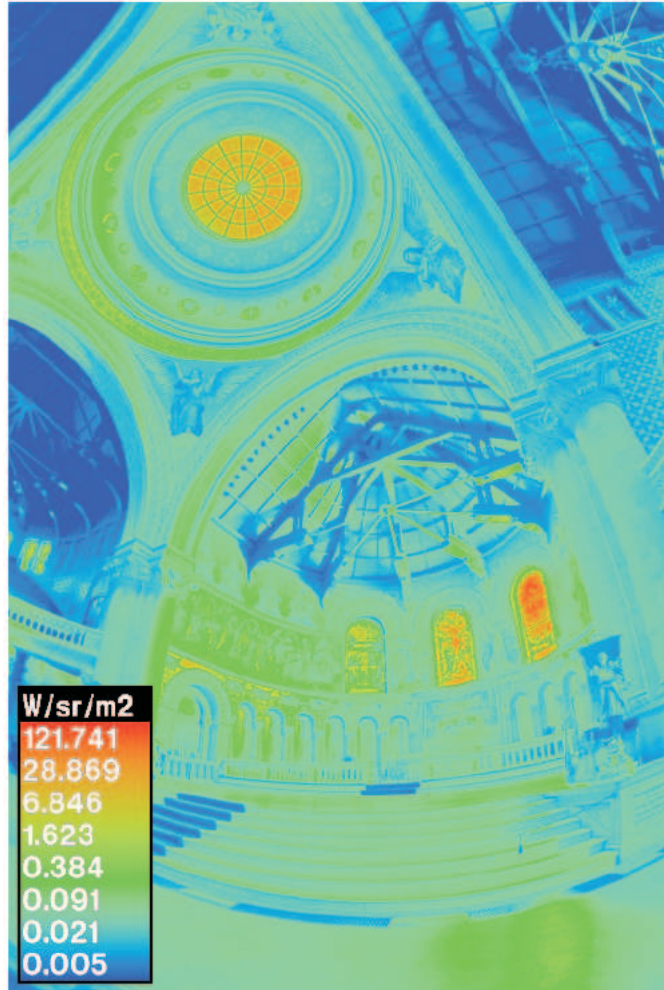


Figura 2.3.3: Mapas de irradiancia en la superficies de la imagen obtenidas a partir de la secuencia de imágenes mostradas en la Figura 2.3.2a.

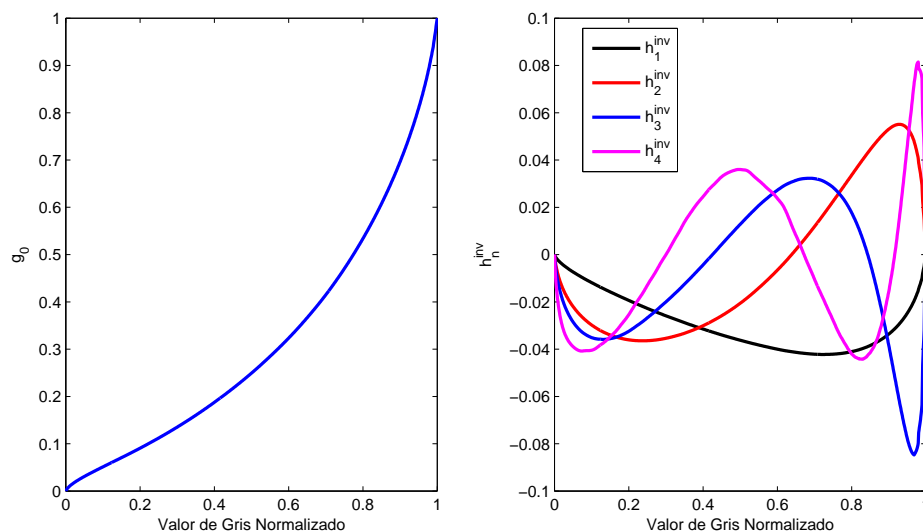


Figura 2.3.4: Función de respuesta promedio y bases del espacio teórico de posibles funciones respuesta de cámara propuesto por Grossberg [58].

En la Figura 2.3.5 se muestran los resultados del proceso de calibración radiométrica para los métodos propuestos en las referencias [58, 56] a partir de una secuencia de imágenes que se han captado en el laboratorio para obtener la función de respuesta de la cámara Basler A622f. La funciones de respuesta mostradas en la Figura 2.3.5 se han utilizado en esta tesis.

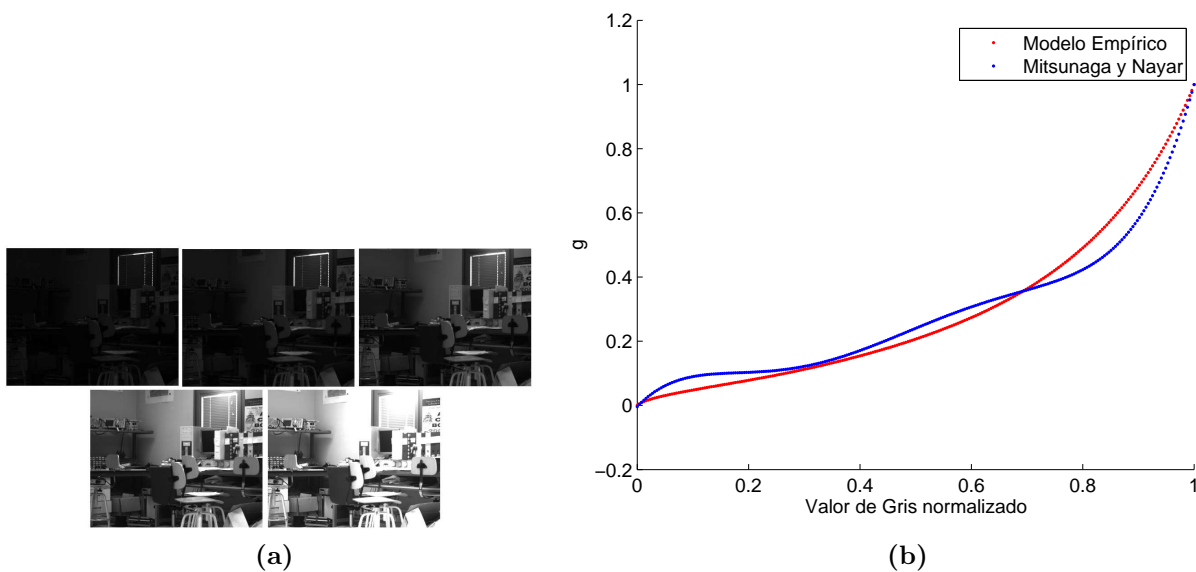


Figura 2.3.5: (a) Secuencia de imágenes utilizada para la obtención de la respuesta radiométrica de la cámara. (b) Funciones de respuesta radiométrica estimadas utilizando los métodos propuestos en las referencias [56, 58].

2.3.3. Obtención de formas a partir de sombras.

En determinadas condiciones, las variaciones de la iluminación entre las zonas claras y las oscuras dan idea de la forma 3-D de un objeto. Incluso, ésta es una de las pistas que usa la visión humana para detectar formas. Esto se aprovecha por los métodos de obtención de formas a partir de las sombras, conocidas en inglés como: *Shape from Shading (SFS)*.

El objetivo de los métodos de SFS es la caracterización de superficies a partir de la variación de las intensidades en las imágenes, de ahí que el punto de partida en este tipo de metodología radica en: suponer que la intensidad en la imagen es una función de la geometría de la escena o del objeto que se modele [62].

La caracterización de las superficies se realiza a través de la estimación de la altura relativa respecto al plano XY ($Z(x, y)$), los vectores normales de las superficies ($\vec{n}_x, \vec{n}_y, \vec{n}_z$), el gradiente de la superficie (p, q) o a partir de los ángulos de inclinación relativos de las superficies, y la dirección de la fuente de iluminación [63].

En [63] se muestra un estudio de los diferentes métodos de SFS y analiza un problema común en estas aplicaciones: la necesidad de estimar al menos dos incógnitas para caracterizar una superficie, con una sola ecuación que aporta cada pixel. De ahí que sea necesario incluir otras restricciones, como pueden ser: suavidad en la superficie recuperada, y consistencia de la intensidad entre la superficie recuperada y la imagen original.

Independientemente, el aporte de [63] radica en que recopila numerosos trabajos en la temática, así como implementa los métodos más significativos para realizar una comparación entre ellos, con lo cual es un trabajo de referencia en esta materia.

Por otro lado, para caracterizar las superficies a partir de imágenes se requiere definir un modelo de interacción de la luz con la superficie y la cámara.

En el modelado o caracterización de las superficies se deben conocer las características y orientación de las fuentes de luz en la escena. Comúnmente, en este proceso se supone que la imagen en la cámara se debe al mapa de reflectancias (R):

$$I(x, y) = R(p, q) \quad (2.3.16)$$

el cual es una función de la orientación de la superficie así como de la forma, $p = \frac{\partial Z(x, y)}{\partial x}$, $q = \frac{\partial Z(x, y)}{\partial y}$ e $I(x, y)$ representa la imagen formada en la cámara suponiendo proyección ortográfica, siendo (x, y) las coordenadas de los puntos en la imagen.

Algunos autores proponen el empleo de un modelo de interacción de la luz con la superficie puramente lambertiano, cuestión que físicamente es falsa. Lo más cercano a la práctica es considerar un modelo híbrido, el cual contiene contribuciones debido a reflexiones lambertianas y a reflexiones especulares, esto es:

$$I(x, y) = (1 - \omega)I_L(x, y) + \omega I_S(x, y) \quad (2.3.17)$$

en el que I_L e I_S representan las componentes lambertiana y especular de la intensidad en las imágenes, respectivamente, y ω es el peso de la componente especular e I representa el brillo total para la superficie híbrida. No obstante, el modelo lambertiano se emplea en la mayoría de las aplicaciones de SFS [62, 64], debido a su simplicidad, pero hay que destacar que ofrece una aproximación pobre para reflexiones difusas en superficies de gran rugosidad.

La componente lambertiana I_L puede modelarse como el producto entre la potencia de la fuente de luz A , el coeficiente de reflexión de la superficie ρ de la superficie, teniendo en cuenta el ángulo de incidencia de la luz θ_i , esto es:

$$I_L = A\rho \cos \theta_i \quad (2.3.18)$$

La expresión anterior puede escribirse en función de los vectores unitarios normales a la superficie $\mathbf{N} = (n_x, n_y, n_z)$ y el de la posición de la fuente de luz $\mathbf{S} = (s_x, s_y, s_z)$:

$$I_L = \rho A \mathbf{N} \cdot \mathbf{S} \quad (2.3.19)$$

Para las reflexiones especulares se han propuesto varios métodos, como por ejemplo:

- En [65] se representa la componente especular a partir de la suma de potencias de funciones cosenos evaluadas para el ángulo formado entre la dirección perfecta de reflexión especular y la dirección del observador. Este modelo es capaz de describir reflexiones especulares que se extienden por encima de un único punto, sin embargo los parámetros no tienen ningún significado físico.
- En [66], las especularidades se deben a pequeñas áreas de espejos aleatoriamente orientadas, de modo que el brillo en la imagen debido a reflexiones especulares se modela a partir del producto de cuatro componentes: la energía de la luz incidente, el coeficiente de Fresnel, la función de distribución de la orientación de las áreas de los espejos, y un factor de atenuación debido al ángulo de incidencia respecto al área efectiva de la superficie.
- En [67] se formuló un modelo para reflexiones especulares, basados en [66], usando una distribución gaussiana para modelar las orientaciones de los espejos y considerando los demás parámetros constantes.
- Por otro lado, en [68] se propone un modelo de reflectancia híbrido formado por tres componentes: una componente difusa y dos componentes que modelan la reflexión especular.

Una vez definido el modelo de formación de imágenes, queda definida la interacción superficie-imagen, y sólo queda implementar una metodología para ajustar los parámetros del modelo en dependencia de los valores de gris de los píxeles en la imagen.

En la literatura se pueden encontrar 4 métodos para la solución de problemas de SFS: aproximación por minimizaciones [69, 70, 62], aproximación por propagación [71, 72, 73, 74], aproximaciones locales [75, 76] y aproximaciones lineales [77, 78]. Por otro lado, [79] actualizó el trabajo de Zhang et. al. [63] añadiendo una clasificación de los métodos de resolución de problemas de SFS, así como implementando los más significativos con el objetivo de comparar su desempeño en la resolución del problema.

A modo de resumen, los métodos de SFS se utilizan para la caracterización relativa de superficies, y en nuestro punto de vista, no se han reportado aplicaciones al cálculo de la distancia absoluta entre la cámara y un punto en la escena. Sin embargo, constituyen el peso fundamental de nuestra hipótesis: que es la extracción de información útil para medida de distancias a partir de los niveles de gris de la imágenes de un emisor, con una única cámara.

2.4. Conclusiones de la revisión de conocimientos y objetivos de la tesis.

En este punto se mostrarán las conclusiones obtenidas después de la revisión exhaustiva de la referencias analizadas y tras la exposición y análisis de estas conclusiones se indicarán los objetivos en los que se centrarán las aportaciones que se desean obtener con el desarrollo de esta tesis doctoral.

2.4.1. Conclusiones de la revisión de conocimientos.

Los modelos geométricos en metrología con cámaras han sido muy utilizados y validados en aplicaciones prácticas. En general éstos ofrecen precisiones del alrededor de decenas de centímetros en la medida de distancias y posicionamiento.

El modelado, desde el punto de vista geométrico, de un dispositivo de visión artificial establece una correspondencia entre las coordenadas 3D del espacio y su correspondiente proyección en las imágenes. La equivalencia 3D-2D hace que se pierda la información relacionada con la profundidad. La recuperación de la información de profundidad es básicamente un proceso donde se incluyen más restricciones matemáticas en el modelo. De ahí que se utilicen dos o más cámaras adicionales, planos emisores de luz, información del enfoque/desenfoque, entre otras.

Fundamentalmente, los modelos geométricos usan la información de la posición de determinados puntos de interés en las imágenes y en nuestro criterio obvian la información de los valores de gris de las imágenes solo utilizada para realizar correspondencias entre imágenes de una secuencia de una misma cámara o imágenes tomadas desde múltiples cámaras.

Por otro lado, existen otras variantes que utilizan un enfoque energético del proceso de formación de imágenes y que parten de cómo la cámara responde a la energía que incide en la superficie del sensor.

El enfoque energético está motivado en el hecho de que bajo condiciones específicas, la información de la profundidad puede inferirse partir de las degradaciones del nivel de gris en las imágenes.

Estas aplicaciones, por lo general, se utilizan para la caracterización de superficies y en concreto, la mayoría obtienen medidas de la profundidad relativas. También, son aplicaciones muy susceptibles a la influencia de la iluminación de fondo y sus resultados dependen de la distribución, posición relativa respecto a la cámara y al sujeto, así como, de los tipos de fuentes de luz.

La dependencia de los métodos no geométricos con las fuentes de luz, así como el número de parámetros que se consideran en el modelado hacen que sean problemas indeterminados que para su solución deben aplicarse algunas restricciones que no permiten su utilización para medidas absolutas de la distancia.

Sin embargo, bajo condiciones concretas, resulta interesante modelar el comportamiento energético del dispositivo de visión artificial, con el objetivo de obtener una medida de la irradiancia en la superficie del sensor; sabiendo que la irradiancia puede cambiar, en condiciones específicas, con la distancia entre la fuente y el dispositivo sensor.

Aprovechando este hecho, se podría modelar el comportamiento de la irradiancia en el sensor de imagen en un problema concreto aplicado a la robótica, por ejemplo el cálculo de la distancia entre una cámara y una fuente puntual abordado de un robot, y obtener información útil de la profundidad, para posteriormente complementar el modelo geométrico e implementar un posicionamiento 3D.

Problema a resolver.

La mayoría de la literatura relacionada con el posicionamiento, metrología aplicada y la robótica móvil parten de un modelo geométrico del proceso de formación de imágenes. Este modelo ha sido probado en innumerables ocasiones y se ha demostrado su validez, así como su precisión.

Sin embargo, en estos modelos es mucho más importante detectar con precisión sub-pixélica la posición de un determinado punto de interés, que su correspondiente valor de luminancia. Por consiguiente, en la mayoría de los casos se desprecia información que puede ser utilizada como alternativa de medida de distancias.

Partiendo de la afirmación anterior, se plantea el problema principal a resolver en esta tesis.

Hipótesis.

Un enfoque energético del proceso de formación de imágenes en una cámara proveerá suficiente información para entender este proceso y constatar que la distancia entre la cámara y el punto de interés influye en el nivel de gris de los píxeles en la imagen resultante. Este enfoque energético se sustenta en la radiometría, al igual que los métodos de *Shape from Shading*.

De manera concreta, para resolver el problema descrito previamente, consideramos que bajo la suposición de que se desea posicionar una fuente puntual (un emisor de infrarrojos a bordo de un robot) con una única cámara, los valores de gris estarán relacionados con la distancia a la fuente a través de la ley conocida como: *Ley del decrecimiento de la irradiancia con el cuadrado de la distancia*. Además se parte de que los sistemas de visión artificial realizan una medida relativa de la distribución de la luz en la escena, por tanto, los valores de gris en las imágenes serán una estimación de la distribución de la luz en el entorno, así como su intensidad.

Por lo tanto, si se modela el sensor de imágenes desde el punto de vista radiométrico, se podrían obtener restricciones matemáticas que relacionen los niveles de gris, como entrada del proceso, con parámetros radiométricos asociados a la fuente y al sistema sensor, como son: intensidad de la fuente, orientación y por supuesto la distancia, entre otros.

Concretamente, bajo un enfoque radiométrico que tenga como entrada los niveles de gris de los píxeles en las imágenes, se podría obtener una función matemática que contenga la distancia y que permita su utilización conjunta con los modelos geométricos.

2.4.2. Objetivos de la tesis.

La idea principal de esta tesis es estudiar la posibilidad de extraer información de la distancia entre una cámara y una baliza de infrarrojo a partir de los niveles de

luminancia que se obtienen en las imágenes de la baliza en la cámara.

El análisis de los valores de luminancia de las imágenes sugiere un enfoque energético del proceso de formación de imágenes que se sustenta en el modelado radiométrico del dispositivo de visión artificial.

En situaciones concretas, por ejemplo el sistema cámara-baliza de infrarrojo, considerando esta última como una fuente puntual, la energía en la cámara disminuye con la distancia que la separa de la baliza, y por consiguiente se producirá una variación en los niveles de gris en las imágenes.

En términos de energía, se necesita estudiar qué magnitudes la afectan y cómo modelarlas, sabiendo que es posible obtener un estimado de la energía en el sensor de la cámara a partir de su respuesta radiométrica.

Como es lógico, la energía en la cámara producto de la baliza de infrarrojo depende de con qué intensidad emita dicha baliza. Esto impone la necesidad de conocer en todo momento cuál es la intensidad radiante de la baliza o por el contrario, suponerla constante durante todo el proceso de medida.

Asumir que la intensidad radiante de la baliza se mantiene constante durante todo el tiempo es una fuente de error en el sistema, porque la intensidad radiante puede variar con la temperatura. Esto implica, que los cambios de temperatura se traducirán en variaciones en la distancia producto de las variaciones en energía recibida en la cámara.

Independizar al sistema de medida de los cambios en la intensidad radiante es otro de los aportes que se pretende lograr en esta tesis. Para su cumplimiento, es necesario introducir otras características adicionales en el proceso de modelado del sistema cámara baliza.

En resumen, la tesis pretende proponer una alternativa de medida de la distancia, basada en un análisis energético (de amplitudes) de las imágenes de una baliza de infrarrojo, captadas con una única cámara, con independencia de la intensidad radiante de la baliza.

Para el desarrollo de la tesis se han marcado los siguientes objetivos:

- Obtener un estimado de la energía que incide en la superficie del sensor a partir de sus correspondientes valores de gris.
- Detectar las magnitudes que afectan la energía en la superficie del sensor en el caso concreto del sistema formado por una cámara y una baliza infrarroja.
- Proponer una expresión matemática que relacione las magnitudes que afectan la energía en el sensor y proponer un modelo del comportamiento del sistema, enfatizando la posibilidad de estimar la distancia entre la cámara y la baliza.
- Incluir la influencia de la orientación de la baliza respecto a la cámara.
- Sobredimensionar el modelo de energías de tal manera que permita independizar la metodología de medida de distancia de la intensidad radiante de la baliza. Intenta disminuir el efecto de las variaciones de la intensidad radiante de la baliza en la estimación final de la distancia.

Capítulo 3

Condiciones generales de desarrollo

3.1. Introducción.

La mayoría de las aplicaciones que utilizan visión artificial, como por ejemplo, el modelado de entornos, el posicionamiento 3D de robots, entre otras, utilizan un modelo proyectivo para describir el dispositivo de visión artificial.

Si bien este modelo ha sido validado en muchas aplicaciones y además, es bastante preciso; comúnmente utiliza como información útil para realizar la medida, la posición en la imagen de los puntos de interés y no sus niveles de gris.

Los niveles de luminancia en las imágenes dependen de muchos factores, pero uno de ellos es la energía que incide en la superficie del sensor, de modo que para situaciones concretas, un enfoque basado en “amplitudes” puede representar una alternativa factible para medidas cuantitativas.

En la sección anterior se comentaron los métodos de Shape from Shading, los cuáles utilizan como información útil las “amplitudes” de las imágenes para caracterizar superficies a partir de la interacción de la luz con la superficie bajo análisis. Matemáticamente, muchos autores definen este problema como indeterminado, por lo que en ocasiones se obtienen soluciones relativas o se aplican restricciones en el problema.

Lo que sí constituye un punto a nuestro favor es que utilizan la información de los valores de gris para caracterizar las superficies, y basado en este proceder se define nuestra hipótesis.

En este capítulo se describen las restricciones fundamentales para el uso de una cámara y una baliza de infrarrojos en la medida de la distancia que los separa. Se describe el punto de partida del análisis y las características de la cámara y de la baliza a utilizar.

El análisis energético, para el caso del problema de calcular la distancia entre una cámara y una baliza de infrarrojos, constituirá una alternativa para estimar la distancia.

Se pretende utilizar los niveles de gris de las imágenes de la baliza para extraer su correspondiente energía y a partir de la energía obtener la distancia.

3.2. Planteamiento general.

En primer lugar, si se supone que se desea implementar un algoritmo de posicionamiento 3D de un robot que transporta una baliza de infrarrojos, para lo que se utiliza una única cámara, entonces con el modelo proyectivo sólo se podrá realizar un

posicionamiento bi-dimensional del robot.

Mediante el modelo proyectivo de la cámara se relacionan las coordenadas de los puntos del entorno con sus correspondientes proyecciones en la imagen [6], de manera que si se quieren obtener las coordenadas de un punto del entorno a partir de las coordenadas en el plano de imagen la solución será indeterminada, resultando para este caso una recta que contiene al punto en el entorno y su proyección en la imagen. Esto ocurre porque en el caso de una única cámara modelada a partir del modelo geométrico se pierde la información de profundidad.

Recuperar la profundidad, en esta situación, significa incluir al menos una ecuación adicional dentro del modelo geométrico. En este sentido, si se analiza el sistema cámara-baliza los niveles de gris en las imágenes pueden aportar información de la distancia a la que se encuentra la baliza de la cámara, y por tanto introducir una restricción matemática al modelo proyectivo.

3.2.1. Energía detectada en un superficie receptora.

Generalizando el problema de la distancia entre una cámara y una baliza de infrarrojos, si se asume que la cámara se representa por una superficie receptora, la irradiancia en dicha superficie puede calcularse por la *ley del decrecimiento de la irradiancia con el cuadrado de la distancia*.

La irradiancia es la distribución de la energía que incide en la superficie del receptor proveniente de la baliza o superficie emisora.

En la Figura 3.2.1 se muestra el esquema general que caracteriza el problema de la distancia entre una cámara (superficie receptora) y una baliza de infrarrojos (superficie emisora).

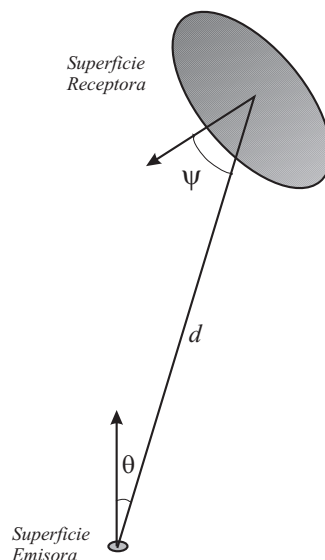


Figura 3.2.1: Esquema simplificado para el sistema cámara-baliza de infrarrojos. Se considera para los primeros análisis que la baliza es la superficie emisora y la cámara es la superficie receptora.

La irradiancia (E) en la superficie receptora sería:

$$E = \frac{I_0 f(\theta) \cos \psi}{d^2} \quad (3.2.1)$$

donde I_0 es la intensidad radiante de la fuente, que es la cantidad de energía que emite la baliza por unidad de *ángulo sólido*. El ángulo sólido se define como el área del casquete esférico, en una esfera de radio unidad, abarcado por un cono cuyo vértice está en el centro de la esfera y que coincide con la posición de la fuente, $f(\theta)$ se utiliza para modelar el patrón de radiación del emisor, siendo θ el ángulo de orientación de la baliza respecto a la superficie receptora, ψ es la orientación de la superficie detectora y d la distancia entre la fuente y el detector. El coseno de ψ proviene del cálculo del área efectiva de la superficie detectora que está contenida en el ángulo sólido[80].

La expresión (3.2.1) representa la Ley del decrecimiento de la irradiancia con el cuadrado de la distancia. En la realidad, la relación de la irradiancia con la distancia tiene un origen geométrico porque a medida que aumenta la distancia entre la superficie emisora y la detectora aumenta el área del casco esférico cubierto por el mismo ángulo sólido, y por tanto la energía se distribuye en una superficie mayor lo que implica que decrezca la irradiancia.

Representar el problema de la distancia entre una baliza de infrarrojos y una cámara a partir de la Figura 3.2.1, sería válido para describir el problema siempre que en la salida de la cámara se obtuviera una medida proporcional a la energía que incide en su superficie detectora.

Evidentemente, la Figura 3.2.1 es una simplificación del problema real porque en el interior de la cámara tienen lugar numerosos procesos que afectan la energía que se recibe por lo que la imagen de salida no es precisamente una medida absoluta de la energía recibida por la cámara [61, 54].

Una suposición más realista es considerar que la superficie receptora (plano del sensor de la cámara) da como salida una medida relativa de la energía incidente representada por los valores de gris de los píxeles de la imagen.

Por otro lado, la superficie emisora (la baliza) para el problema de la distancia entre la cámara y la baliza tendrá siempre dimensiones mucho menores que la distancia a la que se encuentra de la superficie detectora, por lo que se puede asumir como una fuente puntual y esto permite que el sistema pueda modelarse usando la ecuación (3.2.1) [80].

En resumen, se puede plantear que los valores de gris a la salida de la cámara (superficie receptora) son una medida relativa de la energía producida por la luz emitida por la superficie emisora (baliza) y que esta energía decrece con el cuadrado de la distancia.

Este planteamiento es el punto de partida de esta tesis. No obstante, el problema debe ser restringido a un entorno de condiciones concretas que definen las características que deben tener tanto la baliza, como la cámara.

3.3. Baliza de infrarrojos.

La superficie emisora o baliza de infrarrojos, es un diodo semiconductor emisor de luz que emite luz incoherente de espectro reducido cuando se polariza de forma directa su unión PN y circula por él una corriente eléctrica. Este fenómeno físico es una forma de electroluminiscencia.

La longitud de onda depende del material semiconductor empleado en la construcción del diodo y puede variar desde el ultravioleta, pasando por el visible, hasta el infrarrojo (IRED: *Infra-Red Emitter Diode*).

Para el problema de la distancia entre la baliza y la cámara, y como se verá más adelante, la selección de la longitud de onda constituye una restricción fundamental en la solución del problema.

Por otro lado, retomando la Figura 3.2.1 y la ecuación (3.2.1), la energía en la superficie receptora es directamente proporcional a la intensidad radiante de la baliza. Por lo tanto, existe una relación entre la intensidad radiante y los valores de gris a la salida de la cámara.

Para el problema de la distancia entre la cámara y una baliza de infrarrojos, se requiere estimar, de forma absoluto o relativa, la energía que incide en la cámara usando los niveles de gris de los píxeles y a partir de esta energía obtener una medida de la distancia. Esto requiere que la baliza emita una luz continua todo el tiempo, y además, debe conocerse su intensidad radiante.

Suponer que la intensidad radiante de la baliza se mantiene constante todo el tiempo es una desventaja porque este parámetro tiene variaciones con la temperatura. Por tanto, éstas variaciones se propagan al proceso de medida de la distancia entre la cámara y la baliza. Uno de los objetivos fundamentales de ésta tesis es definir una estrategia de medida que sea independiente de la intensidad radiante de la baliza.

Otra de las características fundamentales de la baliza es su comportamiento con el ángulo de orientación respecto a la cámara (en la ecuación (3.2.1) se representa por la función $f(\theta)$). Por ejemplo, si se analiza este concepto en el sistema de posicionamiento de un robot que transporta una baliza de infrarrojos, cuya energía es capturada por una cámara del entorno, y que a partir de las imágenes capturadas se calcula la posición del robot, entonces, se necesita que la baliza sea “vista” por la cámara para todas las posiciones posibles del robot en el entorno. Por tanto, se necesita que la baliza emita energía en todas las direcciones posibles, el caso ideal sería una fuente omnidireccional (Ver Figura 3.3.1).

En la realidad, los emisores de infrarrojo que existen en el mercado están caracterizados por un patrón de radiación que pondera la intensidad radiante de la fuente en función de la dirección de observación tal como se muestra en la Figura 3.3.1 [81].

Retomando el problema del sistema de posicionamiento, lo más conveniente es utilizar una baliza que tenga un patrón de radiación lambertiano $f(\theta) = \cos\theta$. El comportamiento para este tipo de emisor se muestra en la Figura 3.3.1.

Un patrón de radiación lambertiano es lo más cercano que se puede obtener, con los emisores comerciales, al comportamiento ideal de una fuente omnidireccional.

Si se usa un patrón de radiación caracterizado por una figura en revolución únicamente se necesita un ángulo para modelar el efecto del patrón de radiación en la energía acumulada por la cámara. Este ángulo entonces puede estimarse a partir de la dirección de observación y la dirección de máxima intensidad radiante en el emisor.

En resumen, si se retoma el problema del posicionamiento de un baliza a bordo de un robot a partir de los niveles de gris de las imágenes, entonces, podría afirmarse que la baliza aportará tres variables que deben tenerse en cuenta en el proceso de modelado. La primera es la intensidad radiante, cuyas variaciones afectarían linealmente a la energía acumulada por la cámara. Por otro lado, el ángulo de observación o ángulo

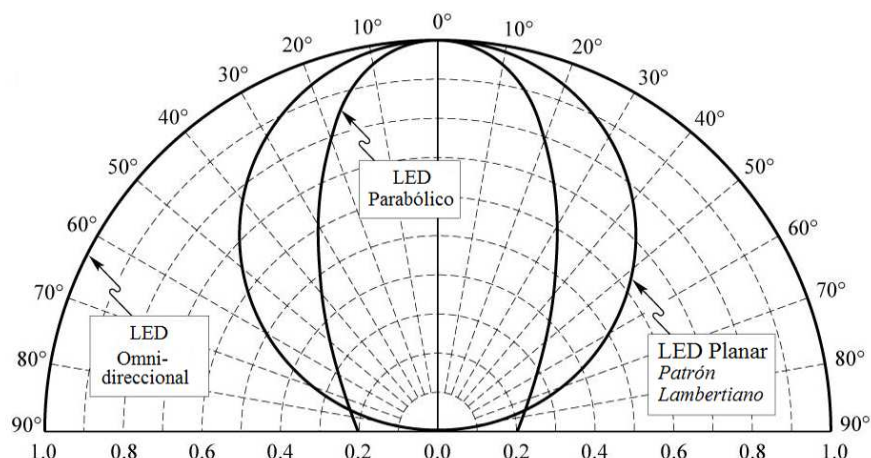


Figura 3.3.1: Representación de diferentes tipos de patrones de radiación. El patrón de radiación ideal para nuestra aplicación es aquel que emite la misma cantidad de energía en todas las direcciones (omnidireccional). En la realidad lo más cercano a este patrón es un patrón de radiación lambertiano ($f(\theta) = \cos \theta$).

de inclinación de la baliza respecto a la cámara se debe introducir para considerar la relación entre este parámetro y la intensidad radiante. Por último, la distancia a la que se encuentra de la cámara afecta a los niveles de gris, porque afecta a la energía que se acumula.

3.4. La cámara.

La cámara, que en la simplificación hecha anteriormente (ver Figura 3.2.1) se representa por la superficie receptora, constituye el sistema sensor y dará como resultado una medida de la energía que incide sobre ella.

Anteriormente, las cámaras fabricadas con sensores CCD (*Charge Coupled Device*) dominaron los mercados de dispositivos de visión. Sin embargo, una nueva tecnología ha emergido como competidor de los CCD. Esta tecnología se conoce como: CMOS (*Complementary Metal Oxide Semiconductor*).

Los sensores CCD utilizan una tecnología de fabricación específica que no es usada para construir otro tipo de dispositivo, lo que hace que los costes aumenten. El proceso de fabricación de los sensores CMOS es el proceso más común y de mayor rendimiento en la fabricación de chips en el mundo. Por lo tanto, sus costes de producción de sensores son tres veces más bajos que los de fabricación de CCD's. A esto se une el hecho que en los dispositivos CMOS es posible integrar los circuitos correspondientes para el tratamiento de la señal detectada, mientras que en los sensores CCD estos circuitos deben estar en chips separados.

El comportamiento en cuanto a calidad, niveles de ruido y rango dinámico, es mejor en los CCD que en los CMOS [82]. A pesar de esto, las ventajas de los sensores CMOS siguen prevaleciendo por encima de sus inconvenientes y por otro lado han

motivado nuevas líneas de investigación para aumentar su comportamiento frente al ruido, aumentar el rango dinámico y la sensibilidad, entre otras.

Tanto los sensores CCD como los CMOS, convierten la luz que incide en una matriz de fotodetectores en una señal eléctrica que se muestra, se cuantifica y se codifica. Posteriormente en la salida se obtienen unos valores de gris relacionados con la energía de la luz que incide en el sensor.

Comúnmente la relación entre la energía que incide en un píxel del sensor y su valor de gris no es una función lineal, debido a que una vez que se convierte la energía acumulada a una señal eléctrica se realizan numerosos procesos para mejorar la calidad visual de la imagen resultante.

No obstante, estos procesos pueden modelarse a partir de la función de respuesta radiométrica de la cámara.

Para obtener el valor de gris para un píxel, la cámara acumula la energía que incide en su superficie. Desde el punto de vista energético, el tiempo durante el cual el sensor acumula energía (tiempo de exposición) influye en el valor de luminancia final. Evidentemente, esto quiere decir que si se tiene un nivel fijo de energía en el sensor de la cámara, se obtendrán mayores niveles de gris en aquellas imágenes que han sido captadas con tiempos de exposición más altos.

La relación entre los valores de gris y el tiempo de exposición es por lo tanto, una función creciente, pero producto de los procesos de tratamiento de la señal eléctrica que produce el sensor y su correspondiente digitalización no se puede asumir que sea lineal para todo el rango de tiempos de exposición.

Para el caso de la energía acumulada por la cámara y su relación con el tiempo de exposición, el concepto de linealidad sí es aplicable, y en este caso, la energía acumulada por la cámara se puede calcular usando la respuesta radiométrica de la cámara.

Se podría pensar que para minimizar el efecto del ruido mediante el aumento de los niveles de señal útil, sería ventajoso trabajar con tiempos de exposición altos, pero en realidad los niveles de gris están limitados en un rango de valores discretos y el aumento excesivo del tiempo de exposición puede provocar la saturación de los píxeles y por tanto la pérdida de información.

A su vez, considerar tiempos de exposición bajos disminuye la relación señal a ruido en el sistema, porque disminuye los niveles de energía acumulada con los cuales se trabaja y por tanto disminuyen los niveles de señal útil.

Por lo tanto, el rango de tiempos de exposición para esta propuesta es un compromiso que depende de los niveles de energía que se detecten en el sensor. Más adelante, en la tesis, se analizará qué tiempos de exposición serían los óptimos para la captura de las imágenes para medida.

No obstante, el comportamiento del error con el tiempo de exposición para un posible modelo de la energía acumulada por la cámara puede verse en la Figura 3.4.1.

En la Figura 3.4.1 muestra el resultado de una simulación de cómo se comportaría el error en el ajuste de un posible modelo de energía acumulada en la cámara con diferentes tiempos de exposición, independientemente de la cámara que se utilice. El modelo considera que existe una relación lineal del tiempo de exposición y la energía acumulada, pero para tiempos de exposición bajos y altos, respectivamente el efecto del ruido y la saturación de los píxeles es mayor que para los tiempos medios.

Por ejemplo, en el caso de la Figura 3.4.1 que muestra el error en la energía acu-

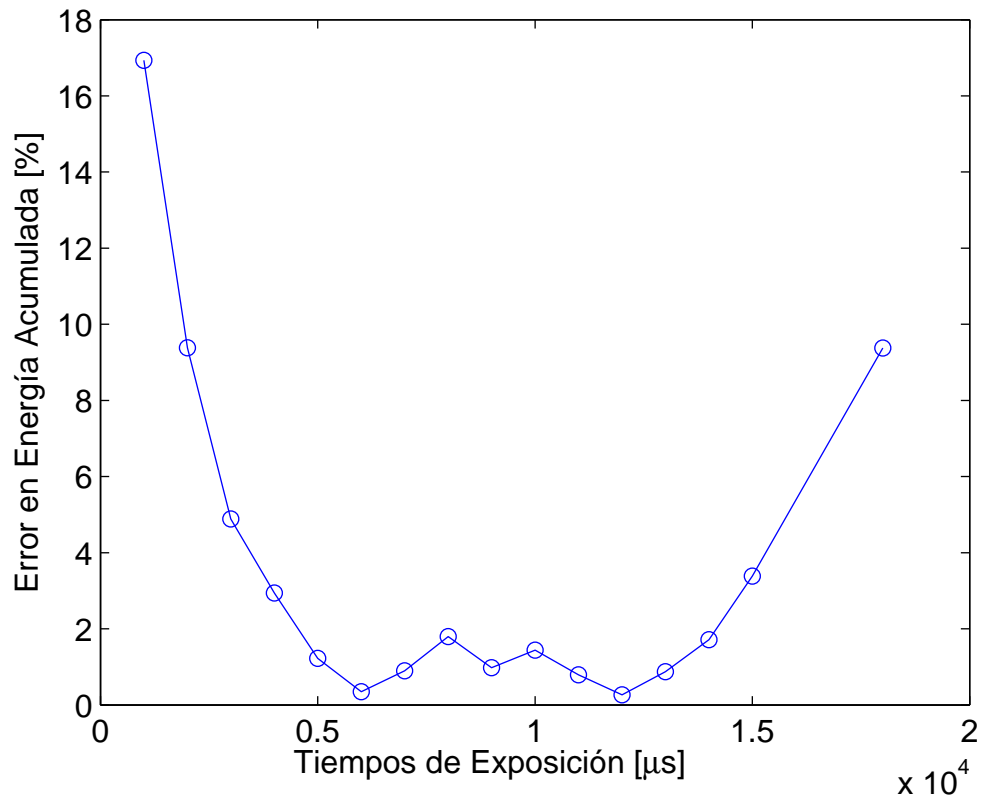


Figura 3.4.1: Simulación del efecto del ajuste del modelo para diferentes tiempos de exposición. Los errores serán mayores para tiempos bajos y altos, ya que para estos casos el nivel de ruido y la saturación introducen no linealidades en la relación proporcional entre la energía acumulada por la cámara y el tiempo de exposición en la cámara.

mulada en función del tiempo de exposición, para tiempos bajos los niveles de energía acumulada son pequeños, lo que hace que disminuya la relación señal a ruido y esta zona sea más propensa a introducir errores en la estimación de la energía. Para tiempos altos sucede un proceso diferente, y es que los niveles de energía acumulada son tan grandes que provoca la saturación de los píxeles, y por tanto, el cálculo de la energía acumulada a partir de los valores de gris de las imágenes dará siempre un valor mucho menor que el valor real, por lo que se pierde información. La zona central, que en la Figura 3.4.1 está entre 6 y 12 ms se obtiene el menor error en la estimación de la energía relativa acumulada por la cámara.

La selección de la zona de tiempos óptimos depende de características más concretas en el sistema cámara-baliza de infrarrojos, que se analizarán más adelante en la tesis. Sin embargo, se quiere llamar la atención de que el tiempo de exposición debe ser cuidadosamente seleccionado para obtener un comportamiento aceptable en la metodología de medida de distancias que se propone.

Por otro lado, las variaciones en el tiempo de exposición producen variaciones lineales en la energía acumulada por la cámara. En la Figura 3.4.2 se muestra el comportamiento de la energía acumulada por una cámara como una función del tiempo de exposición.

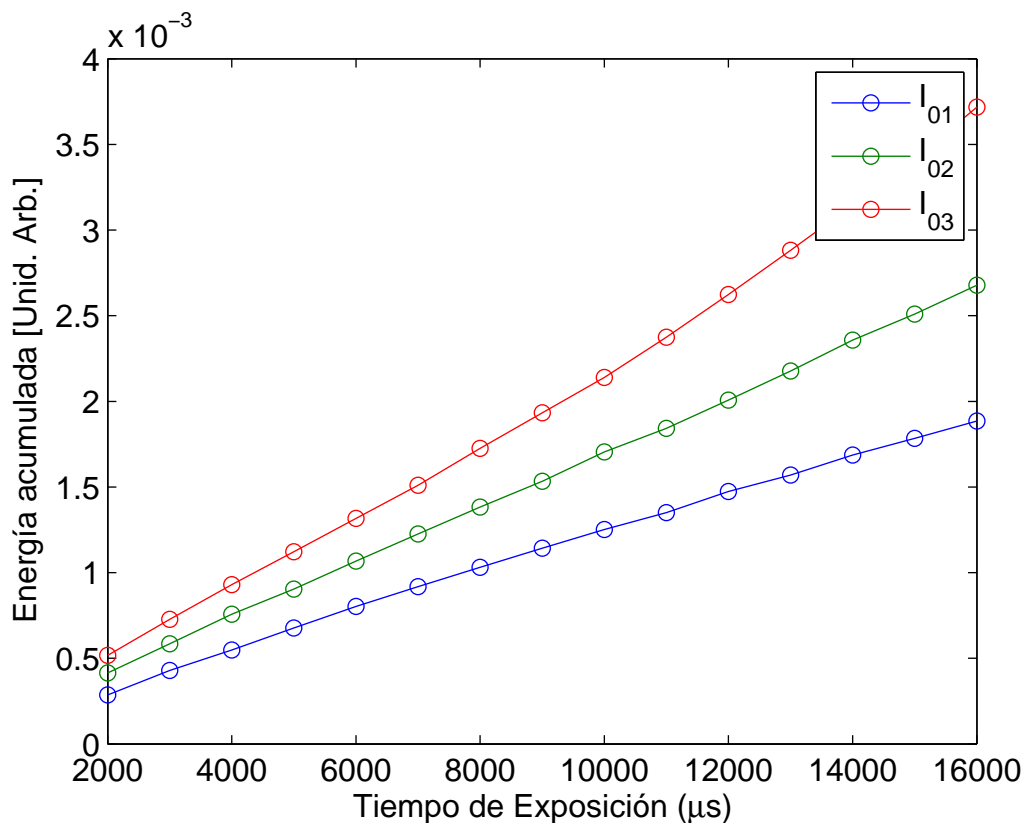


Figura 3.4.2: Comportamiento de la energía acumulada por la cámara con el tiempo de exposición para tres intensidades radiantes diferentes.

La Figura 3.4.2 muestra el comportamiento que se esperaría para el comportamiento de la energía acumulada por la cámara con el tiempo de exposición. En estas curvas se obtiene un comportamiento, que en un rango acotado de tiempos de exposición se puede modelar mediante una recta.

Nótese que para valores grandes de tiempos y de energía acumulada, comienzan a aparecer no linealidades en el comportamiento (más evidente en la curva de color rojo que representa energías acumuladas con la mayor de las intensidades radiantes).

Sin entrar en particularidades de cómo se obtuvo la Figura 3.4.2, sí es importante destacar que es uno de los experimentos iniciales en los que se caracteriza de forma empírica el problema de la medida de la distancia entre una cámara y una baliza de infrarrojos. Los valores $I_{0,1}$, $I_{0,2}$ y $I_{0,3}$ representan tres intensidades radiante de la baliza.

Por otro lado, los niveles de saturación tienen una relación con el rango máximo de valores discretos que se utiliza para los niveles de gris de cada píxel. Este rango de valores discretos se fija a partir de la cantidad de bits que se utilicen para digitalizar la energía de cada píxel. Por lo tanto, mientras mayor sea el número de bits, más lineal será la relación entre energía acumulada y niveles de gris en un rango de tiempos mayor.

Típicamente, la mayoría de las cámaras monocromáticas disponibles en el mercado permiten una digitalización usando 8 bits por cada píxel, que representan 256 niveles de energía acumulada. No obstante, trabajar con mayor número de bits aumenta la cantidad de niveles de energía acumulada que pueden estimarse y mejora la linealidad

entre los valores de gris y su correspondiente energía acumulada. Sin embargo, en esta tesis se va a optar por usar 8 bits para no limitarse a un tipo de cámara en específico, máxime cuando es el tipo más extendido.

Otro de los parámetros que influye en los valores de gris a la salida de la cámara es la ganancia. Este procedimiento suele implementarse a partir de un multiplicador digital que pondera la señal que proviene del sensor. En todo lo anterior, se ha considerado que el control automático de ganancia está inactivo, teniendo una ganancia fija.

El ajuste adecuado de la ganancia mejoraría la calidad visual de las imágenes, sobre todo en ambientes oscuros, sin embargo reduce el rango de intensidades que puede procesar el sensor, haciendo que los niveles de saturación se alcancen para niveles más bajos de energía acumulada en el sensor.

La Figura 3.4.3 muestra la relación entre los valores de gris y la señal eléctrica de salida del sensor para diferentes ganancias en la cámara.

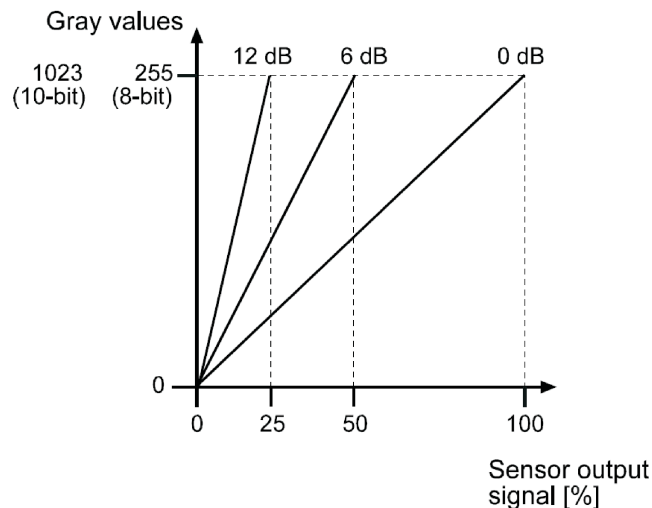


Figura 3.4.3: Comportamiento de los niveles de gris en función del tanto por ciento de la señal de salida del sensor para diferentes ganancias en la cámara.

Como puede verse en la Figura 3.4.3 a medida que se aumenta la ganancia de la cámara, el estado de saturación se alcanza para un valor más pequeño de la señal de salida del sensor.

Por este motivo, se fija la ganancia en 0 dB, lo que posibilita un mayor rango dinámico de energías en el sensor antes de llegar a saturar.

Con respecto a los parámetros ópticos (focal y apertura), se deben mantener constantes durante la implementación, de lo contrario es imprescindible repetir la calibración del sistema tal como ocurre con el modelo geométrico.

En resumen, para esta tesis se han utilizado dos cámaras, una de tecnología CCD y otra CMOS. En la selección de la cámara es importante tener en cuenta la posibilidad de ajustar manualmente cada uno de sus parámetros, especialmente el tiempo de exposición y la ganancia.

Por lo general, este ajuste manual es bastante preciso porque se realiza mediante procesos digitales obteniéndose precisiones de microsegundos para el tiempo de exposición y de 0,1dB para la ganancia.

3.5. Selección de la longitud de onda.

La alternativa cámara-baliza que se propone está afectada por las fuentes de luz de la escena y más si dichas fuentes tienen componentes espectrales en el infrarrojo. Estas fuentes de luz son fuentes de ruido dentro de nuestro sistema de medida.

En los sistemas que utilizan señales de infrarrojo, la fuente de ruido por excelencia es la radiación solar, porque tiene componentes espectrales en la mayoría de las longitudes de onda del rango captado por la cámara.

En la Figura 3.5.1 se muestra el espectro del sol a nivel del mar con incidencia normal.

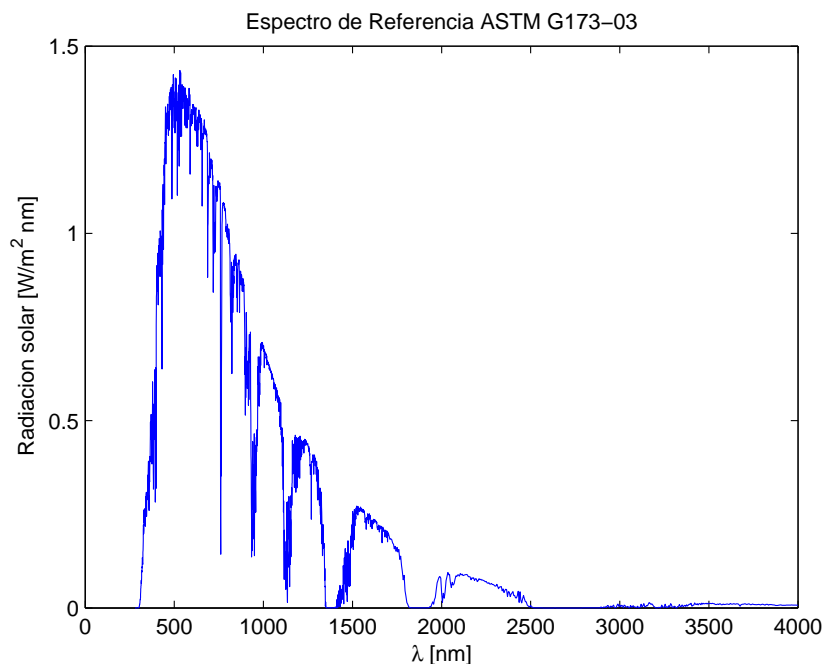


Figura 3.5.1: Espectro del sol a nivel del mar con incidencia normal, disponible en <http://rredc.nrel.gov/solar/spectra/am1.5/>

No obstante, si se garantiza la fiabilidad del sistema considerando la iluminación del sol, entonces se garantizará que el sistema funcione correctamente en interiores, donde la iluminación más común es la fluorescente.

Las lámparas fluorescentes más comunes producen una radiación ultravioleta a través de la ionización de gas de mercurio a baja presión. Posteriormente un recubrimiento fosforescente en el interior de los tubos absorbe la radiación UV y la convierte en luz visible.

El espectro de la luz de las lámparas fluorescentes es la combinación de la luz emitida directamente por el gas de mercurio y la luz emitida por el recubrimiento fosforescente, lo cual hace que difiera del espectro de la luz incandescente.

En la Figura 3.5.2 se muestra el contenido espectral de la luz emitida por una lámpara fluorescente típica, el cual contiene numerosos picos de emisión que en la Figura 3.5.2 se encuentran identificados.

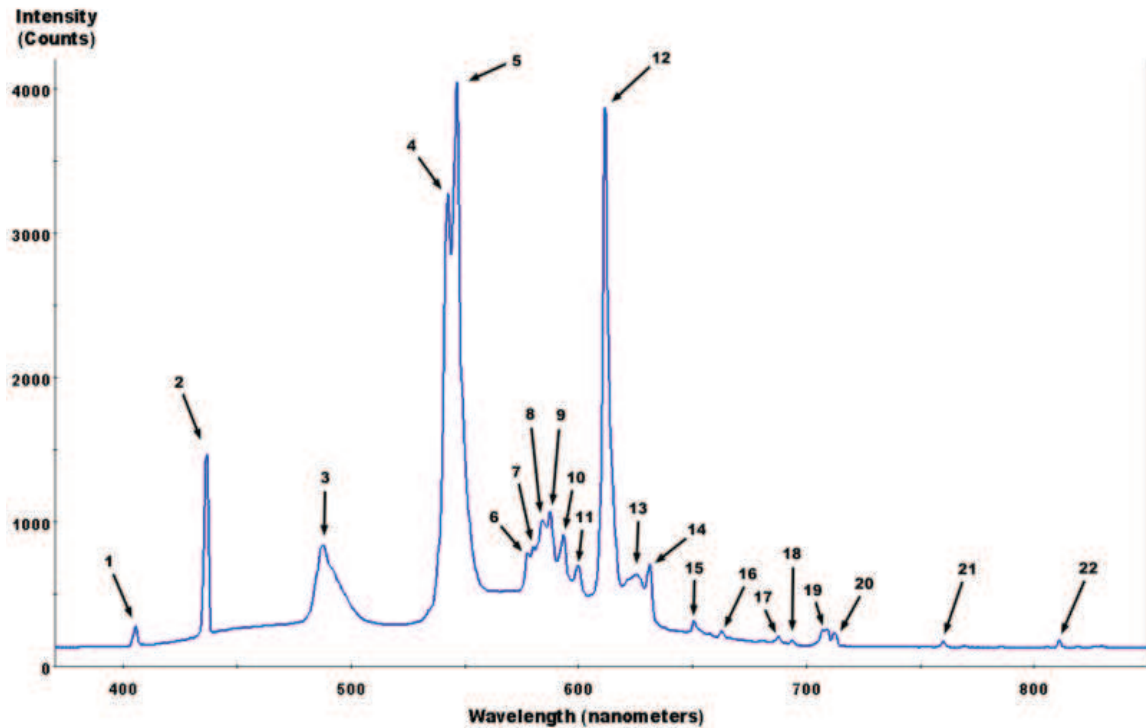


Figura 3.5.2: Contenido espectral de la luz fluorescente. Los picos de la emisión se encuentran identificados.

Como se muestra en la Figura 3.5.2, la mayoría de los picos en la radiación se encuentran en el rango visible (400nm a 750nm), con lo cual, solamente los picos 21 y 22 están en el espectro infrarrojo.

Para la selección de la longitud de onda de la baliza se deben de considerar diferentes aspectos. El aspecto fundamental es maximizar la relación señal a ruido que se tiene en el receptor. La forma más común de maximizar esta relación es disminuyendo los niveles de ruido al mismo tiempo que se maximizan los niveles de señal útil con lo cual se debe incluir la respuesta espectral del sensor, en este caso la cámara.

En la Figura 3.5.3a se muestra el espectro de la radiación solar en el rango de longitudes de 400 a 1000nm lo constituye la fuente de ruido que afecta al sistema cámara-baliza y en la Figura 3.5.3b se muestra la respuesta espectral del sensor de la cámara.

En este rango de longitudes de onda, existen dos mínimos en el espectro de la luz solar, el primero en torno a los 760 nm y el segundo alrededor de 940nm, siendo para éste último donde mayor ancho de banda puede utilizarse. Por otro lado, esta longitud de onda asegura que el ruido generado por la iluminación fluorescente es prácticamente nulo que, en el caso de 760nm los puntos 21 y 22 de la Figura 3.5.2 sí influyen en el sistema.

Adicionalmente, la selección de la longitud de onda debe estar avalada por un estudio de la relación señal a ruido que se detecta en el sensor, en este caso la cámara.

Por otro lado, el efecto del ruido de longitudes de onda diferentes a la longitud de onda con la que se pretende trabajar puede reducirse mediante un proceso de filtrado.

Para reducir el ruido producto de la radiación solar es necesario el uso de filtros ópticos. Dentro de los más usados en este rango de longitudes de onda, están los espejos fríos (*cold mirrors*), los espejos calientes (*hot mirrors*) y los filtros interferenciales.

Los espejos fríos permiten el paso de longitudes de onda superiores a 700nm y los espejos calientes, por el contrario, atenúan ese rango de longitudes de onda [83]. Sin embargo, los filtros interferenciales permiten el paso de una banda de longitudes de onda, que en ocasiones es lo suficientemente estrecha que permite un filtrado más selectivo de la señal útil [84].

En nuestra propuesta la influencia de la iluminación de fondo es extremadamente importante, debido a que la estimación de la distancia entre la cámara y la baliza de infrarrojos se realizará a partir del análisis de los valores de gris provocado por la luz emitida por la baliza y que es detectada en la cámara, de manera que, en una primera aproximación, es necesario asegurar que en el sensor de la cámara solamente incida la luz proveniente de la baliza.

La existencia de otras fuentes de luz daría una medida superior de la energía que incide en el sensor y por tanto la estimación de la distancia será siempre menor que la distancia real.

En caso de no garantizarse la ausencia de luz de fondo en las imágenes para el cálculo de la distancia, se podría implementar un método diferencial para eliminar el efecto de la iluminación de fondo, mediante el uso conmutado de la baliza. Esto quiere decir, que la baliza se alimentaría por una señal cuadrada que provoca intervalos de tiempos de emisión y no emisión. Bajo este criterio, debe asegurarse que se capturen imágenes en ambos estados de la baliza. El efecto de la luz de fondo se reduciría restando las correspondientes imágenes para los dos estados de alimentación.

Como se ha planteado en la sección 3.4 se pretende trabajar con sensores de silicio (CCD o CMOS) y por lo tanto se limita el rango de longitudes de onda hasta 1000nm.

De manera que, para eliminar la influencia de fuentes externas, se ha decidido utilizar un filtro interferencial centrado en 940nm y con un ancho de banda de paso de 10nm, cuya respuesta se muestra en el Figura 3.5.3b.

Si bien, en entornos interiores la iluminación común es la fluorescente, en la selección del filtro interferencial se ha supuesto contaminación debido a la luz solar, que influye más en el rango de longitudes de ondas en las que se pretende trabajar.

La utilización de un filtro interferencial reduce considerablemente el efecto de la iluminación externa y aumenta la relación señal a ruido en nuestra propuesta. En la Figura 3.5.4 se muestra el comportamiento del sistema frente al ruido debido a la luz solar, en un caso sin el uso de filtro interferencial. La Figura 3.5.4a representa la distribución espectral de la radiación solar que se obtendría en el sistema sin utilizar el filtro interferencial propuesto. Para este caso, la luz proveniente del sol provocaría un nivel de irradiancia de 406.2 W/m^2 .

El uso de un filtro interferencial reduce la influencia del ruido proveniente de la luz solar a un rango estrecho de longitudes de onda. En la Figura 3.5.4b se representa el espectro de la luz solar que afectaría al sistema-cámara baliza si se utiliza un filtro interferencial centrado en 940nm con 10nm de ancho de banda. Para este caso, el nivel de irradiancia total proveniente del sol es de 0.12 W/m^2 .

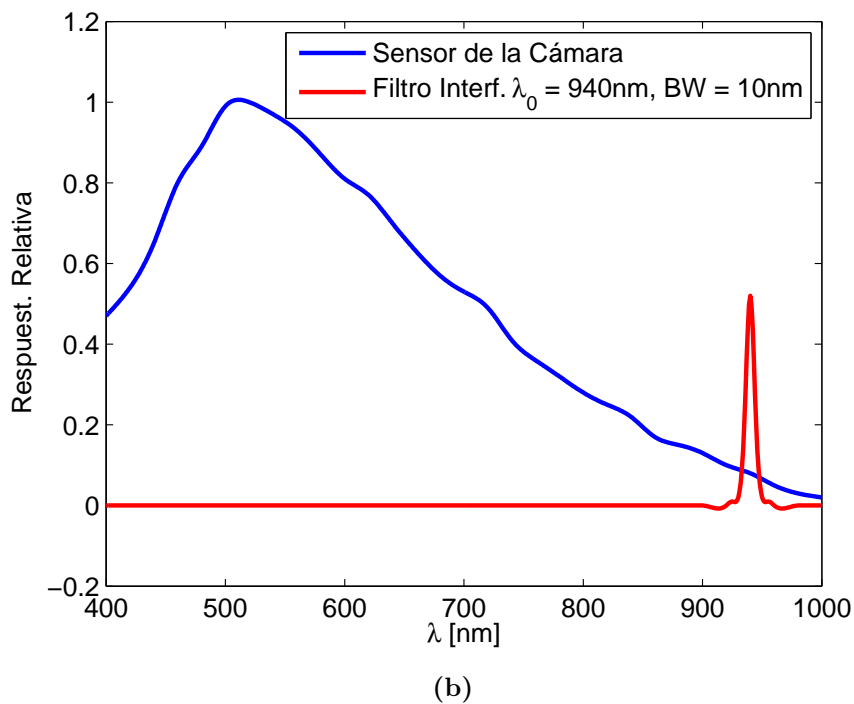
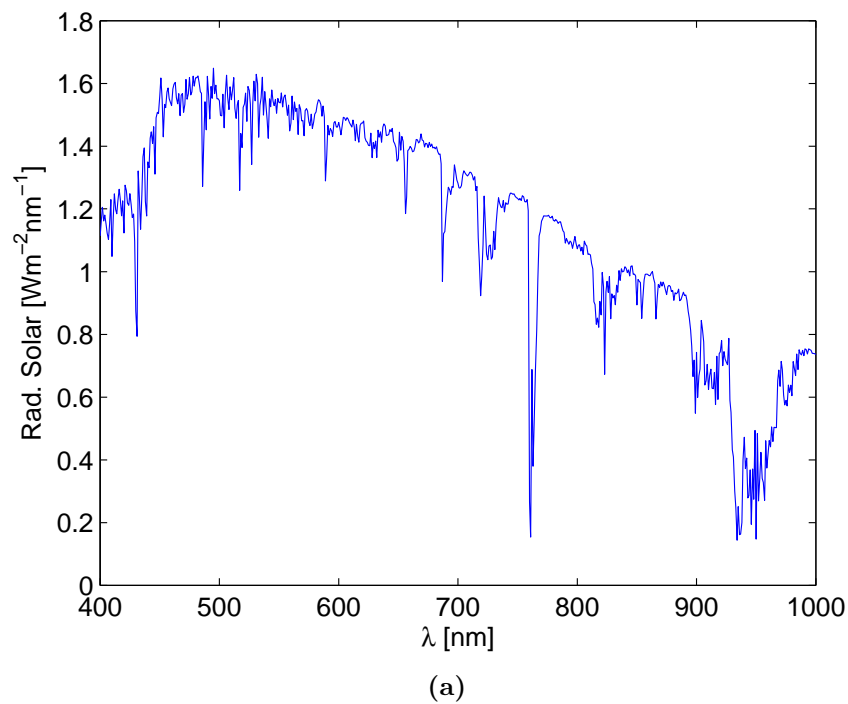
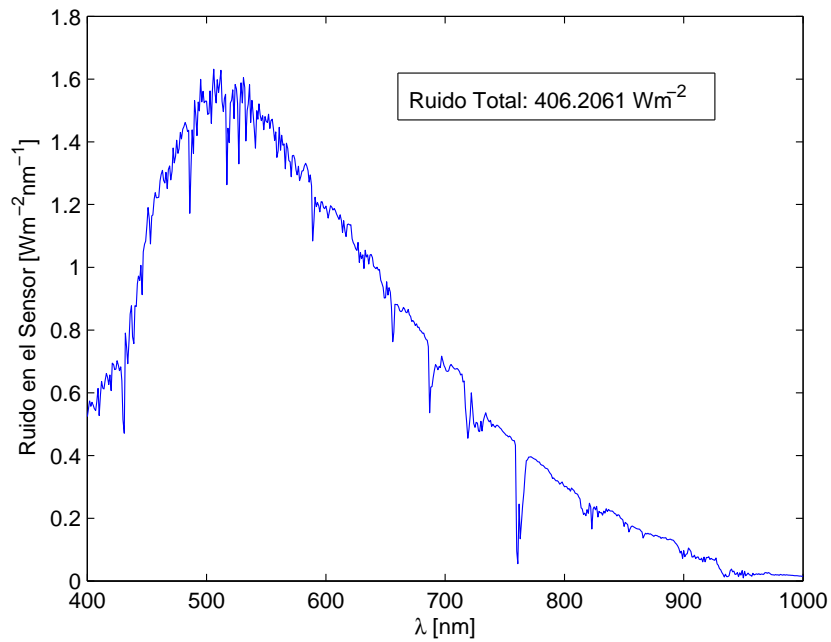


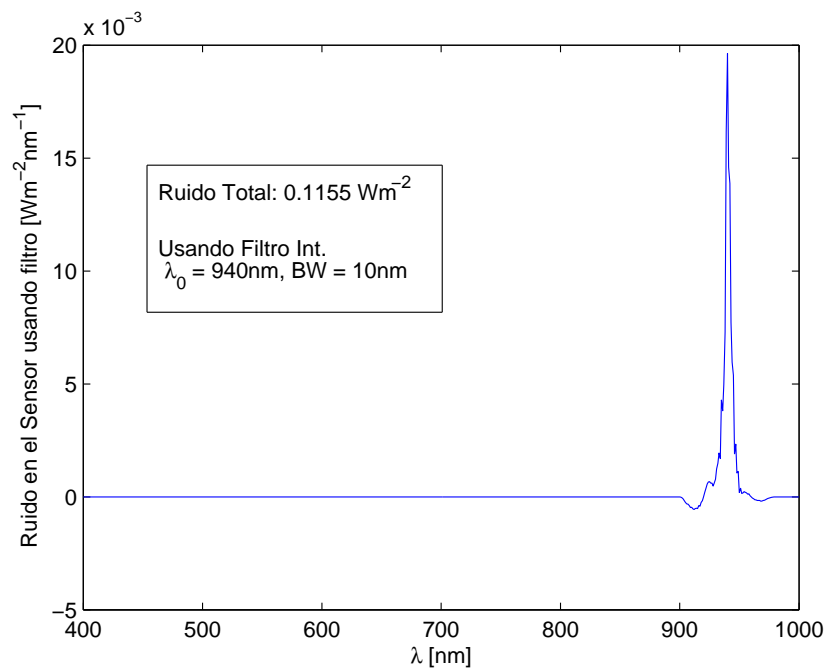
Figura 3.5.3: Comportamiento espectral de la luz solar, del sensor de la cámara y del filtro interferencial centrado en $\lambda = 940$ nm, $BW = 10$ nm.

De manera que la utilización de un filtro interferencial reduce la irradiancia en el sensor de la cámara proveniente de la luz solar.

En términos de la relación señal a ruido el sistema mejora con el uso del filtro interferencial, tal como se muestra en la Figura 3.5.5.



(a)



(b)

Figura 3.5.4: Estimación de los niveles de ruido en el sistema asumiendo como fuente principal de ruido la luz solar. (a) Sin el uso de filtro interferencial. (b) Utilizando un filtro interferencial centrado a 940nm con ancho de banda de 10nm.

La Figura 3.5.5 es el resultado de una simulación del sistema cámara-baliza de infrarrojos, basado en la ley del decrecimiento de la irradiancia con el cuadrado de la distancia. Para su obtención se consideró que la señal útil es medida en una superficie alineada y enfrentada a la fuente de luz y que se encuentra a una distancia d de la fuente[80].

Desde un punto de vista general, la mejora en la relación señal a ruido puede expresarse como:

$$SNR_2 = 10 \log \frac{P_{\text{ruido1}}}{P_{\text{ruido2}}} + SNR_1 \quad (3.5.1)$$

donde SNR_1 y SNR_2 representan las relaciones señal a ruido sin el uso de el filtro y con el uso del filtro, respectivamente, P_{ruido1} y P_{ruido2} las correspondiente potencias de ruido “sin” y “con” la utilización del filtro interferencial.

En esta propuesta, la utilización del filtro interferencial mejora en aproximadamente 35 dB la relación señal a ruido que se tendría si no se utilizara dicho filtro.

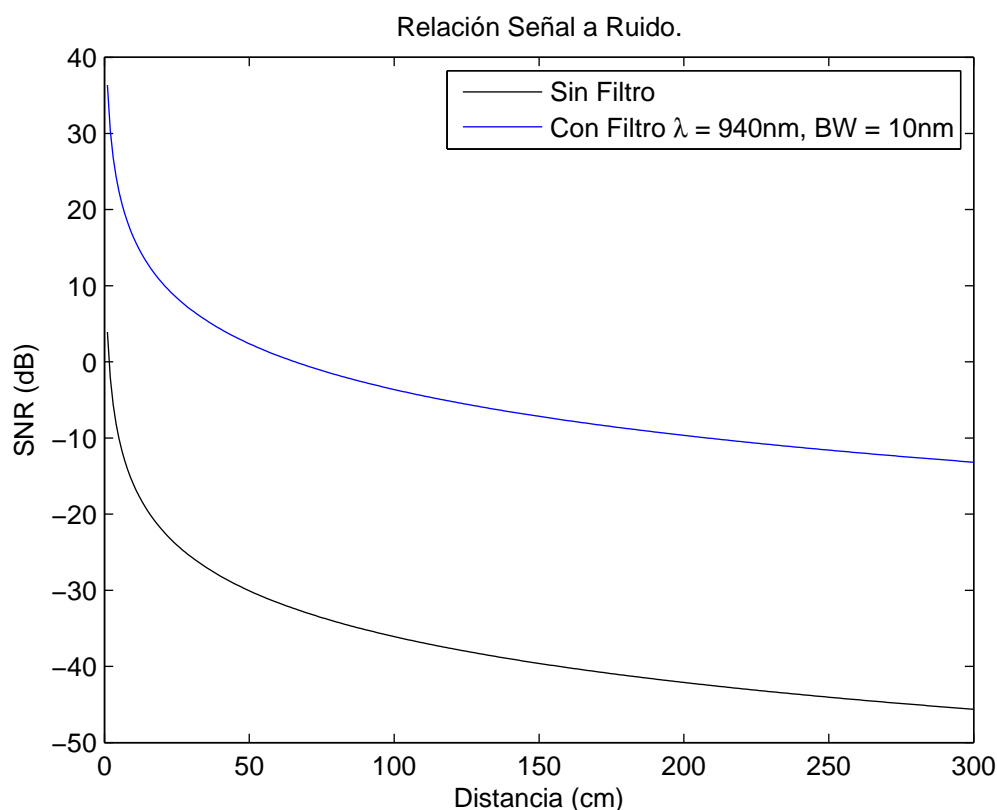


Figura 3.5.5: Simulación del comportamiento de la relación señal a ruido en el sistema, en función de la distancia entre la baliza y la cámara.

3.6. Medida de la energía relativa acumulada por la cámara.

Una vez que se han definido las características principales de la cámara y de la baliza de infrarrojos se pueden realizar varios experimentos que tienen como objetivo comprobar el comportamiento de la energía acumulada por la cámara con cada una de las magnitudes que influyen en el valor de gris de la cámara.

En primer lugar, se parte de que la cámara y la baliza están dentro de una habitación oscura, lo que asegura que en la cámara incida solamente la luz emitida por la fuente. En la Figura 3.6.1 se muestra una imagen representativa de lo que percibe la cámara bajo éstas condiciones.

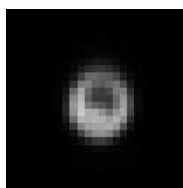


Figura 3.6.1: Imagen representativa del emisor usada como datos de entrada para el problema de la distancia entre una cámara y una baliza de infrarrojos.

Analizando la cámara desde el sistema óptico hacia el sensor de imágenes, y suponiendo además, que la cámara y la baliza están en una habitación oscura, la irradiancia que incide en la superficie de la lente puede estimarse mediante la ley del decrecimiento de la irradiancia mostrada en la ecuación (3.2.1):

$$E_{lente} = \frac{I_0 \cos \theta \cdot \cos \psi}{d^2} \quad (3.6.1)$$

donde I_0 representa la intensidad radiante del emisor lambertiano (en la expresión (3.2.1) se sustituye $f(\theta) = \cos \theta$), θ la orientación relativa del emisor respecto a la cámara y ψ la orientación de la cámara respecto al emisor (ángulo de incidencia), el $\cos \psi$ se utiliza para el cálculo del área efectiva de la lente, y d es la distancia entre la cámara y el emisor. En este caso se supone que la lente es una superficie plana.

La lente concentra la energía que incide en su superficie y la transfiere a la superficie del sensor, de manera que la irradiancia en el sensor E_{sensor} puede escribirse como:

$$E_{sensor} = \eta E_{lente} = \eta \frac{I_0 \cos \theta \cdot \cos \psi}{d^2} \quad (3.6.2)$$

donde η define un comportamiento lineal para el sistema óptico y depende de la transmitancia de la óptica, la relación entre la distancia focal y el diámetro del diafragma de apertura. No obstante, una vez fijado la distancia focal y la apertura, η es un valor constante.

A la salida de la cámara se obtendrán unos valores de gris b que dependen de la energía acumulada en el sensor, a través de la respuesta radiométrica de la cámara. Por tanto:

3.6. Medida de la energía relativa acumulada por la cámara.

$$b = f_{cám} (E_{sensor} \cdot t) \quad (3.6.3)$$

siendo t el tiempo de exposición y $f_{cám}$ la respuesta radiométrica de la cámara.

A partir de la calibración radiométrica [58, 56, 85, 86] es posible invertir el sentido de la expresión anterior. Es decir, a partir de los valores de gris obtener la irradiancia acumulada en el sensor de la cámara:

$$E_r = E_{sensor} \cdot t = g(b) \quad (3.6.4)$$

conociendo que $g = f_{cám}^{-1}$ y sustituyendo (3.6.2) en (3.6.4) quedaría:

$$g(b) = \eta \frac{I_0 \cos \theta \cdot \cos \psi}{d^2} \cdot t \quad (3.6.5)$$

Desde un punto de vista general, puede escribirse que:

$$g(b) = \Phi \left(I_0, t, \theta, \psi, \frac{1}{d^2} \right) \quad (3.6.6)$$

siendo Φ una función matemática que relaciona las magnitudes t , I_0 , d y los ángulos de orientación, que afectan a la energía acumulada por la cámara, calculada a partir de la función inversa de respuesta de la cámara (g).

La expresión (3.6.5) tiene varias características. La primera es que está orientada a píxel. Es decir, por cada píxel se obtendrá un estimado de la energía acumulada por la cámara. Este hecho representa una desventaja en el proceso de modelado, porque producto del ruido o la saturación del píxel en ocasiones no es posible detectar cambios en los valores de gris en los píxeles centrales incluso cuando cambien las magnitudes que afectan la energía en el sensor.

Para evitar este hecho se propone utilizar la región de interés que incluye la mancha provocada por la luz emitida por la baliza, y además asumir que la energía relativa acumulada por la cámara (E_r), debido a la energía emitida por la baliza es:

$$E_r = \frac{1}{A} \sum_{i=1}^A g \left(\frac{b_i}{b_{max}} \right) \quad (3.6.7)$$

donde A es el número total de píxeles dentro de la región de interés que contiene la imagen del emisor, b_i es el valor de gris del píxel i y b_{max} es el valor de gris máximo que depende de la cantidad de bits usado para hacer la conversión analógico-digital. En el caso de esta tesis se ha optado por usar imágenes de 8 bits por cada píxel, por lo que $b_{max} = 255$. E_r en este caso, es la variable empírica que se propone en esta tesis como una medida de la energía acumulada por la cámara producto de la luz proveniente de la baliza.

Fuera de la zona iluminada que pertenece a la región de interés (A) que contiene la imagen de la baliza (ver Figura 3.6.1) aparece un región oscura, cuyos niveles de gris deben ser cero. En la realidad, producto del ruido de la corriente de oscuridad estos píxeles pueden tomar valores entre 0 y 3 e introducen errores dentro de la medida de la energía acumulada.

Por tanto, otra de las restricciones que se han adoptado es: no utilizar en la ecuación (3.6.7) aquellos píxeles cuyo b_i estén por debajo de un valor de gris de 5.

Con este tipo de tratamiento se asegura una consistencia en los valores medidos para la energía relativa acumulada por la cámara. Por ejemplo en la Figura 3.6.2 se capturaron 30 imágenes para cada una de las tres intensidades radiantes que se muestran en la figura. Además se ha considerado, un solo tiempo de exposición y una sola distancia entre la cámara y la baliza. Para cada imagen se representa la E_r .

Como puede verse, los valores de E_r se mantienen prácticamente constantes a lo largo de las 30 imágenes para cada una de las intensidades radiantes que se muestran; específicamente se observa una dispersión total de un 2% del valor medio por cada intensidad radiante en las 30 imágenes capturadas.

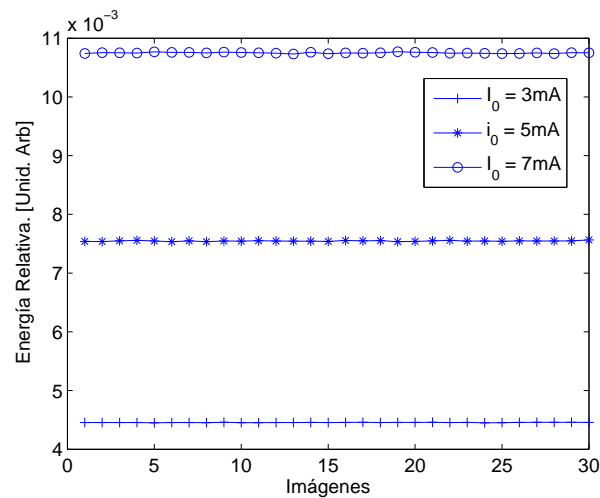


Figura 3.6.2: Energía relativa acumulada por la cámara a lo largo de 30 imágenes para una distancia y tiempo de exposición fijo a diferentes corrientes de polarización en el emisor, lo que equivale a diferentes intensidades radiantes.

Llegado a este punto, se ha decidido incluir en los puntos de partida para el desarrollo de la tesis, los comportamientos de la energía relativa acumulada por la cámara con cada una de las magnitudes que se relacionan en la ecuación (3.6.6), que son: tiempo de exposición, intensidad radiante de la baliza, orientación de la baliza respecto a la cámara y distancia entre la cámara y la baliza.

Para obtener dichos comportamientos se ha medido el valor de la energía relativa con las variaciones de cada una de esas magnitudes, suponiendo que la cámara y el emisor están en una habitación oscura y que además, se encuentran alineados y enfrentados. En todos los experimentos se ha utilizado una cámara Basler A622f [87] y un emisor de infrarrojos SFH 4200 [88].

3.6.1. Comportamiento de E_r con el tiempo de exposición.

El comportamiento de la energía relativa acumulada por la cámara con el tiempo de exposición se ha medido a partir de varias imágenes captadas con diferentes tiempos de exposición.

Como se plantea en las expresiones (3.6.4) y (3.6.5), el comportamiento resultante puede aproximarse usando una función lineal del tiempo de exposición.

En la Figura 3.4.2 se muestra el comportamiento de E_r con el tiempo de exposición para una distancia fija y tres intensidades radiantes diferentes.

La función que describe a E_r con el tiempo de exposición, si bien no es completamente lineal en todo el rango de variación de tiempos, puede aproximarse por una recta en un rango definido de tiempos. Por ejemplo, en la Figura 3.4.2 en el rango de 2000 a 10 000 μs , para las tres intensidades radiantes la suposición de “linealidad” del comportamiento es bastante precisa. No obstante, por encima de 10 000 μs aumenta la posibilidad de saturación y comienzan a aparecer no-linealidades en el comportamiento.

3.6.2. Comportamiento de E_r con la intensidad radiante del emisor.

Teóricamente, como se define en la expresión (3.6.5), E_r tendrá una relación lineal con la intensidad radiante. En nuestro caso, esta última se varió a partir de la corriente de polarización del emisor, aprovechando el hecho de que existe una relación lineal de la intensidad radiante con la corriente de polarización.

La mayoría de los fabricantes suelen representar gráficamente el comportamiento de la intensidad radiante en función de la corriente de polarización y normalmente, suelen hacer un cálculo relativo fijando una corriente de polarización como intensidad de referencia [89, 90, 88]. En la Figura 3.6.3 se muestra la relación entre la intensidad radiante y la corriente de polarización ofrecido por el fabricante.

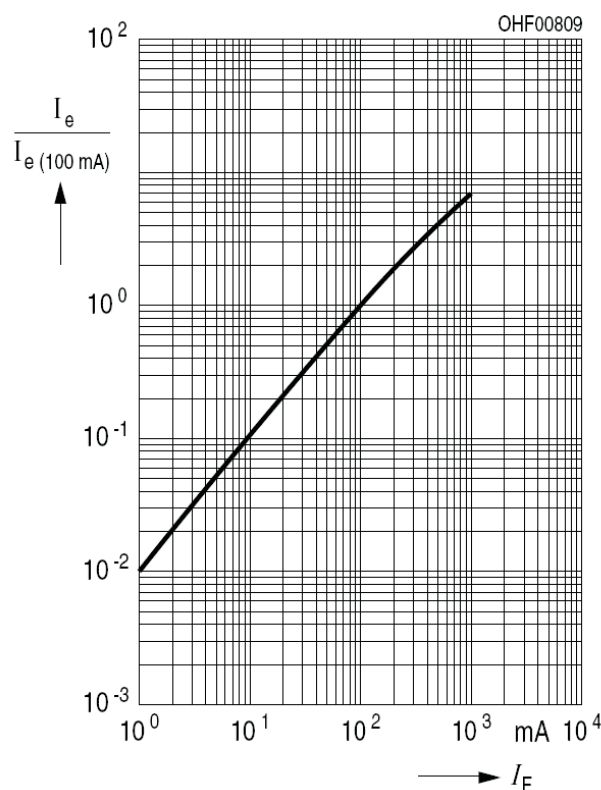


Figura 3.6.3: Comportamiento de la intensidad radiante en función de la corriente, extraído de los datos que ofrece el fabricante para el emisor SFH 4200. (Ver referencia [88])

Otra de las cuestiones a tener en cuenta es que en la alternativa que se propone, la corriente de polarización se mantendrá fija, y se asumirá conocida en los primeros experimentos, de modo que las variaciones de corriente estarán sujetas a derivas producto a cambios de la temperatura. Con esto se asume que las variaciones tendrán un rango dinámico pequeño, lo que acotaría el rango de variación de la corriente de polarización.

La independización de la corriente de polarización y en general de la intensidad radiante de la baliza es uno de los objetivos que se espera resolver más adelante en esta tesis.

En la Figura 3.6.4 se muestra el comportamiento medido para E_r en función de los cambios en la intensidad radiante. En ella puede verse que la energía relativa acumulada por la cámara puede aproximarse mediante una función lineal de la corriente de polarización de la baliza.

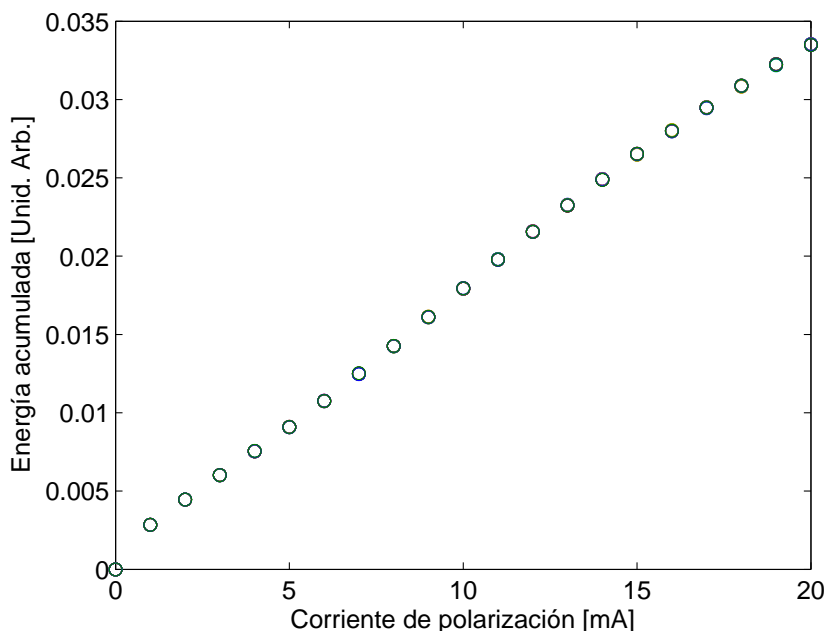


Figura 3.6.4: Comportamiento de la energía relativa acumulada por la cámara en función de la intensidad radiante del emisor.

3.6.3. Comportamiento de E_r con la orientación del emisor respecto a la cámara.

De forma similar a los comportamientos analizados en 3.6.1 y 3.6.2 se comprobó de forma empírica que la energía relativa acumulada por la cámara sigue un comportamiento lineal con la función que caracteriza el patrón de radiación del emisor usado en el experimento, tal como se muestra en la Figura 3.6.5, para el emisor usado, que en este caso, es un emisor lambertiano.

El patrón de radiación de la baliza pondera la intensidad radiante que ésta emite, lo que quiere decir que la energía que se recibe en la cámara se ponderará por una función similar al patrón de radiación y depende del ángulo de observación.

3.6. Medida de la energía relativa acumulada por la cámara.

Por lo tanto, si la energía acumulada por la cámara se puede aproximar mediante una función lineal de la intensidad radiante, entonces, para el patrón de radiación tendrá un comportamiento similar, este comportamiento se muestra en la Figura 3.6.5.

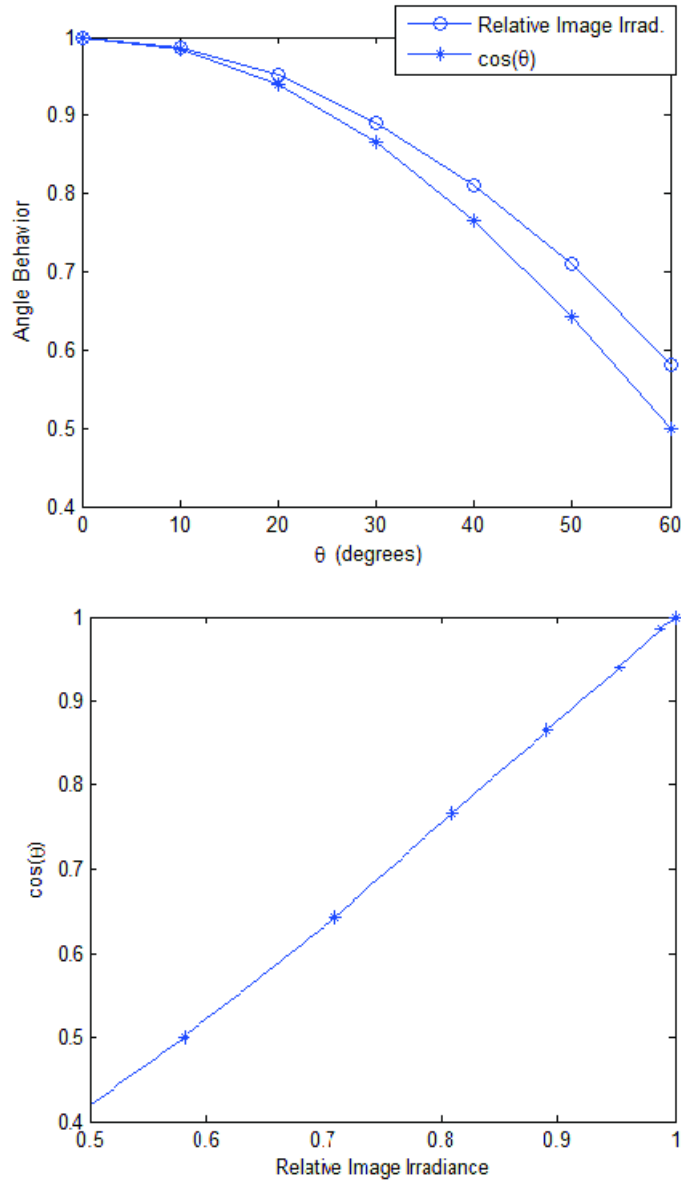


Figura 3.6.5: Comportamiento de la energía relativa normalizada con el ángulo de orientación del emisor y con la función que caracteriza el patrón de radiación del emisor.

3.6.4. Comportamiento con la distancia entre la cámara y el emisor.

La irradiancia relativa acumulada por la cámara es proporcional a la irradiancia en la lente de la cámara, según se establece en la expresión (3.6.2) y ésta última decrece

con el cuadrado de la distancia. Por lo tanto, se espera que E_r decretezca también con el cuadrado de la distancia.

Este comportamiento de E_r con la distancia permitirá relacionar la profundidad o distancia entre la cámara y el emisor, con los valores de gris en las imágenes del emisor/baliza.

En la Figura 3.6.6 se muestra el comportamiento de E_r con la distancia, para varias intensidades radiantes y un tiempo de exposición fijo.

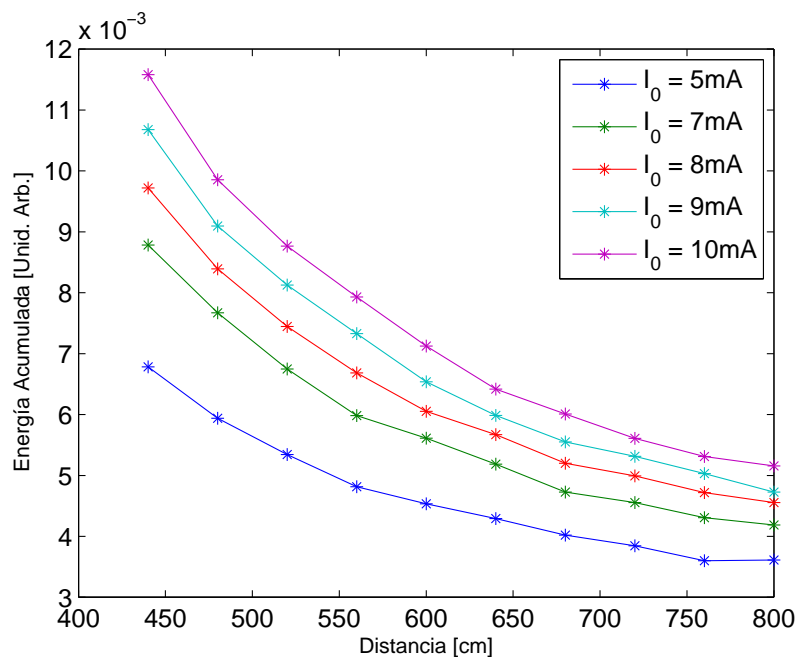


Figura 3.6.6: Comportamiento de la energía acumulada por la cámara respecto a la distancia entre la baliza y la cámara, para diferentes corrientes de polarización en la baliza y para un tiempo de exposición fijo.

3.7. Conclusiones.

En esta sección se ha descrito el punto de partida principal para el desarrollo de esta tesis, que radica en utilizar los valores de luminancia de las imágenes captadas de una baliza de infrarrojo para estimar una medida de la energía acumulada por la cámara y posteriormente, estimar la distancia a la que se encuentra la baliza respecto de la cámara.

Por otro lado, se han descrito los componentes del sistema, haciendo énfasis en las características y magnitudes que afectan a la energía que se acumula en la cámara. Por ejemplo, para ésta última, se establece que existe una dependencia lineal de la energía acumulada con el tiempo de exposición y que a su vez, éste último debe ser cuidadosamente seleccionado para obtener un mejor comportamiento en la aplicación.

En general, los parámetros en la cámara deben fijarse de forma manual para evitar que algún proceso automático influya en los valores de gris, los cuales constituyen la entrada para el cálculo de la energía acumulada, de esta manera se debe fijar la ganancia

de la cámara a 0dB para alcanzar el máximo rango dinámico de valores de energía en el sensor.

Durante todos los experimentos es necesario también mantener constantes la apertura del diafragma y la distancia focal, en caso de cambios en estos parámetros el sistema debe calibrarse nuevamente, tal como ocurre con el modelo geométrico.

Por su parte, la baliza de infrarrojos influye en la energía acumulada mediante su intensidad radiante. Esta magnitud es proporcional a la cantidad de energía que se acumula en la cámara y por lo tanto, es deseable que se mantenga constante durante todo el tiempo.

Asegurar la estabilidad en la intensidad radiante de la baliza es una desventaja, porque esta magnitud puede variar con la temperatura. Por lo tanto, lo ideal sería independizar la propuesta de medida de distancias de la intensidad radiante. Éste es uno de los objetivos principales de ésta tesis.

A su vez, la energía que se detecta en la cámara producida por la baliza depende del ángulo de observación mediante el patrón de radiación de la baliza. Una simplificación considerable en esta propuesta se obtendría si se analizara una fuente omnidireccional, de manera que se emitiera la misma cantidad de energía en todas las direcciones. Esto eliminaría la dependencia de esta propuesta con el ángulo de orientación de la baliza.

En este sentido, se parte de que la baliza será una fuente lambertiana lo que permite que el efecto del ángulo de observación pueda ser estimado mediante un único ángulo. Más adelante se verá cómo se estima el ángulo de orientación de la baliza para considerarlo dentro de la propuesta de medida de distancias.

Capítulo 4

Modelo para el sistema cámara-baliza de infrarrojos

4.1. Introducción.

En el Capítulo 3 se definieron las restricciones del problema de la estimación de la distancia entre una cámara y una baliza de infrarrojos usando un enfoque energético en el que se utilizan los valores de gris como fuente principal de información. Se ha definido, además, una medida empírica de la energía acumulada por la cámara a partir de la función de respuesta radiométrica, que ha sido calculada en un proceso de calibración previo de los que se relacionan en [56, 58, 85, 91]

A su vez, en el Capítulo 3 se han realizado medidas del comportamiento de la energía relativa acumulada por la cámara con el tiempo de exposición, la intensidad radiante de la baliza, la orientación de ésta respecto a la cámara, así como, la distancia que separa a la cámara de la baliza.

Los comportamientos de E_r con cada una de las magnitudes anteriores se han mostrado en el Capítulo 3 y de los cuales se puede afirmar que: E_r puede modelarse a partir de una función lineal de la intensidad radiante (corriente de polarización de la baliza), del tiempo de exposición, de la función que caracteriza al patrón de radiación y del inverso de la distancia al cuadrado.

Partiendo del planteamiento anterior y tal como se desarrollará en este capítulo, se propone un modelo del comportamiento de E_r con dichas magnitudes y que permite estimar la distancia entre la cámara y la baliza, bajo la condición de que la baliza y la cámara estén alineadas y enfrentadas.

4.2. Modelo radiométrico preliminar para E_r .

Partiendo de la ecuación (3.6.5), que para cada píxel establece que la energía acumulada en ese píxel es proporcional a la irradiancia en la superficie de la lente, la primera propuesta del modelo de E_r se puede escribir como:

$$E_r = \kappa_1 \frac{I_0 \delta(\theta) \gamma(\psi)}{d^2} t + \kappa_2 \quad (4.2.1)$$

donde κ_1 y κ_2 serían los parámetros del modelo que deben calcularse en un proceso de calibración. El parámetro κ_1 depende de la transmitancia de la lente y la relación entre

distancia focal y el diámetro del diafragma de apertura y κ_2 es una constante de *offset* [91].

Una vez obtenidos los valores para κ_1 y κ_2 , la distancia entre la cámara y la baliza puede estimarse según:

$$d = +\sqrt{\frac{\kappa_1 I_0 \delta(\theta) \gamma(\psi)}{E_r - \kappa_2}} \quad (4.2.2)$$

Los valores para los parámetros κ_1 y κ_2 son aquellos que minimizan el error definido por:

$$\epsilon = \left[E_r - \left[\kappa_1 \frac{I_0 \delta(\theta) \gamma(\psi)}{d^2} t + \kappa_2 \right] \right] \quad (4.2.3)$$

y del cual se obtiene un sistema de ecuaciones lineales, con κ_1 y κ_2 como incógnitas.

$$\left[\begin{array}{cc} \frac{I_0 \delta(\theta) \gamma(\psi)}{d^2} & 1 \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \kappa_1 \\ \kappa_2 \end{array} \right] = E_r \quad (4.2.4)$$

El proceso de calibración puede expresarse matricialmente como: $\mathbf{H} \cdot \mathbf{K} = \mathbf{B}$, donde $\mathbf{K} = [\kappa_1, \kappa_2]^t$ basado en técnicas de análisis numérico puede calcularse mediante: $\mathbf{K} = (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^t)^{-1} \cdot \mathbf{H}^t \cdot \mathbf{B}$ siendo \mathbf{H} la matriz que se forma a partir de las magnitudes que intervienen en la expresión (4.2.1) y \mathbf{B} representa los valores medidos de la E_r .

Para comprobar las bondades del modelo radiométrico descrito, se ha realizado el siguiente proceso de calibración. Este proceso utiliza los datos que se extraen de las imágenes capturadas en diferentes condiciones de tiempos de exposición, distancias e intensidades radiantes en el emisor. Concretamente, en el proceso de calibración se han considerado 3 distancias. Por cada distancia se toman 3 imágenes con diferentes intensidades radiantes y por cada intensidad radiante del emisor, se capturan 3 imágenes con diferentes tiempos de exposición lo que hace un total de 27 imágenes. Inicialmente no se introduce el ángulo.

Para el modelo preliminar, se asume una situación coplanar cámara-baliza alineada¹ con la cámara, con lo cual $\delta(\theta) = 1$ y $\gamma(\psi) = 1$, además, se considera que el sistema está en una habitación oscura.

Los resultados en el comportamiento del modelo que se propone en este epígrafe se muestran en la Figura 4.2.1 para una distancia fija.

En cuanto a la estimación de distancias, en la Tabla 4.2.1 se muestran los resultados de la distancia estimada en el rango de 34 a 100 cm, usando esta propuesta preliminar.

El modelo preliminar es una primera aproximación que demuestra que es posible estimar la distancia usando únicamente los valores de gris de las imágenes de una baliza de infrarrojos mediante un análisis energético del proceso de formación de imágenes [91].

¹Obtener una alineación coplanar entre el emisor y la cámara es un proceso complicado, lo mínimo es asegurar que se mantenga el mismo ángulo de alineación inicial en el proceso de captura de imágenes para calibración, y para el proceso de medida.

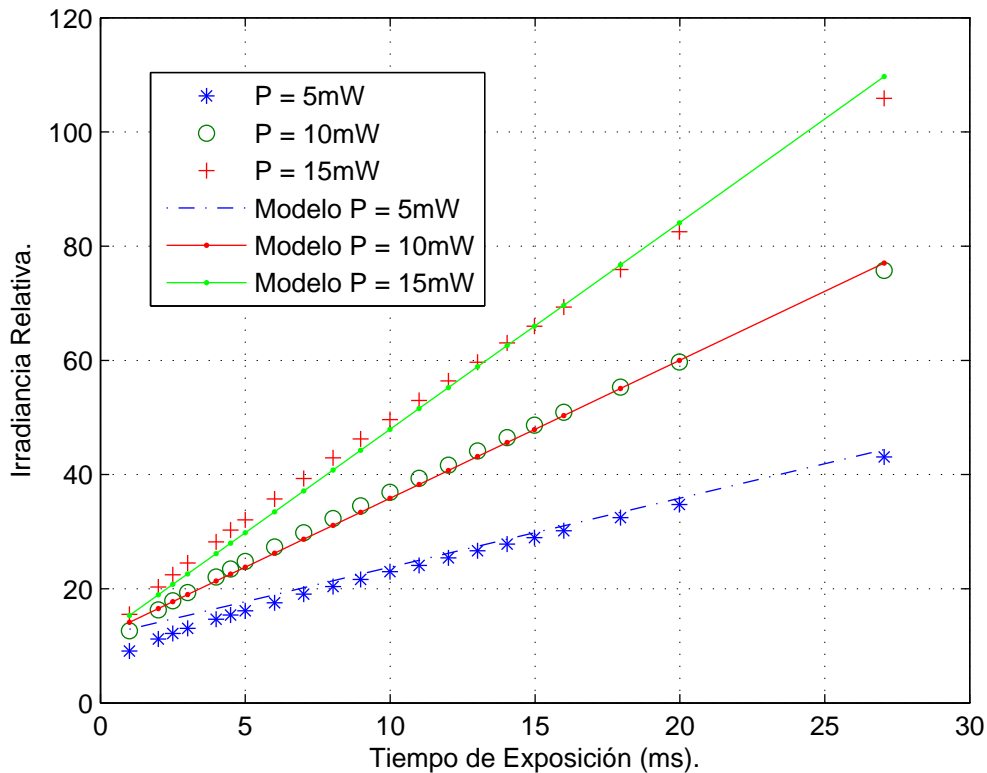


Figura 4.2.1: Comportamiento de la energía acumulada medida y modelada en función del tiempo de exposición, para diferentes intensidades radiantes del emisor y con una distancia fija. Las imágenes fueron tomadas con el emisor IRED **OD-50L** y una cámara **UniBrain**.

Sin embargo, los experimentos realizados se basan en condiciones ideales muy diferentes a las que se tendrán en la práctica. Incluso con éstas condiciones, los errores en la estimación de la distancia están alrededor del 5%. Lo que evidencia que el modelo preliminar no caracteriza con demasiada exactitud el comportamiento de la energía acumulada por la cámara.

Si bien el modelo preliminar demuestra que puede utilizarse la información de los valores de gris para estimar la distancia entre la cámara y la baliza, el estudio debe extenderse a ambientes iluminados, utilizando un filtrado óptico para la reducción del efecto de la luz ambiente (ver capítulo 3).

Por otro lado, dado el rango pequeño de distancias en las que se ha verificado el modelo preliminar y atendiendo a los errores que se cometen en la estimación de la distancia, es imprescindible que este modelo se modifique para obtener una mayor precisión en la medida de distancia final.

En el siguiente apartado, se analizan los comportamientos de E_r con t , I_0 y d , que fueron medidos en el Capítulo 3, sin incluir el ángulo de orientación de la baliza, y se propone una modificación en la expresión del modelo preliminar, con el objetivo de obtener una mayor precisión en la descripción del problema.

Tabla 4.2.1: Resultados en la estimación de distancias entre la cámara y el emisor mediante el modelo preliminar.

Dist. Real [cm]	Dist. Est. [cm]	Error Absoluto [cm]	Error Relativo [%]
34.6	33.5	1.1	3.1
39.5	38.4	1.1	2.9
44.4	42.8	1.6	3.6
47.3	45.2	2.1	4.4
52.2	49.6	2.6	4.9
57.2	54.3	2.9	5.1
62.0	58.9	3.1	5.0
65	61.7	3.3	5.0
70	66.5	3.5	5.0
75	71.3	3.7	4.9
79.6	75.8	3.8	4.8
84.6	81.0	3.6	4.3
87.4	84.0	3.4	3.9
90.2	87.6	2.6	2.9
94.8	92.8	2.0	2.1
97.5	96.3	1.2	1.2
100	99.7	0.3	0.3
102.3	103.0	0.7	0.7

4.3. Modificación del modelo preliminar.

Partiendo de los comportamientos de E_r con t , d e I_0 mostradas en el Capítulo 3, se propone modificar la expresión que caracteriza a E_r para obtener una mayor precisión en el modelado del problema y por consiguiente, errores menores en la estimación de la distancia.

Por otro lado, el modelo preliminar que se ha propuesto en la sección 4.2 ha sido probado en una habitación oscura, lo que constituye una desventaja para la posible aplicación en entornos interiores. Para resolver este inconveniente, se han obtenido los comportamientos de E_r con I_0 , t y d , respectivamente, utilizando un filtro interferencial en la cámara que reduce la influencia de la iluminación de fondo en el sistema cámara-baliza.

En este proceso de modelado, se ha utilizado un filtro interferencial con longitud de onda central de 940nm y con 10 nm de ancho de banda. Se ha utilizado el emisor IRED SFH4200 [88] y una cámara Basler A622f.

Estos comportamientos medidos experimentalmente, que se han obtenido en entornos iluminados con una luz preferentemente fluorescente que además, no afecta al sistema cámara-baliza si se utiliza un filtro interferencial como el antes mencionado (ver sección 3.5); no difieren de los comportamientos de E_r obtenidos en la habitación oscura. Es decir, se confirma que E_r tiene un comportamiento lineal con t , I_0 y d^{-2} .

Por ejemplo, para el caso del comportamiento de E_r con el tiempo de exposición se

asume una relación lineal entre E_r y t , de modo que en este experimento: $E_r = \tau_1 t + \tau_2$. Si se hace extensivo a los demás comportamientos de E_r medidos quedaría:

$$\begin{aligned}\Upsilon(d^{-2}) &= \delta_1 d^{-2} + \delta_2 \\ \Psi(I_0) &= \rho_1 I_0 + \rho_2 \\ \Gamma(t) &= \tau_1 t + \tau_2\end{aligned}\tag{4.3.1}$$

donde Υ es la función que caracteriza el comportamiento de E_r con la distancia entre la cámara y la baliza, Ψ caracteriza el comportamiento con la intensidad radiante y Γ con el tiempo de exposición. Además τ_1 , τ_2 , ρ_1 , ρ_2 , δ_1 y δ_2 son los parámetros que caracterizan los comportamientos con el tiempo de exposición, la intensidad radiante y la distancia entre la cámara y el emisor, respectivamente.

Esta interpretación parte del hecho de que en los experimentos individuales donde se caracterizan las relaciones de E_r con t , d e I_0 , respectivamente, se varía el parámetro específico y los demás se mantienen constantes, por tanto puede escribirse que:

$$E_r = \Upsilon(d^{-2})\Psi(I_0)\Gamma(t)\tag{4.3.2}$$

Sustituyendo cada función de (4.3.1) en (4.3.2) quedaría:

$$E_r = (\tau_1 t + \tau_2) \cdot (\rho_1 I_0 + \rho_2) \cdot \left(\delta_1 \frac{1}{d^2} + \delta_2 \right)\tag{4.3.3}$$

que al eliminar los paréntesis resulta en:

$$E_r = \kappa_1 \frac{I_0 t}{d^2} + \kappa_2 \frac{I_0}{d^2} + \kappa_3 \frac{t}{d^2} + \kappa_4 \frac{1}{d^2} + \kappa_5 I_0 t + \kappa_6 I_0 + \kappa_7 t + \kappa_8\tag{4.3.4}$$

donde κ_i con $i = 1, 2, \dots, 8$ son los parámetros del modelo, cuyos valores se calculan en un proceso de calibración.

La calibración de esta propuesta es similar al usado en el modelo preliminar en el cual, se mantiene la situación coplanar entre la baliza y la cámara, razón por la cual no aparece en el proceso de modelo los ángulos de orientación. Para este caso se capturaron un total de 108 imágenes distribuidas en 3 intensidades radiantes² diferentes, 4 distancias y 9 tiempos de exposición. Es decir, por cada intensidad radiante se usaron 4 distancias y en cada condición se utilizaron 9 tiempos de exposición en la cámara.

Con esta secuencia de imágenes se calcularon los coeficientes κ_i que minimizan el error definido en la siguiente expresión:

$$\epsilon = \left[E_r - \left(\kappa_1 \frac{I_0 t}{d^2} + \kappa_2 \frac{I_0}{d^2} + \kappa_3 \frac{t}{d^2} + \kappa_4 \frac{1}{d^2} + \kappa_5 I_0 t + \kappa_6 I_0 + \kappa_7 t + \kappa_8 \right) \right]\tag{4.3.5}$$

que matricialmente puede escribirse como: $\mathbf{K} = (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^t)^{-1} \cdot \mathbf{H}^t \cdot \mathbf{B}$ siendo \mathbf{B} los valores medidos de E_r , $\mathbf{K} = [\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_8]^t$ y \mathbf{H} la matriz del sistema que está formada por las magnitudes que intervienen en (4.3.4) y

El ajuste y el comportamiento del modelo, para dos de las 4 distancias consideradas en la calibración (400 cm y 350cm) se muestran en la Figura 4.3.1.

²Los cambios en la intensidad radiante en el emisor se realizaron a partir de los cambios en la corriente de polarización. Incluso fue esta última magnitud la que se utilizó como un valor representativo de la intensidad radiante, asumiendo que la corriente de polarización y la intensidad radiante son proporcionales.

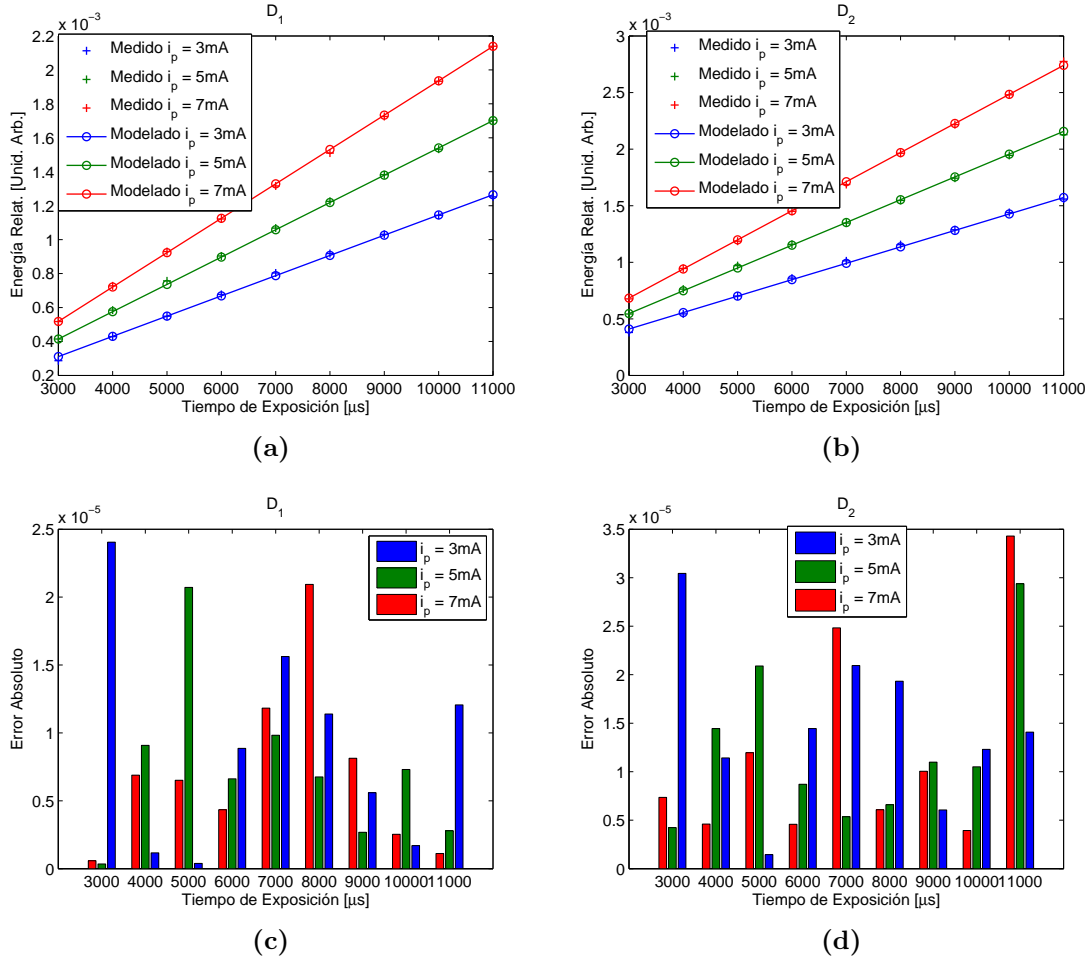


Figura 4.3.1: Resultados del proceso de calibración para el modelo de 8 parámetros. (4.3.1a-4.3.1b) Comportamiento del modelo para $D_1 = 400$ cm y $D_2 = 350$ cm, respectivamente. (4.3.1c-4.3.1d) Error absoluto en el proceso de ajuste del modelo para D_1 y D_2 , respectivamente.

Comparando los resultados del proceso de calibración que se muestran en la Figura 4.3.1 con el ajuste del modelo preliminar mostrado en la Figura 4.2.1, la precisión que se obtiene con el modelo de 8 parámetros es mucho mayor que en el modelo preliminar.

En el caso del modelo de 8 parámetros, se obtienen errores con dos órdenes de magnitud menor que los valores de energía relativa.

Después de haber calculado los valores para los diferentes κ_i , la expresión (4.3.4) se utilizó en experimentos de estimación de la distancia entre la cámara y la baliza. En este caso se usaron dos métodos para el cálculo de la distancia [92].

En el primer método se despeja directamente la distancia d de la expresión (4.3.4), mientras que en el segundo método se analizan las diferencias entre imágenes captadas con diferentes tiempos de exposición, con lo cual se garantiza mayor precisión e inmunidad a ruido si se compara con la primera alternativa.

El método basado en diferencias utiliza un tiempo de referencia bajo (t_r) y establece que las diferencias entre energías acumuladas en un par de imágenes captadas con tiempos de exposición diferentes (t_j y t_r), para la misma corriente de polarización y la

misma distancia, pueden calcularse mediante la siguiente expresión:

$$E_{r,t_j} - E_{r,t_r} = \kappa_1 \frac{I_0}{d^2} (t_j - t_r) + \kappa_3 \frac{(t_j - t_r)}{d^2} + \kappa_5 I_0 (t_j - t_r) + \kappa_7 (t_j - t_r) \quad (4.3.6)$$

donde t_j representa el tiempo $j = 1, 2, \dots, N$ y N es el número total de tiempos de exposición que se consideren para estimar la distancia, E_{r,t_j} la energía acumulada en la imagen captada con un tiempo de exposición t_j y E_{r,t_r} la energía relativa de la imagen de referencia.

De la ecuación (4.3.6), la distancia puede escribirse como:

$$d_j = \sqrt{\frac{\kappa_1 I_0 (t_j - t_r) + \kappa_3 (t_j - t_r)}{E_{r,t_j} - E_{r,t_r} - \kappa_5 I_0 (t_j - t_r) - \kappa_7 (t_j - t_r)}} \quad (4.3.7)$$

d_j es la correspondiente estimación para la diferencia de tiempos j .

En teoría, todas las d_j calculadas en las j diferencias de tiempos de exposición que se consideren deben de ser iguales. En la realidad el ruido y los errores en el ajuste del modelo, hacen que estos valores sean distintos y que tengan un comportamiento peculiar respecto al valor real de la distancia y en función del tiempo de exposición.

En otras palabras, en las j estimaciones de distancias existen algunos valores donde se obtiene mayor precisión, mientras para otros valores, los errores son mayores. Más adelante se verá este comportamiento.

Como se ha planteado anteriormente, habrá tantas estimaciones de distancias como tiempos de exposición se consideren. Concretamente, en los experimentos para comprobar la mejora de este modelo respecto a la alternativa preliminar, se usaron 17 tiempos de exposición en el método directo y 16 tiempos en el método de diferencias, en este último se asume $t_r = 2\text{ms}$.

En el experimento de estimación de distancias entre la cámara y el emisor se capturaron imágenes en el rango de 200 a 380 cm con un incremento de 20 cm. La corriente de polarización del diodo emisor se fijó en 5mA. En la Figura 4.3.2 se muestran los resultados en la estimación de distancias mediante el método directo.

En este caso, las estimaciones de distancias muestran un error que es una función lineal de la distancia real y en todos los casos, su valor es inferior a la distancia real, lo que implica que entre el proceso de calibración y el proceso de medida existe un *off-set* en iluminación que no se ha tenido en cuenta.

No obstante, los resultados en la estimación de la distancia pueden mejorarse considerablemente si se utiliza el método de diferencias entre imágenes captadas con diferentes tiempos de exposición, como muestra la Figura 4.3.3. Con la metodología de diferencias entre imágenes captadas con tiempos diferentes se elimina el *off-set* que provoca que los valores de las distancias estimadas (Figura 4.3.2) sean totalmente erróneos.

Para estas mismas condiciones, se probó el modelo propuesto en otro rango de distancias, concretamente desde 400 cm a 600 cm cada 20 cm.

Se han considerado en este caso, las mismas diferencias en tiempos de exposición que para el rango anterior (Figura 4.3.3). La diferencia fundamental es que en este rango de distancias está fuera de los valores de distancia que utilizaron en el proceso

de calibración. No obstante, los resultados de las distancias estimadas se muestran en la Figura 4.3.4.

Como puede verse en las Figuras 4.3.3 y 4.3.4 la precisión en la medida de la distancia, mejora considerablemente si se compara con el modelo preliminar y con el método directo de estimación de distancias.

No obstante, en los experimentos se han considerado 16 diferencias de tiempos de

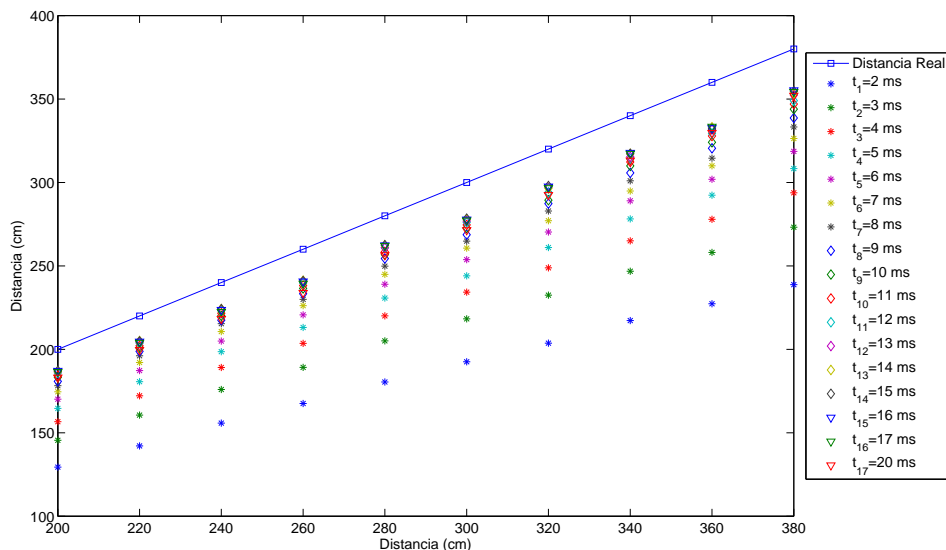


Figura 4.3.2: Resultados en la estimación de distancias mediante el método directo, para diferentes tiempos de exposición.

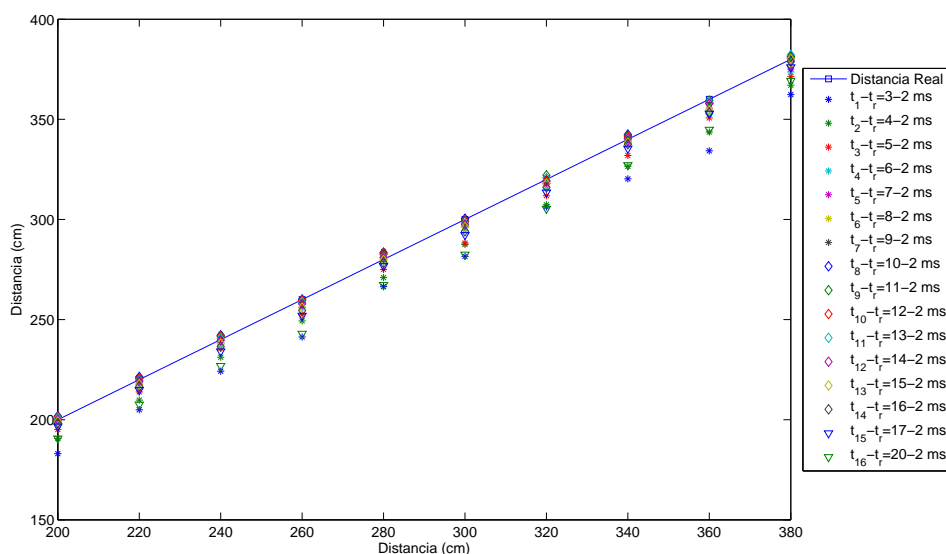


Figura 4.3.3: Resultados en la estimación de la distancia mediante el método de diferencias de energías acumuladas entre imágenes captadas con diferentes tiempos de exposición.

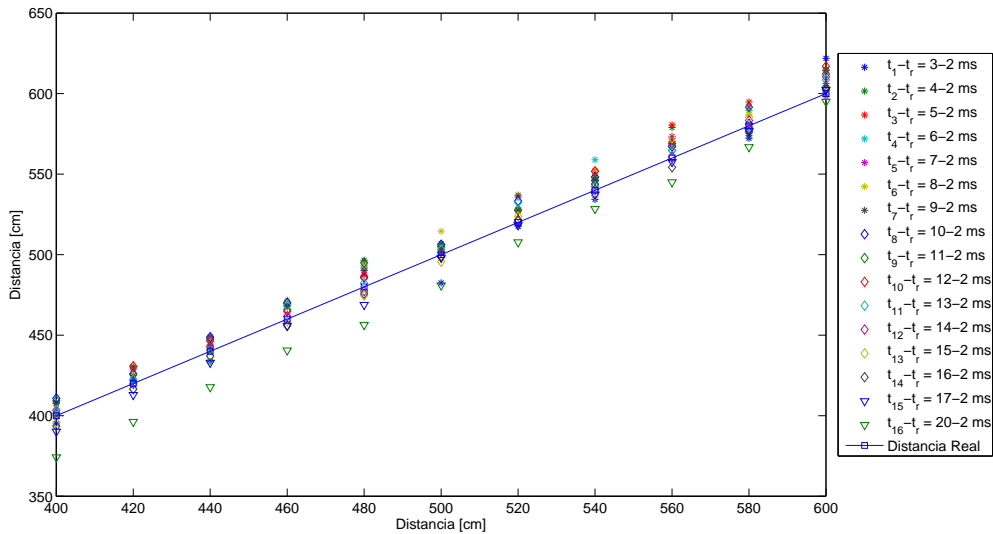


Figura 4.3.4: Resultados en la estimación de distancias para el método de diferencias en el rango de 400 a 600 cm.

exposición y para cada una de ellas no se obtiene la misma precisión. En el siguiente apartado se estudiará el error en la estimación de distancias en función de las diferencias de tiempos de exposición usadas para el proceso de medida.

4.4. Análisis de los errores en la estimación de distancias. Curvas de bañera.

Las Figuras 4.3.3 y 4.3.4 muestran una dependencia de la precisión en la estimación de distancias con las diferencias de tiempos de exposición. Es decir: hay tiempos de exposición en los que la distancia estimada es mucho más precisa.

Esta dependencia puede verse en la Figura 4.4.1, la cual se denomina: “*Curvas de Bañera*” [93].

Esta zona de máxima precisión, como se ha definido en el Capítulo 3 es más evidente al analizar los resultados de la medida de distancias.

Una mejora en la eficiencia de la propuesta se alcanzaría si la “zona óptima” de diferencias de tiempos de exposición se estimara en el proceso de calibración. Evidentemente, esta zona coincidirá con la zona donde la aproximación del modelo es más exacta.

Partiendo de este hecho, se analizó la metodología de calibración, no solamente para asegurar una precisión óptima en el proceso de ajuste de los parámetros del modelo, sino también para detectar la zona de diferencias de tiempos de exposición en donde la medida de la distancia tendrá la mayor exactitud posible.

En la Figura 4.4.2 se muestra el comportamiento del error relativo en el proceso de calibración en función de las diferencias de tiempos de exposición.

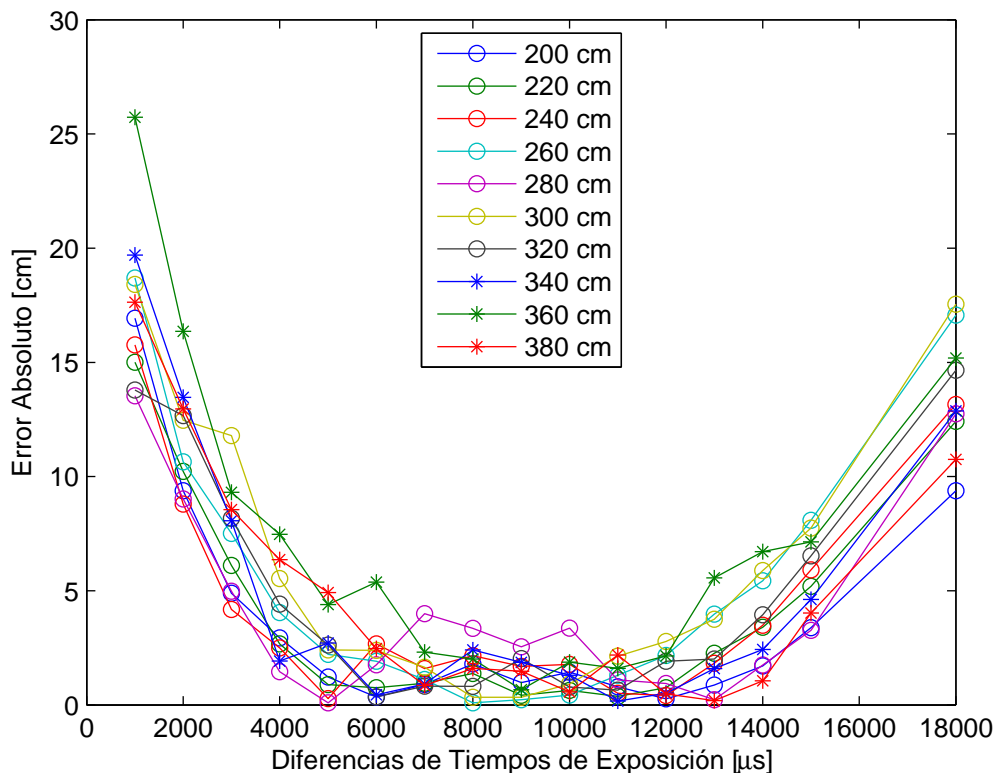


Figura 4.4.1: Comportamiento del error absoluto en la estimación de distancias en función de la diferencia de tiempos de exposición usados para diferentes distancias estimadas.

Nótese que en las 4 distancias consideradas en el proceso de calibración, los rangos de diferencias de tiempos de exposición donde el error es menor coinciden con los tiempos que se muestran en la Figura 4.4.1, por ejemplo en el rango de 5 a 14 ms, para todas las corrientes de polarización en la baliza, los errores en las curvas de bañera están por debajo de 10 %.

El diagrama de flujo de la metodología final para la calibración se resume en la Figura 4.4.3.

En el proceso de calibración se capturan imágenes a diferentes distancias. Por cada distancia se consideran diferentes corrientes de polarización y por cada distancia y corriente se captan imágenes para varios tiempos de exposición. En la Figura 4.4.3 las imágenes de calibración se representan como Datos Medidos.

Con los datos medidos, se utilizan todas las distancias y las corrientes para formar el sistemas de ecuaciones en el que se calculan los parámetros del modelo, es decir, se resuelve el sistema de ecuaciones representado por la expresión (4.3.5) y se obtienen valores para los coeficientes κ_i . En este proceso se utilizan solo algunos tiempos de exposición. No tiene sentido introducir tiempos altos ni tiempos bajos, porque se estaría introduciendo errores en el ajuste del modelo. No obstante, los tiempos óptimos estimados tampoco tienen por qué ser iguales a los usados para el cálculo de los parámetros κ_i .

4.4. Análisis de los errores en la estimación de distancias. Curvas de bañera.

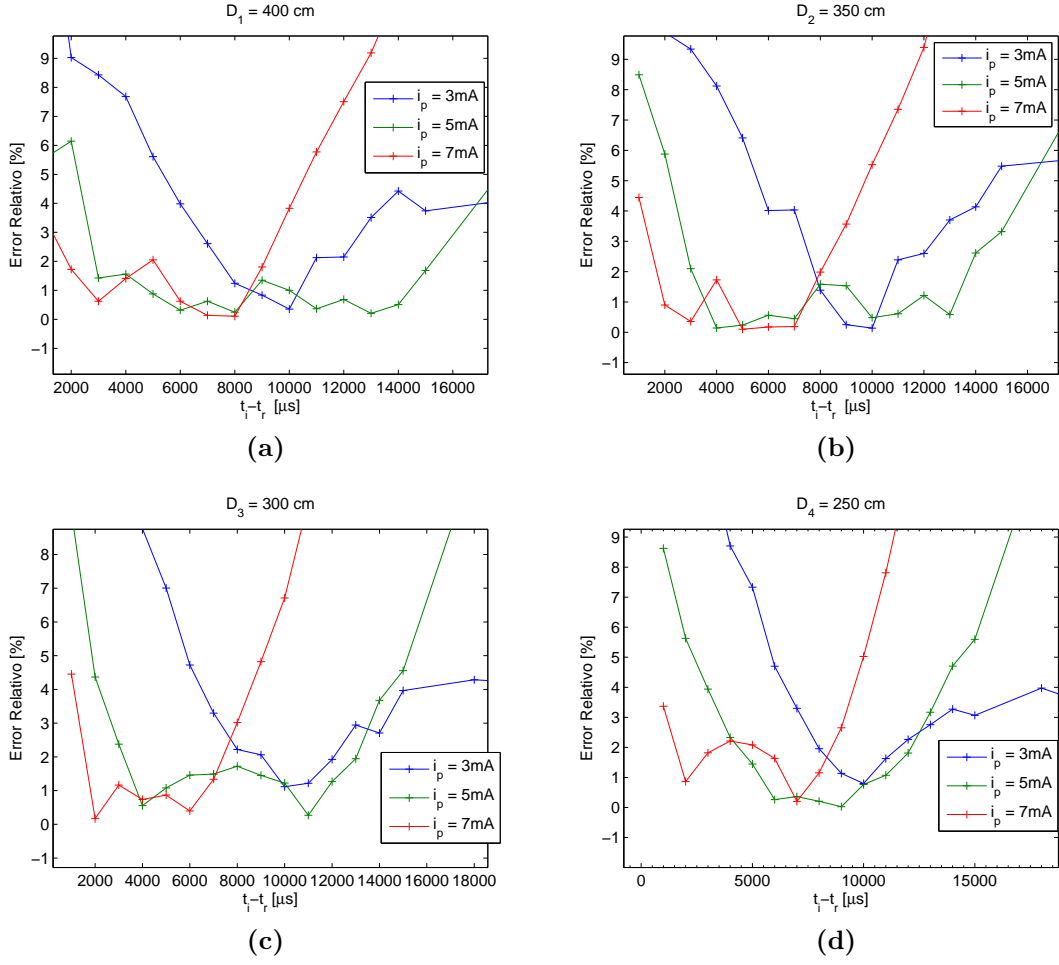


Figura 4.4.2: Comportamiento del error relativo del proceso de calibración en función de las diferencias de tiempos de exposición.

Una vez obtenidos los valores de los parámetros del modelo, se estiman las energías acumuladas teóricas (en la Figura 4.4.3: Datos Modelados).

Con los valores de energías modeladas y medidas se estiman las diferencias en energías acumuladas correspondiente a imágenes captadas con diferentes tiempos de exposición. Es decir, se obtienen las $E_{r,t_j} - E_{r,t_r}$ para los datos medidos, y las $E_{r,t_j}^m - E_{r,t_r}^m$ para los modelados y se calcula el error entre ellas. Este proceso es equivalente a la obtención de las curvas de Bañera. Posteriormente, de las curvas de Bañera, para cada corriente se seleccionan los tiempos de exposición donde la diferencia entre $E_{r,t_j} - E_{r,t_r}$ y $E_{r,t_j}^m - E_{r,t_r}^m$ es mínima.

Como prueba de esta modificación, se realizó la calibración del modelo usando imágenes captadas a 440, 560, 680, 720 y 800 cm, con intensidades radiantes correspondientes a 5, 7, 8, 9 y 10 mA y usando tiempos de exposición desde 6 a 21 ms en pasos de 1 ms. Estos son los tiempos que se usaron para la calibración aunque, en realidad se capturaron imágenes para otros tiempos de exposición, con el objetivo de probar posteriormente en qué rango de tiempos se obtiene el menor error en las curvas de bañera.

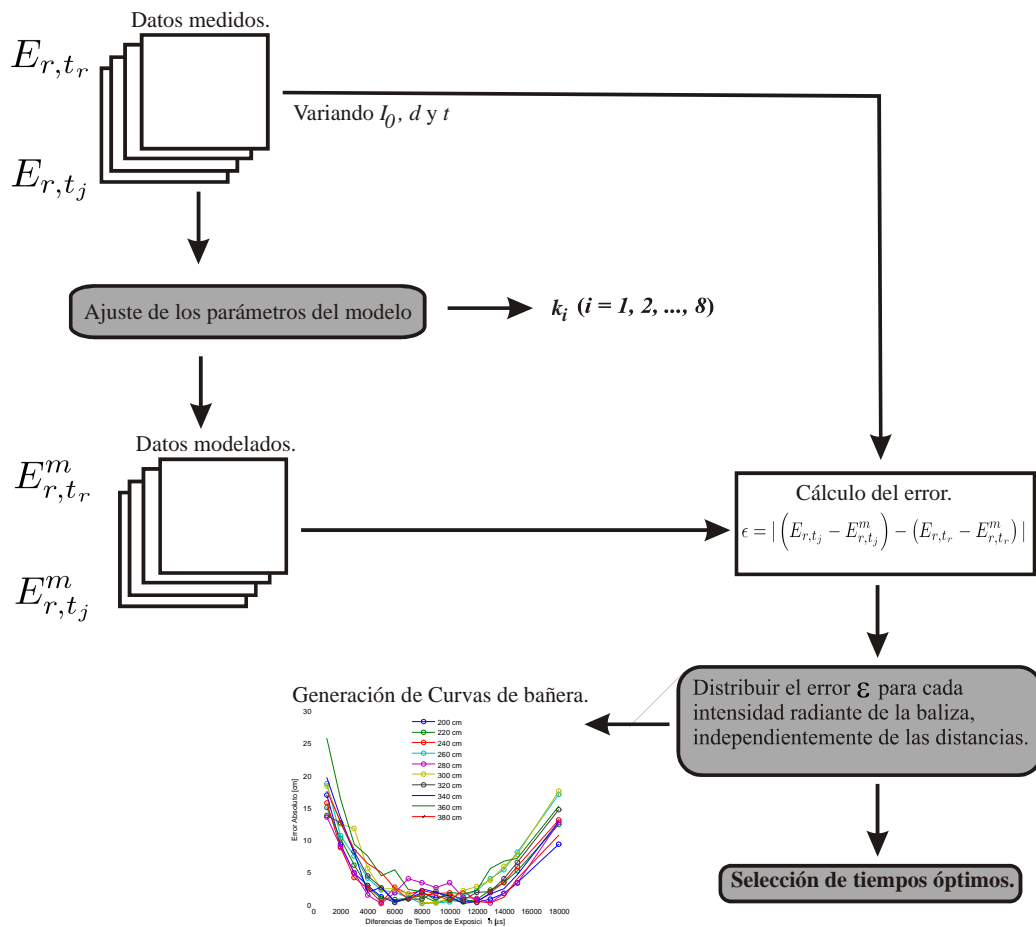


Figura 4.4.3: Diagrama de flujo de la metodología de calibración para el cálculo de los parámetros del modelo y la zona de tiempos de exposición óptimos para la medida.

La Figura 4.4.4 muestra el comportamiento de los errores en el proceso de ajuste de los parámetros del modelo para las distancias 440 y 560 cm, respectivamente.

Con los resultados de la calibración anterior se realizaron pruebas para la estimación de distancias en el rango de 400 a 800 cm. A partir de las curvas de bañera se determinó que los tiempos óptimos para la estimación de distancias están entre 18 y 24 ms. De esta manera el algoritmo de medida captura 5 imágenes con 2, 18, 20, 22 y 24 ms. Posteriormente, calcula las diferencias tomando como tiempo de referencia 2 ms y obtienen 4 estimados de distancias. La distancia final es el valor medio de las 4 medidas anteriores.

En la Figura 4.4.5 se muestra una parte de los resultados de este experimento en el que se usó la metodología de selección de tiempos óptimos en el proceso de estimación de la distancia. Los resultados finales para cada una de las intensidades radiantes en el emisor están disponibles en la Sección 8.2.1.

4.4. Análisis de los errores en la estimación de distancias. Curvas de bañera.

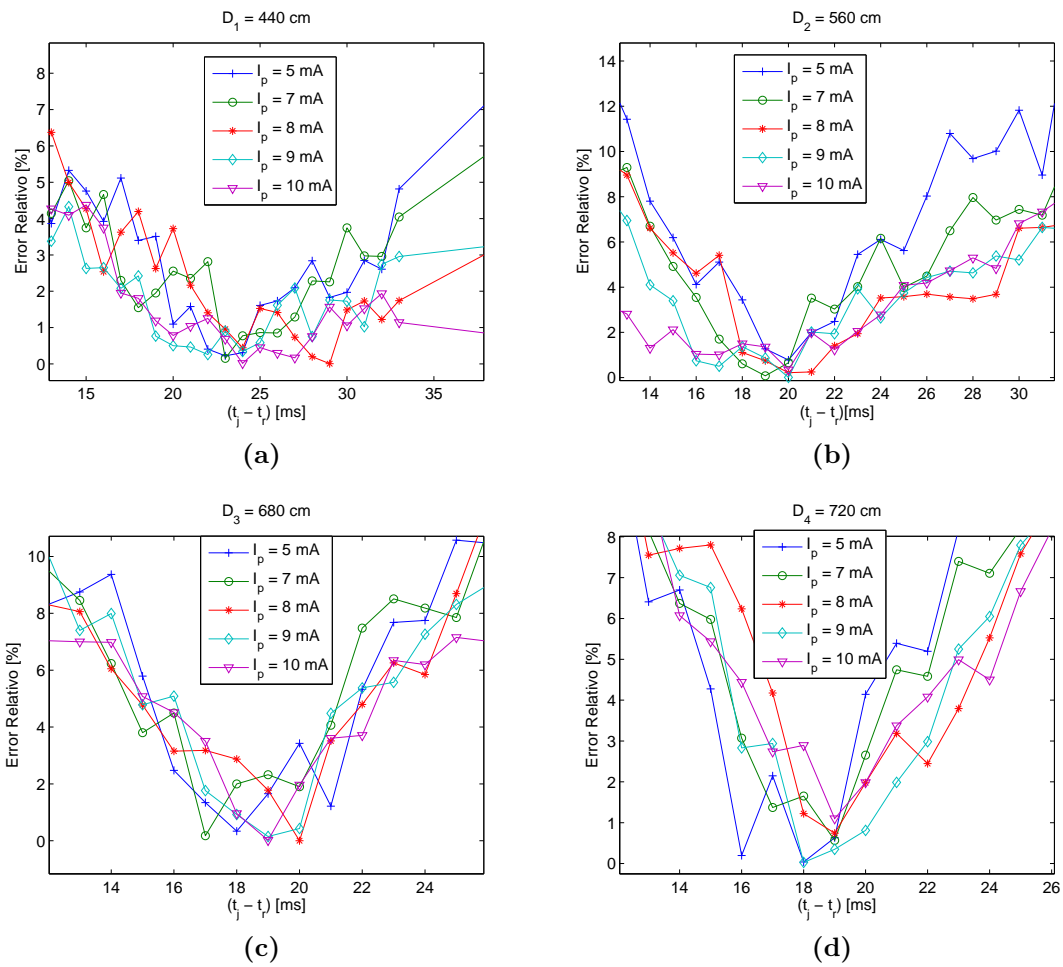


Figura 4.4.4: "Curvas de bañera" para las distancias. (a) Para 440 cm. (b) Para 560 cm. (c) Para 680 cm. (d) Para 720 cm.

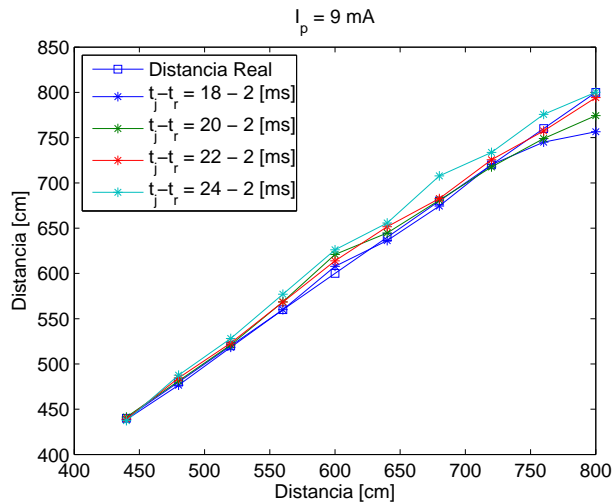


Figura 4.4.5: Resultados en la estimación de distancias mediante la selección de tiempos óptimos, para una corriente de polarización en la baliza de 9mA.

4.5. Conclusiones.

En este capítulo se introduce el problema del cálculo de la distancia entre una cámara y un emisor de infrarrojos a partir de los valores de gris de las imágenes.

Se demuestra, en condiciones restringidas, que la hipótesis de si es posible obtener alguna información de la distancia entre una cámara y un emisor de infrarrojos a partir de los valores de gris, es válida y puede utilizarse como una alternativa de cálculo de profundidad dentro de las metodologías ya existentes.

En este capítulo se ha descrito cronológicamente el proceso de modelado de la energía relativa acumulada por la cámara y su relación con las magnitudes que la afectan. Se proponen dos modelos, el modelo preliminar de dos parámetros y el segundo modelo, con 8 parámetros, que ha demostrado que es más preciso que el preliminar.

Inicialmente se realizaron pruebas en ambientes oscuros y posteriormente, mediante el uso de un filtro interferencial (ver sección 3.5), se repitieron los experimentos en un local con predominio de la luz fluorescente.

La propuesta inicial de modelo se modificó, obteniendo mejora en la precisión del modelo; por otro lado, se realizaron pruebas para estimar la distancia entre la cámara y el emisor que validan el modelo propuesto.

No obstante, la mayoría de los experimentos se realizaron bajo la condición de que la cámara y el emisor deben estar alineados y sin incluir el efecto del patrón de radiación en el modelo. Esto último, es una de las desventajas de la propuesta que se pretende resolver más adelante. Otra de las desventajas, y en nuestra opinión la más importante, es la dependencia del modelo con la intensidad radiante (corriente de polarización) del emisor.

Posteriormente, se describirá cómo se propone resolver ambas desventajas, para definir una alternativa que incluya la orientación del emisor y sea independiente de la corriente de polarización del emisor.

Capítulo 5

Efectos de la variación de los parámetros en la estimación de distancias

5.1. Introducción.

En este capítulo se presenta un estudio del comportamiento del modelo propuesto en el Capítulo 4 frente a la variación de los parámetros y magnitudes que lo integran, bajo la suposición de que la cámara y la baliza se encuentran alineadas y enfrentadas.

En el Capítulo 4 se demostró que la energía relativa acumulada por la cámara (E_r) puede modelarse a partir de una función lineal del tiempo de exposición, de la corriente y del inverso de la distancia entre la cámara y la baliza al cuadrado, respectivamente. Este planteamiento se basó en hipótesis teórica y su posterior constatación empírica del comportamiento de E_r con cada una de las magnitudes mencionadas anteriormente.

Este modelo depende de las medidas de magnitudes que intervienen en el proceso de formación de imágenes, para el problema concreto del sistema compuesto por la cámara y el baliza de infrarrojos.

Como se ha visto en el Capítulo 4 la medida empírica que se usa en el proceso de modelado (la energía relativa acumulada por la cámara) se mantiene aproximadamente constante en una misma condición de tiempo, corriente y distancia a lo largo de 30 imágenes. Concretamente presenta un 2% de variación, lo que se asumirá como ruido en la medida de la energía relativa.

No obstante, las medidas que se relacionan con la energía relativa acumulada por la cámara no están exentas de errores. Por lo tanto, detectar el comportamiento del modelo en la estimación de distancias frente a errores en la determinación de los parámetros que intervienen en él, es de vital importancia y permitirá conocer en qué proporción afecta cada uno a la medida de distancia final.

5.2. Errores en el proceso de medida debido a la variación de los parámetros del modelo.

El modelo que se define en el Capítulo 4 supone que la cámara se encuentra alineada con la baliza de infrarrojos, que de ésta última se conoce la corriente de polarización, la cual representa una medida de la intensidad radiante.

Bajo las condiciones planteadas en el Capítulo 4, los errores en el proceso de medida dependerán de la precisión con que se mida la corriente de polarización del emisor, el tiempo de exposición en la cámara y la irradiancia relativa acumulada por la cámara.

5.2.1. Error en la medida de distancias debido a variaciones en el tiempo de exposición en la cámara.

En la Figura 5.2.1 se muestran las estimaciones de distancias suponiendo que el tiempo de exposición en la cámara está afectado por un ruido aleatorio de amplitud máxima 2 ms.

La Figura 5.2.1 se ha obtenido a partir de una simulación en el que se considera el método directo para la medida de la distancia, en un rango de distancias de 100 a 500 cm, para una corriente de polarización de 60 mA y considerando un rango de tiempos de exposición, a los cuales se le ha añadido el ruido.

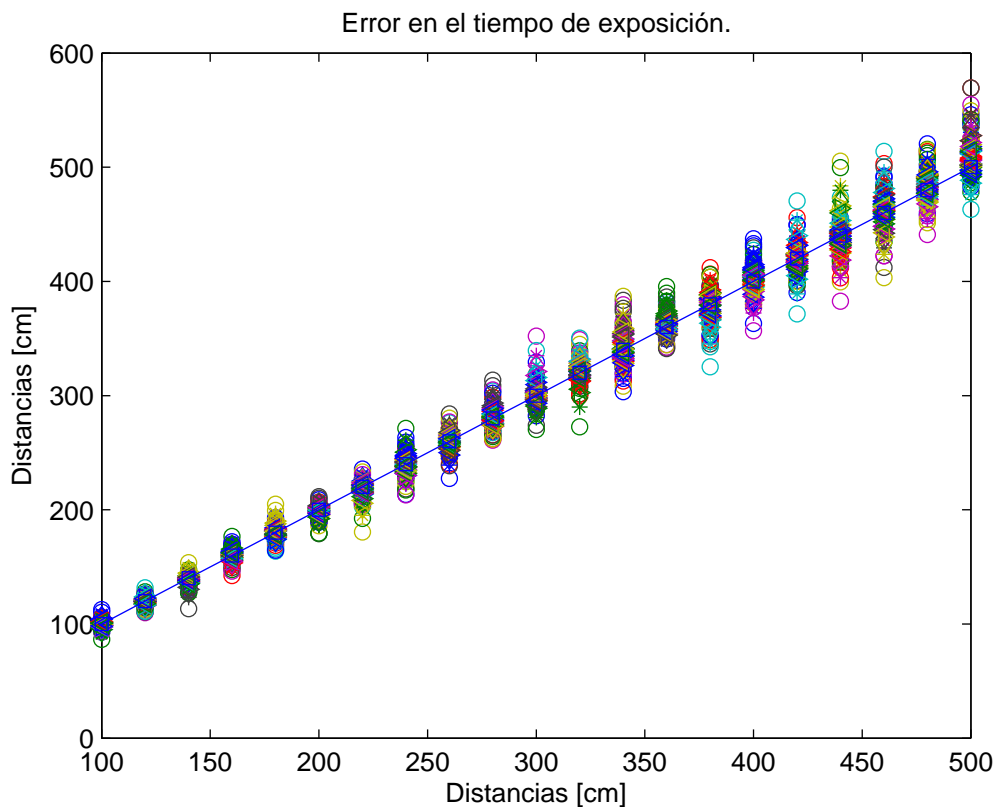


Figura 5.2.1: Resultados de la estimación de distancias considerando un ruido en el tiempo de exposición de la cámara de 2ms de amplitud máxima.

De la Figura 5.2.1 puede verse que la precisión en la medida del tiempo de exposición, así como la exactitud con que se fije este parámetro en la cámara afectará considerablemente la estimación de la distancia.

La magnitud del error en el tiempo de exposición depende del dispositivo de visión artificial que se utilice y su correspondiente análisis en el valor final de la distancia debe particularizarse para una cámara en concreto.

5.2. Errores en el proceso de medida debido a la variación de los parámetros del modelo.

Por ejemplo, para la cámara *Basler A622f* [87] el mínimo cambio de tiempo de exposición es de $20\mu s$, por lo que considerar que el tiempo de exposición puede variar en 2 ms es 200 veces lo que en la realidad podría cometer de error ($\pm 10\mu s$)

Un análisis más real, aunque también excesivo, resultaría si se considera que el error en el tiempo de exposición está en el orden de $200\mu s$, como se muestra en la Figura 5.2.2.

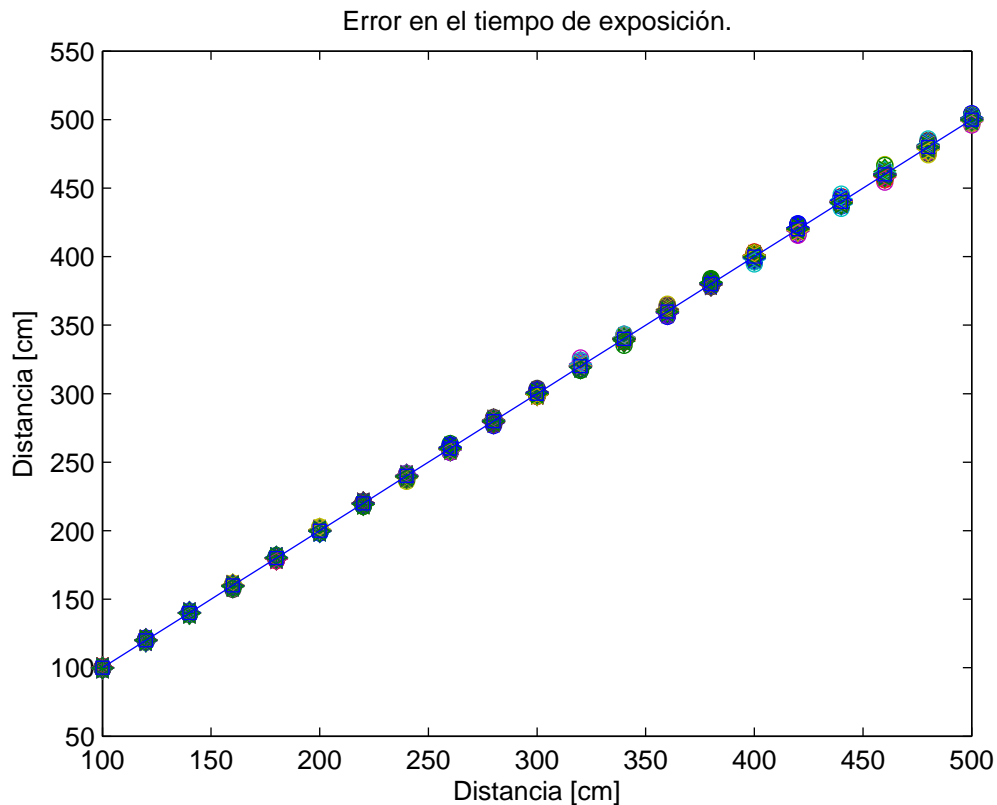


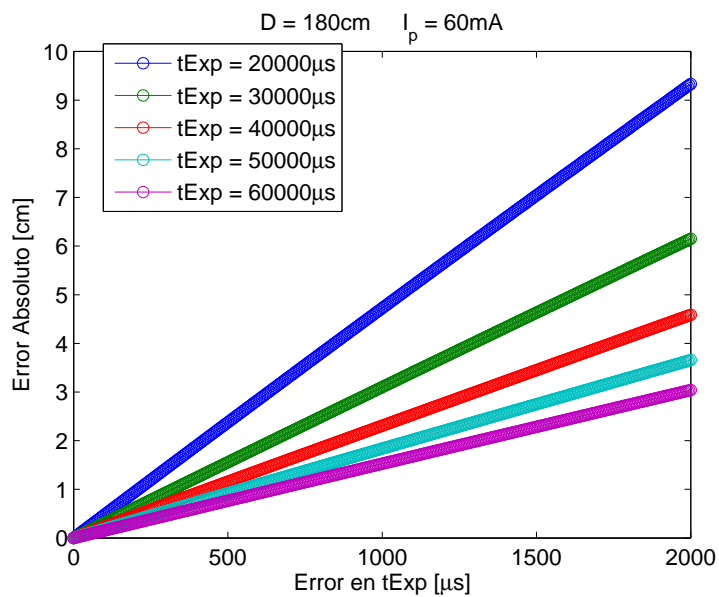
Figura 5.2.2: Estimación de distancias considerando un ruido en el tiempo de exposición de la cámara de $200\mu s$ de amplitud máxima.

Para este caso, el error en la estimación de la distancia disminuye considerablemente y se mantiene por debajo de un 10% de error.

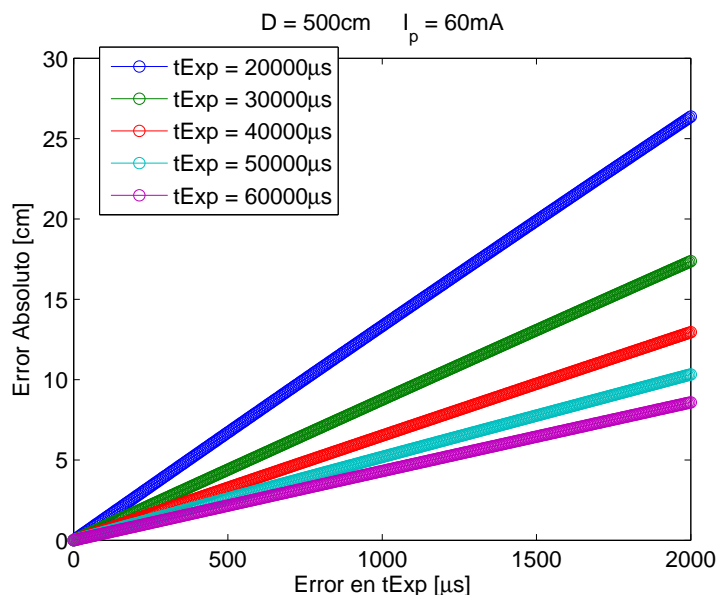
Atendiendo a la dependencia lineal de la energía relativa acumulada por la cámara con el tiempo de exposición [92, 91], puede afirmarse que los errores en la estimación de distancias tendrán un comportamiento lineal con los errores en el tiempo de exposición.

La Figura 5.2.3 muestra la simulación de cómo se comportarían los errores en la distancia estimada, mediante el método directo, en función del error en el tiempo de exposición.

Las Figuras 5.2.1, 5.2.2 y 5.2.3 están basadas en simulaciones considerando el método directo. En el caso del método de diferencias de energías en imágenes captadas con diferentes tiempos de exposición, la influencia del error en los tiempos de exposición en la medida de distancia es mucho más importante que para el método directo.



(a)



(b)

Figura 5.2.3: Comportamiento del error absoluto en la estimación de distancias, para una distancia y una corriente fija, en función del error en el tiempo de exposición de la cámara. 5.2.3a para 180 cm, 5.2.3b para 500 cm.

En la Figura 5.2.4 se muestran los resultados de la distancia estimada considerando que las diferencias de tiempos de exposición están afectadas por un ruido aleatorio de $200 \mu\text{s}$ como máximo.

Si se compara la Figura 5.2.4 con 5.2.2, el método directo es mucho más inmune a errores en el tiempo de exposición que el método de diferencias. Sin embargo, en el Capítulo 4 se demostró la que el método de diferencias es mucho más preciso en la estimación de distancias que el método directo.

5.2. Errores en el proceso de medida debido a la variación de los parámetros del modelo.

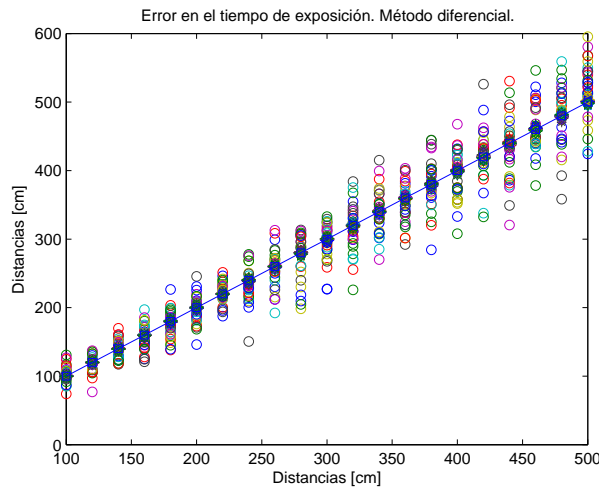


Figura 5.2.4: Comportamiento de la estimación de distancias según el método diferencial, considerando un error máximo de tiempos de exposición de $200\mu s$.

Anteriormente se planteó que el nivel máximo del ruido en el tiempo de exposición de la cámara depende concretamente de la cámara que se utilice. Por tanto, si se desea realizar un análisis más realista, se debe obtener para una cámara concreto.

No obstante, en la realidad la mayoría de las cámaras ofrecen precisiones del orden de los microsegundos en el tiempo de exposición. En el caso concreto de la cámara *Basler A622f* el máximo error en el tiempo de exposición es de $20\mu s$ que es la resolución mínima que ofrece el fabricante para esta cámara en concreto.

Se ha simulado el proceso de estimación de distancias considerando que el valor para el error máximo en el tiempo de exposición es de $20\mu s$. El comportamiento en la estimación de la distancia mediante el método de diferencias de tiempos de exposición se expone en la Figura 5.2.5.

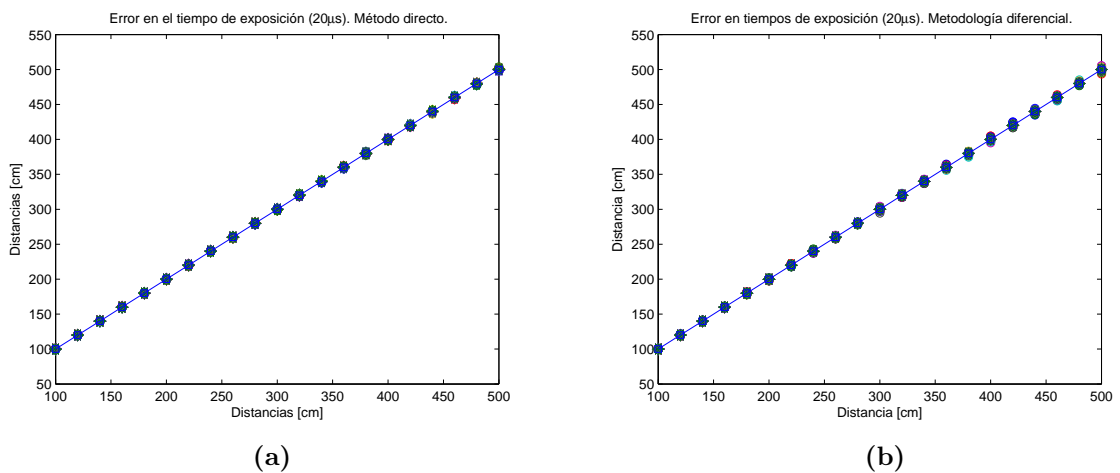


Figura 5.2.5: Comportamiento de la medida de distancias suponiendo medidas erróneas en el tiempo de exposición. 5.2.5a Método directo. 5.2.5b Método diferencial.

En la Figura 5.2.5 se muestran los comportamientos de la estimación de la distancia

utilizando el método directo y el método diferencial explicados en el Capítulo 4, pero en este caso se supone que el ruido en el tiempo de exposición es de $20\mu s$.

Con este valor de error en el tiempo de exposición, en la estimación de la distancia se obtendría un error máximo de 2,5 % de la medida real, según las simulaciones realizadas.

En resumen, atendiendo a que en los dispositivos de visión artificial, el tiempo de exposición se establece con una precisión del orden de las decenas de microsegundos, el efecto de este error en la medida de la distancia, tanto en el método directo, como en el método de diferencias de tiempos de exposición se mantiene por debajo de un 2,5 % de error respecto al valor real de distancia. Esto permite afirmar que puede ser despreciado el efecto del error en el tiempo de exposición de la cámara como fuente de error en la medida de la distancia.

Por otro lado, el error en el tiempo de exposición tiene un efecto mayor en el método de diferencias que en el método directo. Sin embargo, en el Capítulo 4 se ha demostrado que la metodología de diferencias es más robusta que el método directo frente a un determinado offset, que puede provocar que la distancia estimada sea siempre menor que la distancia real. Evidentemente, para nuestra aplicación el offset de energía es mucho más importante que el error que pudiera provocar el tiempo de exposición en la medida de la distancia final. Finalmente, se decide que el método de diferencias es el más conveniente para ser utilizado como mecanismo de medida de distancias.

5.2.2. Error en la medida de distancias debido a variaciones en la corriente de polarización del emisor.

Una de las magnitudes más problemáticas en la propuesta del modelo es la intensidad radiante, la cual se representa en el proceso de modelado a través de la corriente de polarización del diodo de infrarrojos.

Como se ha definido en los Capítulos 3 y 4, la intensidad radiante, representada en el modelo a partir de la corriente de polarización de la baliza, afecta de forma proporcional a la energía acumulada por la cámara. En primer lugar, esta magnitud debe ser conocida a priori y además debe asegurarse que se mantiene constante durante todo el proceso de medida, lo cual es una desventaja que más adelante en esta tesis se resolverá mediante la propuesta de un modelo independiente de la corriente de polarización.

Producto de la dependencia lineal entre la energía acumulada por la cámara con la corriente de polarización de la baliza [92, 91], el error de la intensidad radiante y su correspondiente efecto en la distancia estimada es una función lineal.

En la Figura 5.2.6 se muestra el comportamiento, en dos distancias diferentes, del error en la distancia estimada como una función del error en la intensidad radiante de la baliza, para 6 corrientes de polarización diferentes y una diferencia de tiempos de exposición fija.

La Figura 5.2.6 es el resultado de una simulación en la que se estima la distancia utilizando el modelo propuesto en el Capítulo 4 mediante la metodología de diferencias. En este caso, el tanto por ciento de error en la estimación de la distancia estará por encima del 10 %.

Por otro lado se parte de que la baliza de infrarrojos tendrá una corriente de polarización o intensidad radiante fija y lo suficientemente estable, con lo cual de manera ideal se supone que la corriente de polarización no varía más de un 10 % de su valor. No

5.2. Errores en el proceso de medida debido a la variación de los parámetros del modelo.

obstante, para variaciones de hasta 20 mA, en los valores de corriente considerada en la simulación anterior, el error relativo en la estimación de la distancia está por debajo del 16 %.

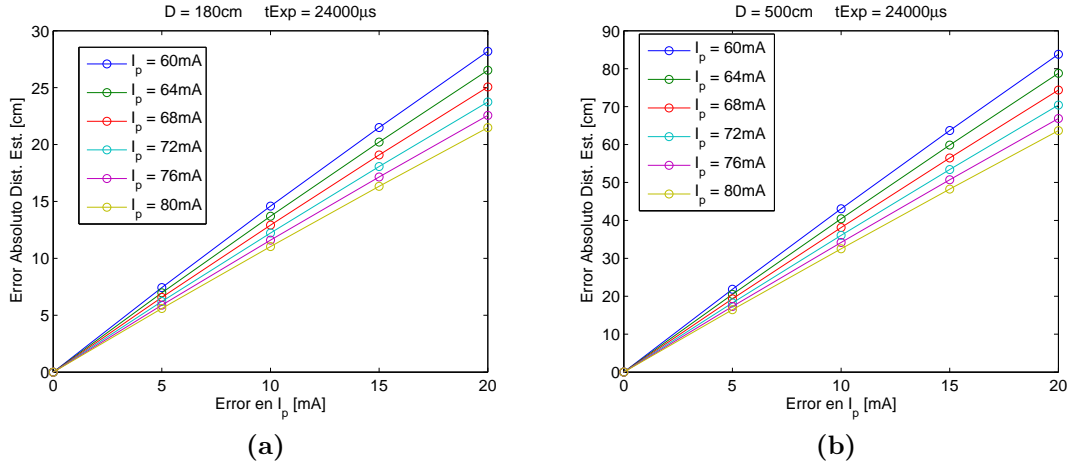


Figura 5.2.6: Comportamiento del error absoluto en la medida de distancias con errores en la corriente de polarización de hasta 20mA, para 6 corrientes de polarización diferentes y para una diferencia de tiempos de exposición fija. 5.2.6a para una distancia de 180 cm. 5.2.6b para una distancia de 500 cm

En la realidad, el problema relacionado con la intensidad radiante difiere un poco de la simulación que se ha realizado, y cuyos resultados se presentan en la Figura 5.2.6. Nótese que en esta simulación se conoce a priori la intensidad radiante a la cual se le ha añadido un error de 20mA.

Si bien en la realidad las variaciones en la corriente de polarización por temperatura no producirán una variación abrupta de 20mA respecto al valor estable, sí que es mucho más probable que el valor inicial de la corriente de polarización de la baliza se desconozca, y por lo tanto, asumir un valor previo sí que puede producir un error mayor en la corriente de polarización en el modelo. De ahí la necesidad de definir una metodología de medida de la distancia que no dependa directamente de la corriente de polarización de la baliza (Capítulo 7).

El máximo error considerado (20mA), fue seleccionado por el hecho de que uno de los emisores que se ha utilizado en esta tesis (SFH 4231 [90]), tiene un coeficiente de intensidad radiante con temperatura de $-0,5 \text{ \%}/\text{K}$. De manera que si ese emisor se alimenta con una corriente de polarización de 400mA, un error de 20mA equivale a una diferencia de temperatura de 10°C que es una variación asumible en entornos interiores.

En resumen, según las simulaciones que se han realizado, los errores en la estimación de la distancias mediante el método diferencial propuesto en el Capítulo 4 son una función lineal de los errores en la corriente de polarización de la baliza.

Para estas simulaciones se ha considerado que la variación puede ser de 20mA, que para el caso de un emisor en concreto representaría una variación de temperatura de 10°C y que es el caso extremo que se obtendrá en la realidad. Para esta situación, los errores en la estimación de distancias estarán por debajo de un 20 %.

No obstante, el problema fundamental no es cuánto puede variar la intensidad

radiante, sino cómo saber cuál es el valor real en cada momento en el que se requiera realizar la medida de la distancia entre la cámara y la baliza, de ahí la necesidad de desarrollo de una metodología que sea independiente de la corriente de polarización de la baliza, como más tarde se propondrá (Capítulo 7).

5.2.3. Error en la medida de distancias debido a variaciones en la energía relativa acumulada por la cámara.

En nuestra propuesta, se ha asumido que los errores en la medida de irradiancia producto del ruido y errores en el modelo pueden hacer que los valores de la energía acumulada por la cámara varíen un 10 % del valor real. Considerando este error, se ha simulado el comportamiento del modelo en la estimación de la distancia.

El valor máximo de un 10 % del valor real de la energía acumulada por la cámara se ha escogido fundamentalmente para incluir dentro de ese rango los errores implícitos en la medida de energía acumulada, que según se muestra en la Figura 3.6.2 pueden ser de un 2 % del valor medio en 30 imágenes.

Por otro lado, se asumen dentro del valor final de 10 % los errores en el ajuste del modelo de energía relativa. En concreto, el valor de 10 % es un valor que se ha asumido como error máximo en esta simulación y lo que se desea comprobar es qué errores en la medida de distancia implica tener un 10 % de error en la energía relativa acumulada por la cámara.

En la Figura 5.2.7 se muestra la relación entre el error en la estimación de la distancia en función del error en la energía relativa acumulada por la cámara, considerando diferentes distancias para una corriente de polarización en la baliza de 60mA y una diferencia de tiempos de exposición de 20ms.

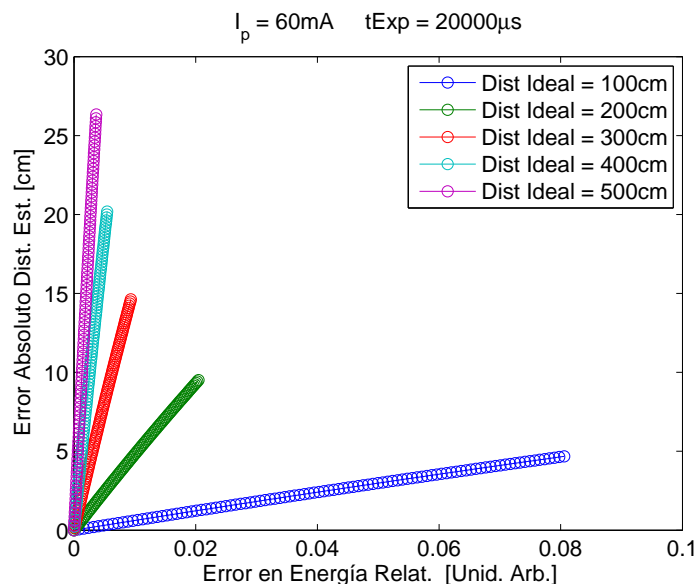


Figura 5.2.7: Comportamiento del error absoluto en la medida de distancias en función del error en la energía relativa acumulada por la cámara, para diferentes distancias y para un diferencia de tiempos de exposición y una corriente de polarización fija.

La Figura 5.2.7 se ha obtenido mediante una simulación que toma, en primer lugar,

5.3. Errores en la medida de distancia debido a variaciones en todos los parámetros.

el valor ideal para la energía acumulada en la distancia, la diferencia de tiempos de exposición y la corriente de polarización que se ha considerado, a este valor de energía acumulada se le suma una cantidad, que representa el error en energía acumulada, que va desde 0 hasta el 10 % del valor ideal antes obtenido.

A medida que aumenta la distancia, el comportamiento de la metodología se hace más susceptible a los errores en la energía acumulada por la cámara, por lo que aumenta el error en la estimación de distancias llegando a obtener errores de 26 cm a distancias de 500 cm, lo que representa un 5,2 % de error aproximadamente.

El comportamiento de la estimación de la distancia considerando errores de un 10 % en la medida de energía relativa acumulada por la cámara se muestra en la Figura 5.2.8 para una corriente de polarización de 74 mA, y un tiempo de exposición de 34ms.

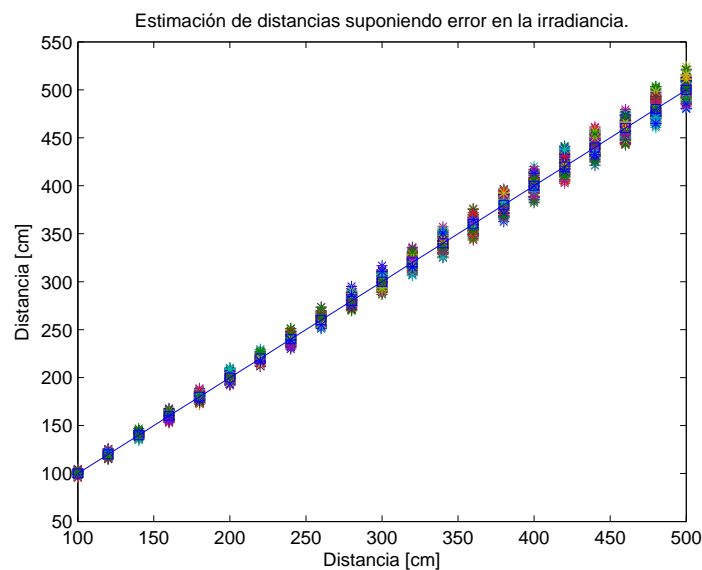


Figura 5.2.8: Comportamiento de la distancia estimada suponiendo errores en la medida de la energía relativa acumulada por la cámara de un 10 % del valor real.

Finalmente, puede plantearse que, atendiendo a las simulaciones que se han realizado del modelo de energía acumulada por la cámara, si a ésta última se le suponen de como máximo un 10 % del valor real, los errores en la distancia estimada serán menores de 6 %.

5.3. Errores en la medida de distancia debido a variaciones en todos los parámetros.

En este apartado se muestra el comportamiento de la estimación de la distancia asumiendo que existen errores en el tiempo de exposición de la cámara y por tanto en las diferencias de tiempos que se utilizan para realizar la medida, además, en la corriente de polarización de la baliza y en la medida de la energía acumulada por cámara.

En esta simulación, se desea obtener el error máximo que se espera en la estimación de distancias y para ello se asume que el error en las diferencias de tiempos de exposición

es de $20\mu s$ (error de tiempos que se obtendría con la cámara *Basler A622f*), un error en la corriente de polarización de 20 mA y un error en la medida de la energía acumulada por la cámara de un 10 % del valor real. En la Figura 5.3.1 se muestra la estimación de distancia, para 4 distancias, estimada a partir de una diferencia de tiempos de exposición de 10ms y una corriente de polarización de 70mA.

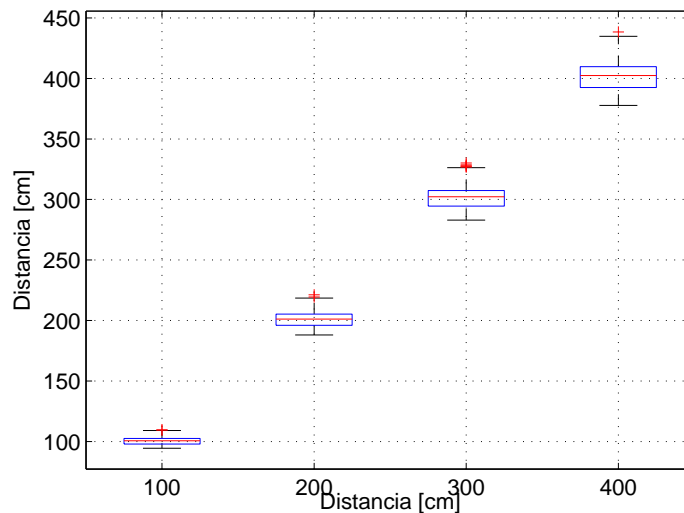


Figura 5.3.1: Comportamiento de la medida de la distancia para 4 distancias diferentes utilizando un $\Delta t = 10ms$ y una $I_0 = 70mA$ y asumiendo un error de diferencias de tiempos de exposición de $20\mu s$, de 20mA para la corriente de polarización de la baliza y de un 10 % del valor real para la energía acumulada por la cámara. Los cuadros azules representan los valores más probables de un 25 a un 75 % de probabilidad, las marcas negras representan los valores de distancias estimadas más alejadas del promedio (centro del cuadro) que no se consideran “outliers” y los puntos más alejados se representan individualmente.

Por otro lado, en esta simulación se han considerado 25 valores para el tiempo de exposición, 25 valores para las corrientes de polarización y 25 valores para la energía acumulada por la cámara, todos ellos aleatorios dentro del rango de variación que se ha considerado. Por cada valor de energía acumulada se ha calculado la distancia estimada. En total se han obtenido 625 estimaciones de distancia. Los 625 valores de la distancia estimada demuestran que el valor más probable está muy cercano al valor real de la distancia, como se muestra en la Figura 5.3.1. En ésta se representa además, el rango de distancias estimadas cuya probabilidad está entre un 25 y un 75 % (cuadros azules), y el rango de variación de los valores de distancias que no son considerados “outliers” (marcas negras), que es más amplio para la mayor distancia que se ha considerado en la simulación.

No obstante, para la última distancia, que representa el caso más crítico en esta simulación, los errores relativos en la medida de distancias respecto al valor real, se muestran en la Figura 5.3.2 y están por debajo de un 10 %.

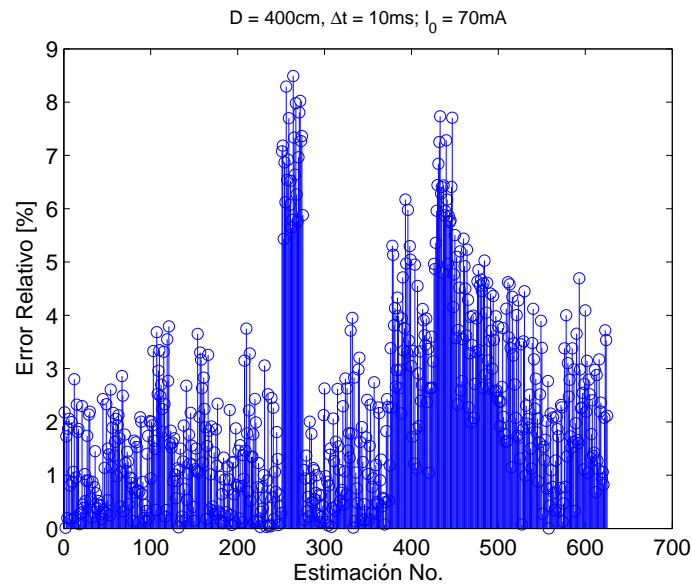


Figura 5.3.2: Error relativo en la estimación de distancia para $d = 400\text{cm}$, con $\Delta t = 10\text{ms}$, $I_0 = 70\text{mA}$. En este caso se asumió un error de $20\mu\text{s}$, 20mA para Δt e I_0 , respectivamente y de un 10 % del valor real, para la energía acumulada por la cámara.

5.4. Conclusiones.

En este capítulo se ha simulado el comportamiento del modelo para la medida de distancias, utilizando la metodología de diferencias de tiempos de exposición presentada en el Capítulo 4, frente a variaciones en sus parámetros debido al ruido o a los errores de medida.

La metodología de diferencias para la medida de distancias demostró que es susceptible a los errores en el tiempo de exposición, no obstante, en la mayoría de las cámaras la medida del tiempo de exposición tiene una precisión del orden de los microsegundos. En este caso se simuló el comportamiento del modelo suponiendo un error de $20\mu\text{s}$ y el error de distancias resultante está por debajo de 2,5 %.

De igual manera, se comprobó el error que se obtendría considerando errores en la medida de la corriente de polarización.

En las simulaciones se ha supuesto que las variaciones en la corriente de polarización tendrán un valor máximo de 20mA , y bajo esa suposición se ha simulado el error en la estimación de distancias obteniéndose errores cercanos al 16 %.

Como se ha planteado, éste error será más frecuente en la propuesta y además puede limitar la utilización de ésta metodología, no sólo por el hecho de que la corriente de polarización de la baliza puede variar, sino que debe ser conocida en cada momento antes de efectuar la medida. No obstante, más adelante se presenta una metodología que permite estimar la distancia de forma independiente a la corriente de polarización.

De la misma manera, se simuló la estimación de distancias considerando errores máximos de un 10 % del valor real de la energía relativa acumulada por la cámara, para simular el efecto del ruido en esta magnitud, conjuntamente con los errores en el ajuste del modelo. Para éstas condiciones las simulaciones realizadas demuestran que el error estará alrededor de un 5 %.

Finalmente, se consideró el error total, asumiendo que la medida de distancias está afectada por ruido en todas las magnitudes que intervienen en el modelo. En este caso se supuso que el rango de variación de la corriente es de 20mA, que las diferencias de tiempos tienen un error máximo de $20\mu s$ que la energía relativa acumulada por la cámara está afectada por un ruido de un 10% de su valor real. En estas situaciones, se simuló el comportamiento del error en la medida de la distancia y se obtuvo que en las condiciones simuladas el error está por debajo de un 10% del valor real.

Independientemente del comportamiento de la estimación de distancias que se presenta en este apartado, en todas las simulaciones se ha asumido que la cámara y la baliza están alineadas y enfrentadas, lo que representa un caso muy específico de lo que en la realidad puede suceder.

Realmente, la baliza puede ser vista desde un ángulo de observación diferente a cero grados y esto hace que la cámara reciba una cantidad de energía diferente a la que se espera por el efecto del patrón de radiación de la baliza.

En el siguiente capítulo se considerará el efecto del ángulo de orientación y el procedimiento para incluirlo en el modelo de la energía relativa acumulada por la cámara.

Capítulo 6

Efectos del patrón de radiación de la baliza

6.1. Introducción.

En el Capítulo 4 se define un modelo que utiliza únicamente los valores de gris y su correspondiente medida de la energía acumulada por la cámara para relacionarla con la distancia entre la cámara y la baliza de infrarrojos.

Sin embargo, el modelo propuesto se ha basado en la suposición de que la cámara y la baliza están alineadas una frente a la otra (coplanares).

En la realidad esta condición es muy poco probable. Un modelo más general debe considerar el efecto que la dirección de observación produce en la energía que proviene de la baliza. Esto sucede porque los emisores de luz no emiten la misma cantidad de energía en todas las direcciones, sino que están afectados por un patrón de radiación que pondera la cantidad de energía que se emite en función de la dirección de observación.

En el capítulo 3 se comprobó que el patrón de radiación de la baliza pondera la energía que emite mediante una función del ángulo θ y que la energía acumulada por la cámara puede modelarse a partir de una función lineal del patrón de radiación de la baliza. Por lo tanto, partiendo de este hecho, se introduce en el modelo propuesto en el capítulo 4 el efecto de la dependencia de la intensidad radiante con θ .

6.2. Reformulación del modelo para incluir el ángulo de orientación del emisor.

Asumiendo que entre la irradiancia relativa acumulada por la cámara y la función que caracteriza el patrón de radiación del emisor existe una relación lineal, el modelado de este parámetro es similar al procedimiento realizado para el tiempo de exposición, la corriente y el inverso de la distancia al cuadrado.

La expresión (4.3.2) representa la propuesta de modelo radiométrico, que relaciona la distancia, la intensidad radiante del emisor y el tiempo de exposición.

Sin embargo, se propone modificarla para incluir el efecto de la orientación del emisor respecto a la cámara. Dicha expresión quedaría:

$$E_{r,\theta} = \Upsilon(d^{-2})\Psi(I_0)\Gamma(t)G(\theta) \quad (6.2.1)$$

donde $G(\theta)$ es la función matemática que modela el patrón de radiación del emisor, y como se ha planteado en (4.3.2) Υ , Ψ y Γ las funciones que representan el comportamiento con la distancia (d), la intensidad radiante (I_0) y el tiempo de exposición (t), respectivamente.

Bajo la suposición de que existe una relación lineal entre E_r y $G(\theta)$, como se ha mostrado en la Figura 3.6.5, la función que caracteriza el efecto del patrón de radiación en la energía relativa acumulada por la cámara quedaría:

$$G(\theta) = \gamma_1 f(\theta) + \gamma_2 \quad (6.2.2)$$

siendo $f(\theta)$ la función que describe el patrón de radiación de la baliza.

Por lo tanto, $E_{r,\theta}$ resultaría:

$$E_{r,\theta} = \Upsilon(d^{-2})\Psi(I_0)\Gamma(t) [\gamma_1 f(\theta) + \gamma_2] \quad (6.2.3)$$

$$E_{r,\theta} = (\tau_1 t + \tau_2) \cdot (\rho_1 I_0 + \rho_2) \cdot \left(\delta_1 \frac{1}{d^2} + \delta_2 \right) (\gamma_1 f(\theta) + \gamma_2) \quad (6.2.4)$$

La expresión (6.2.4) es el planteamiento inicial del análisis. Después de resolver y eliminar los paréntesis la energía relativa acumulada por la cámara ($E_{r,\theta}$) quedaría:

$$E_{r,\theta} = \begin{cases} \kappa_1 \frac{I_0 t}{d^2} f(\theta) + \kappa_2 \frac{I_0}{d^2} f(\theta) + \kappa_3 \frac{t}{d^2} f(\theta) + \kappa_4 \frac{f(\theta)}{d^2} + \\ \kappa_5 I_0 t f(\theta) + \kappa_6 I_0 f(\theta) + \kappa_7 t f(\theta) + \kappa_8 f(\theta) + \\ \kappa_9 \frac{I_0 t}{d^2} + \kappa_{10} \frac{I_0}{d^2} + \kappa_{11} \frac{t}{d^2} + \kappa_{12} \frac{1}{d^2} + \kappa_{13} I_0 t + \kappa_{14} I_0 + \kappa_{15} t + \kappa_{16} \end{cases} \quad (6.2.5)$$

donde κ_i con $i = 1, \dots, 16$ son los parámetros del modelo.

La ecuación (6.2.5) es el modelo que se propone y en el que se incluye el efecto del ángulo de orientación del emisor a través de la función $f(\theta)$ que representa su patrón de radiación.

En la mayoría de los casos, el patrón de radiación es un dato que suministra el fabricante del emisor [88, 90, 89]. Por ejemplo, en la Figura 6.2.1 se muestra un ejemplo extraído de los datos que suministra el fabricante para el emisor SFH 4200 [88].

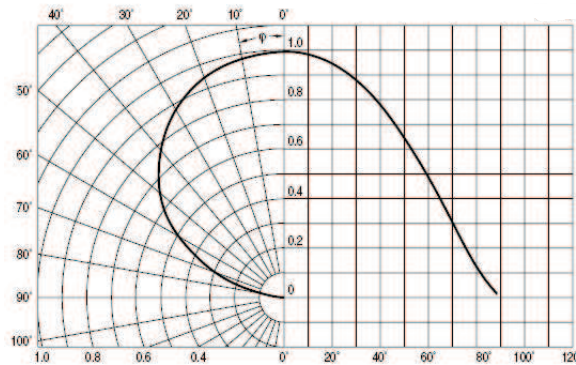


Figura 6.2.1: Características de radiación del emisor SFH4200 (ver referencia [88]).

6.2. Reformulación del modelo para incluir el ángulo de orientación del emisor.

Como puede verse en la expresión (6.2.5) una vez seleccionado la baliza, el fabricante facilita un gráfico con el comportamiento de la intensidad radiante según el ángulo de observación y esta gráfica debe ser convertida a una función matemática ($f(\theta)$) para posteriormente ser sustituida en la ecuación (6.2.5).

De forma general la función que caracteriza el patrón de radiación de una baliza cualquiera típicamente se modela a partir del coseno de θ . Esto es:

$$f(\theta) = \cos^n \theta \quad (6.2.6)$$

si $n = 1$ entonces la expresión (6.2.6) caracterizará a un emisor lambertiano. Cuando se analiza un patrón de radiación más directivo, n suele calcularse mediante la siguiente expresión:

$$n = \left| \frac{\log_{10}(1/2)}{\log_{10}(\cos \theta_{1/2})} \right| \quad (6.2.7)$$

donde $\theta_{1/2}$ es el ángulo donde la intensidad radiante cae un 50 % del valor a 0° y que puede verificarse en los datos que suministra el fabricante.

Por otro lado, en ocasiones resulta conveniente modelar el patrón de radiación a partir de una función gaussiana. Para este caso, $f(\theta)$ sería:

$$f(\theta) = e^{-\frac{(\theta-\theta_0)^2}{2\sigma^2}} \quad (6.2.8)$$

donde θ_0 es el ángulo central en que se obtiene la máxima intensidad radiante, en este caso 0 grados y σ la desviación estándar o ancho del patrón de radiación [81].

En nuestro análisis para este modelo, se prefirió usar la función gaussiana para caracterizar el patrón de radiación del emisor.

Una vez seleccionada la función $f(\theta)$ y sustituida en la expresión (6.2.5), es necesario utilizar algún procedimiento, que sea independiente del modelo radiométrico que se propone, para calcular el ángulo de orientación del emisor respecto a la cámara.

Este planteamiento surge porque la expresión (6.2.5) ha sido definida con el objetivo de estimar la distancia y que por cada imagen se obtendrá una única ecuación. Estimar conjuntamente la distancia y el ángulo de orientación implicaría resolver un problema de dos incógnitas con una única ecuación que se extrae de una imagen, de ahí la necesidad de estimar el ángulo de forma independiente del modelo radiométrico.

No obstante, más adelante se verá que es posible obtener otras variables que se extraen de las imágenes, con el objetivo de introducir más ecuaciones en el modelo y que permitirá realizar un proceso de optimización para calcular conjuntamente el ángulo de orientación y la distancia entre la cámara y la baliza.

6.2.1. Estimación del ángulo de orientación relativa del emisor respecto a la cámara.

Como se planteó en la sección anterior, el ángulo de orientación de la baliza ha de ser calculado a partir de una metodología externa al modelo radiométrico que se propone.

La estimación de la orientación de la baliza, sugiere la resolución de un problema de determinación de la *pose* para unas condiciones restringidas.

El cálculo de la pose de un robot o una cámara es un problema complejo y que demanda detectar numerosos puntos¹ de interés en el objeto para asegurar las suficientes restricciones matemáticas para su solución.

Para el caso de un emisor de infrarrojos, se hace prácticamente imposible detectar más de tres puntos característicos para la resolución del problema, debido a que las dimensiones de la imagen son muy pequeñas.

En este sentido, lo que se ha hecho es construir una baliza que está formada por el propio emisor y un difusor circular de 2,5cm de diámetro, con lo que se garantiza que en las imágenes se obtenga un círculo lo suficientemente grande y a partir de la proyección del círculo en la imagen, detectar la pose relativa respecto a la cámara.

En la Figura 6.2.2 se muestra la baliza utilizada en la propuesta compuesta por un emisor de infrarrojos y un difusor de 2.54 cm de diámetro. La baliza se ha construido de acero inoxidable para garantizar que los bordes del difusor se iluminen lo suficiente.

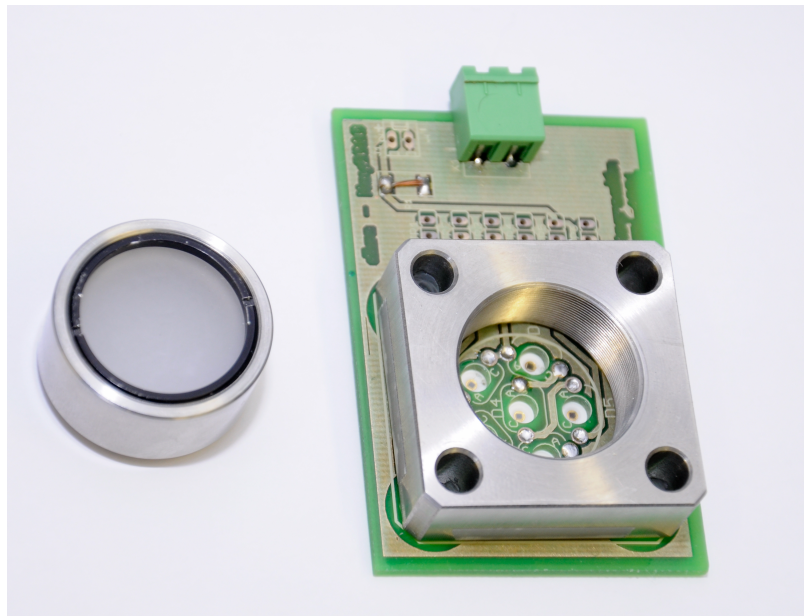


Figura 6.2.2: Modificación de la baliza.

Ángulos de orientación a partir de la elipse estimada.

En la estimación de la orientación de la baliza respecto a la cámara se ha utilizado el trabajo propuesto en [94], donde se propone una metodología para calcular los ángulos de la matriz de rotación de una cámara que captura imágenes de patrones circulares.

El método de estimación de los ángulos de orientación del emisor respecto a la cámara tiene una base geométrica que se basa en la proyección perspectiva de un

¹El cálculo de la pose implica calcular los tres ángulos que intervienen en la matriz de rotación y por tanto al menos tres marcas conocidas son necesarias para su solución.

círculo bajo diferentes orientaciones. La imagen resultante del círculo, normalmente es una elipse².

En dependencia de los parámetros de la elipse estimada, la referencia [94] demuestra que pueden calcularse los ángulos de *pan* y *tilt*.

En la expresión (6.2.9) se muestra la relación de los parámetros de la elipse (A , B y α) con los ángulos de *pan-tilt*, donde A y B representa el eje mayor y menor de la elipse, respectivamente. α la orientación del eje mayor respecto a la horizontal en la imagen.

$$\theta = \tan^{-1} \left(\cos \alpha \sqrt{\frac{A^2 - B^2}{B^2}} \right)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\sqrt{\frac{\sin^2 \alpha (A^2 - B^2)}{B^2 \sin^2 \alpha + A^2 \cos^2 \alpha}} \right)$$
(6.2.9)

En la referencia [94] se asume que, θ y ϕ son los ángulos de rotación respecto al eje X e Y, respectivamente y se supone que el eje Z coincide con el eje óptico de la cámara, como se muestra en la Figura 6.2.3.

Bajo las condiciones que se muestran en la Figura 6.2.3, la proyección de la baliza en la cámara será un círculo ($\theta = 0$ y $\phi = 0$).

Si los ángulos de rotación θ y ϕ se hacen diferente de cero, el eje óptico de la cámara no coincidirá en dirección con el Z (la dirección de observación es diferente a la dirección de emisión), entonces, para este caso en la imagen de la baliza se obtendrá una elipse.

La situación anterior representa el caso típico de cálculo del ángulo de orientación de la baliza respecto a la cámara y se facilita teniendo una baliza de forma circular.

Como se ha planteado anteriormente, la orientación relativa de la baliza afecta su intensidad radiante mediante la función del patrón de radiación y ese efecto se refleja en la energía acumulada por la cámara.

Por otro lado, la restricción de considerar un patrón de radiación que sea una figura en revolución implica que con uno de estos dos ángulos se puede modelar el efecto del patrón de radiación en la medida.

Segmentación y obtención de la elipse estimada.

Para el cálculo de la orientación de la baliza es necesario obtener el contorno de la elipse que forma la baliza en las imágenes; por lo tanto, es necesario segmentar la imagen de la baliza en cuestión y hacer un análisis de borde, y como resultado se obtendrán los puntos de contorno que integran la elipse.

Una vez que dispongamos de las coordenadas pixélicas de los puntos del contorno de la elipse (x_i, y_i) , con $i = 1, \dots, N$, se desea calcular los parámetros de la elipse que mejor se ajusta al contorno segmentado.

²Generalizando, siempre se obtendrá una elipse. Concretamente, en los casos donde la proyección sea un círculo, éste último puede verse como una elipse con sus correspondientes ejes iguales.

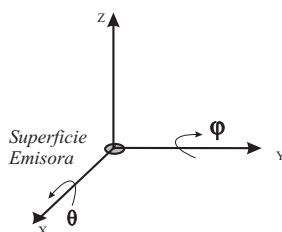
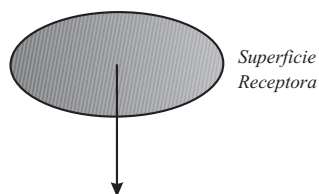


Figura 6.2.3: Representación para el cálculo de los ángulos de orientación de la baliza respecto a la cámara.

Una elipse puede expresarse a partir de la ecuación de una cónica:

$$e_1x^2 + 2e_2xy + e_3y^2 + 2e_4x + 2e_5y + e_6 = 0 \quad (6.2.10)$$

donde e_j con $j = 1, \dots, 6$ son los parámetros de la elipse que se desean calcular.

Por cada par de coordenadas (x_i, y_i) se sustituye en la ecuación (6.2.10) considerando que $e_1 = 1$, por tanto:

$$2e_2x_iy_i + e_3y_i^2 + 2e_4x_i + 2e_5y_i + e_6 = x_i^2 \quad (6.2.11)$$

que para $i = 1, \dots, M$ puntos de borde resultaría en un sistema de ecuaciones que matricialmente se puede escribir como:

$$\mathbf{M} \cdot \mathbf{e} = \mathbf{x} \quad (6.2.12)$$

donde las incógnitas son los e_j con $j = 1, \dots, 6$

$$\mathbf{M} = \begin{bmatrix} 2x_1y_1 & y_1^2 & 2x_1 & 2y_1 & 1 \\ 2x_2y_2 & y_2^2 & 2x_2 & 2y_2 & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 2x_Ny_N & y_N^2 & 2x_N & 2y_N & 1 \end{bmatrix} \quad (6.2.13)$$

$$\mathbf{e} = [e_2 \ e_3 \ e_4 \ e_5 \ e_6]^T \text{ con } e_1 = 1 \quad (6.2.14)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} -x_1^2 \\ -x_2^2 \\ \vdots \\ x_N^2 \end{bmatrix} \quad (6.2.15)$$

6.2. Reformulación del modelo para incluir el ángulo de orientación del emisor.

y finalmente: $\mathbf{e} = (\mathbf{M}^t \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^t \mathbf{x}$ donde $(\mathbf{M}^t \mathbf{M})^{-1} \mathbf{M}^t$ es la matriz pseudoinversa de \mathbf{M} .

Una vez calculados los parámetros e_j pueden obtenerse la longitud de los ejes mayor y menor (A y B), así como la inclinación del eje mayor respecto al eje horizontal en la imagen (ángulo α) y las coordenadas del centro de la elipse (x_0, y_0) .

$$h = e_2^2 - e_1 e_3 \quad (6.2.16)$$

$$x_0 = \frac{e_3 e_4 - e_2 e_5}{h}; \quad y_0 = \frac{e_1 e_5 - e_2 e_4}{h} \quad (6.2.17)$$

$$\alpha = 0,5 \cot^{-1} \left[\frac{e_3 - e_1}{2e_2} \right] \quad (6.2.18)$$

$$h_1 = 2(e_1 e_5^2 + e_3 e_4^2 + e_6 e_2^2 - 2e_2 e_4 e_5 - e_1 e_3 e_6) \quad (6.2.19)$$

$$h_2 = \sqrt{1 + \frac{4e_2^2}{(e_1 - e_3)^2}} \quad (6.2.20)$$

$$A = \sqrt{\frac{h_1}{h[(e_3 - e_1)h_2 - (e_3 + e_1)]}}; \quad B = \sqrt{\frac{h_1}{h[(e_1 - e_3)h_2 - (e_3 + e_1)]}} \quad (6.2.21)$$

Los valores de A , B y α se sustituyen en (6.2.9) y se obtienen los ángulos del *pan-tilt* de la baliza respecto a la cámara.

La obtención de la elipse estimada depende de la exactitud con que se detecten los puntos del contorno y por tanto, afectará el cálculo de los ángulos de orientación.

En el proceso de selección de los puntos de interés, en primer lugar se realiza un filtrado paso-bajo para reducir el ruido en la imagen y posteriormente, la imagen filtrada se normaliza.

Una vez normalizada se seleccionan los píxeles de la imagen normalizada cuyos valores de gris sea mayores que 0,15. En la Figura 6.2.4 se muestran los píxeles seleccionados que tienen un valor de gris superior al umbral aplicado.



Figura 6.2.4: Imágenes temporales del proceso de segmentación de los bordes de la baliza.

En ocasiones suelen aparecer algunos píxeles aislados que están fuera de la elipse y que no se eliminan mediante el umbral aplicado, como se muestra en la Figura 6.2.5.

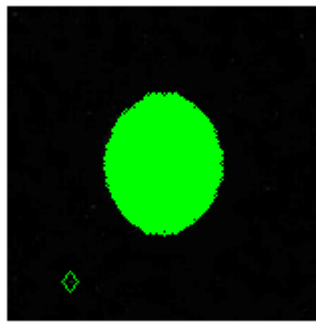


Figura 6.2.5: Píxeles seleccionados mediante el umbral utilizando imágenes reales captadas de la baliza.

Para discriminar esos píxeles aislados y decidir si pertenecen o no a la imagen de la baliza en la cámara se utiliza la distancia entre cada uno de los píxeles que cumplen con el umbral de amplitud y las coordenadas del centroide de la mancha.

Como el número de píxeles que se detectan fuera de la imagen de la baliza es muy pequeño, prácticamente no influirá en el cálculo del centroide.

Si se analizan los valores para la distancia entre el centroide y cada punto perteneciente a la mancha, se notará que los valores de distancias estarán desde 1 (píxeles al lado del centroide) hasta un valor máximo que se corresponde con la longitud del semieje mayor, y además, habrá algunos valores de distancias superiores que se corresponden con los puntos que no pertenecen a la mancha. Este hecho se muestra en la Figura 6.2.6.

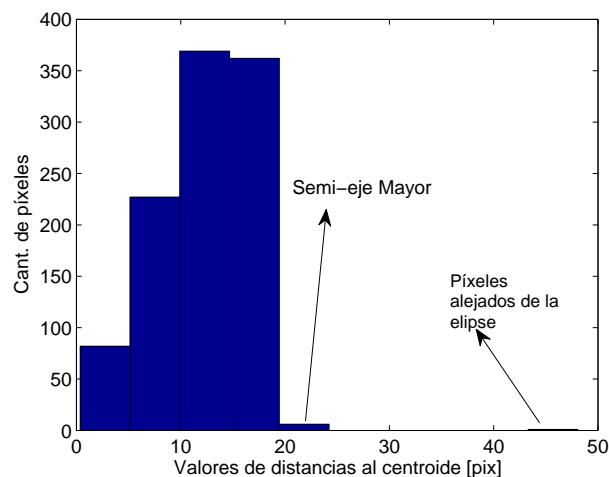


Figura 6.2.6: Histograma para los valores de la distancia entre el centroide de la mancha y cada píxel seleccionado por el umbral.

Los píxeles que estén fuera del borde y que no pertenecen a la elipse dan una distancia mayor. Para eliminarlos se estima el histograma de las distancias al centroide de la mancha y se detecta la distancia correspondiente al primer cero del histograma. Este valor de distancia se toma como umbral, y se seleccionan las coordenadas de los

píxeles cuya distancia sea menor que el umbral anterior.

Con este procedimiento se logra la selección de la mancha que produce la baliza en las imágenes.

Finalmente, de todas estas coordenadas solamente se usan para estimar la elipse aquellas que formen una región cerrada y que contiene a los demás píxeles.

En la Figura 6.2.7 se muestran imágenes de la baliza, en rojo están todos aquellos píxeles que pertenecen a la mancha, y en verde la elipse estimada. Además se muestran los resultados en la estimación de los ángulos de inclinación de la baliza respecto a la cámara usando la metodología propuesta en [94].

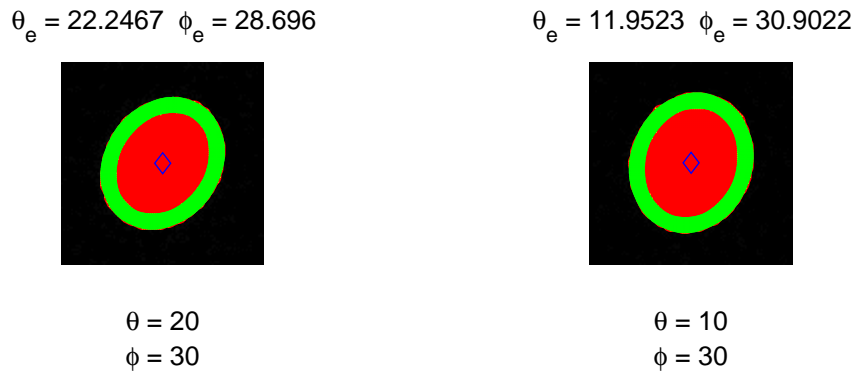


Figura 6.2.7: Imágenes representativas del proceso de cálculo del ángulo de orientación relativa del emisor.

La estimación del ángulo depende de la distancia. Para distancias mayores se obtendrán mayores errores en el cálculo de los ángulos de orientación, porque se reduce el tamaño de la imagen de la baliza y por tanto se reduce la cantidad de píxeles del borde. Por ejemplo, para una distancia de 3 m se obtienen alrededor de 50 puntos de borde, mientras que para distancias alrededor de 1,5 m se pueden utilizar más de 90 píxeles de borde en las imágenes reales de la baliza. No obstante, el tamaño de la baliza debe asegurar que a la mayor distancia de trabajo se tenga la cantidad suficiente de puntos para reconstruir la elipse y estimar los ángulos de orientación, y además que a la menor distancia de trabajo pueda asumirse que la baliza es una fuente puntual.

La cantidad mínima de puntos de borde para el cálculo de la elipse estimada queda definida por el número de ecuaciones requeridas para obtener los 6 coeficientes de la elipse.

Por otro lado, como se explicará más adelante, los valores de ángulos estimados por este método se usarán como valores iniciales para un proceso de optimización en el cálculo del ángulo y la distancia.

6.3. Comportamiento de E_r con el ángulo de orientación de la baliza.

Mediante la forma circular de la baliza, la elipse estimada y la expresión (6.2.9), puede obtenerse la orientación aproximada de la baliza respecto a la cámara y sustituirlo en la expresión (6.2.5).

Sin embargo, la utilización de un difusor no asegura que el patrón de radiación de la baliza sea igual al patrón de radiación del emisor, por lo que es necesario conocer la función $f(\theta)$ de la expresión (6.2.5) para la baliza modificada.

La forma clásica para caracterizar experimentalmente el patrón de radiación de un emisor es capturar medidas de la energía que emite para diferentes orientaciones respecto al sensor. En esta tesis se ha utilizado una metodología similar, en la que se desea caracterizar el efecto de la orientación de la baliza en la energía acumulada en la cámara.

Por lo tanto, se midió el comportamiento de E_r con diferentes ángulos de orientación de la baliza asumiendo que el patrón de radiación del emisor es una figura en revolución.

El comportamiento de $E_{r,\theta}$ con el ángulo de orientación de la baliza se muestra en la Figura 6.3.1.

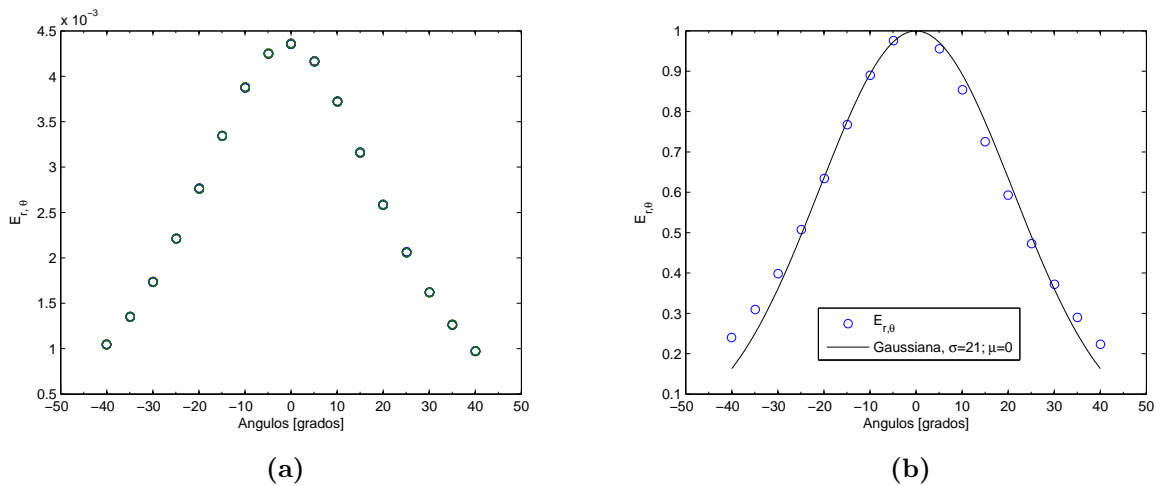


Figura 6.3.1: Energía relativa acumulada por la cámara en función del ángulo de inclinación de la baliza. La gráfica fue generada a partir de 30 imágenes por cada punto, a una distancia de 1.5m, con un tiempo de exposición de 32ms y una corriente de polarización de 475 mA. La baliza contiene el diodo SFH 4231 [90]. 6.3.1a $E_{r,\theta}$ medido. 6.3.1b $E_{r,\theta}$ medido y la función gaussiana usada en su aproximación.

El comportamiento de $E_{r,\theta}$ con el ángulo de orientación de la baliza, cuyos resultados se muestran en la Figura 6.3.1 consistió en capturar imágenes para diferentes orientaciones de la fuente. Para cada imagen se calcula la energía relativa acumulada por la cámara.

Concretamente, en la Figura 6.3.1a se tomaron 30 imágenes en cada orientación. Por otro lado, en la Figura 6.3.1b se asume que el efecto del ángulo de orientación en $E_{r,\theta}$ se puede modelar a partir de una función gaussiana (expresión (6.2.8)) con $\theta_0 = 0$, con dispersión $\sigma = 21$ grados. Esto es:

$$f(\theta) = e^{-\frac{\theta^2}{2(21)^2}} \quad (6.3.1)$$

donde $f(\theta)$ es la función que se propone para caracterizar el efecto del ángulo de orientación de la baliza en la energía relativa acumulada por la cámara.

6.3. Comportamiento de E_r con el ángulo de orientación de la baliza.

En la práctica, para lograr una mayor precisión en el comportamiento de $E_{r,\theta}$ con el patrón de radiación de la baliza, la dispersión σ se introduce como una incógnita más en el proceso de calibración, tomando como valor inicial $\sigma_0 = 21$.

Para calibrar el modelo propuesto en la expresión (6.2.5), asumiendo que $f(\theta)$ es una función gaussiana, se capturan imágenes a diferentes distancias, con diferentes tiempos de exposición, con diferentes corrientes y diferentes ángulos de orientación de la baliza respecto a la cámara. Evidentemente, estas condiciones deben medirse con precisión para asegurar la exactitud en el ajuste de los parámetros.

Para cada imagen se calcula la irradiancia relativa acumulada por la cámara usando la expresión (3.6.7).

El ajuste de los parámetros del modelo se plantea matemáticamente como:

$$\Theta(\mathbf{k}) = \sum_{j=1}^M [E_{r,\theta}^{Medido} - E_{r,\theta}^{modelado}(\mathbf{x}, \mathbf{k})]^2 \quad (6.3.2)$$

donde $\mathbf{k} = [\kappa_1, \kappa_2, \dots, \kappa_{16}, \sigma]$ el vector de las incógnitas del modelo y \mathbf{x} el vector de los datos que contiene el valor de la corriente de polarización en cada imagen, el tiempo de exposición, el ángulo de orientación de la baliza y la distancia entre la cámara y la baliza, $E_{r,\theta}^{modelado}$ se define en la ecuación (6.2.5), Θ es la función objetivo que se desea minimizar y representa la suma del error cuadrático.

El proceso de optimización se realiza por el método de Levenberg-Marquardt y como condición de partida para la optimización se han considerado los κ_i con $i = 1, \dots, 16$ igual a 1 y $\sigma = 21$.

Los resultados del proceso de optimización se muestran en la Figura 6.3.2.

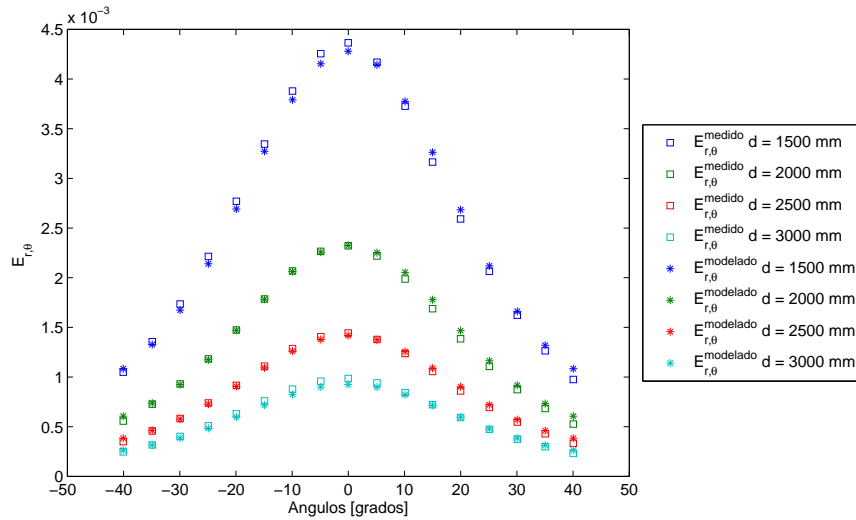


Figura 6.3.2: Comportamiento de la irradiancia relativa acumulada por la cámara y su correspondiente modelo para diferentes distancias con una corriente de polarización de 475 mA y un tiempo de exposición de 32ms.

La Figura 6.3.2 muestra la irradiancia relativa acumulada por la cámara medida en las imágenes y su correspondiente valor modelado, como una función del ángulo de orientación de la baliza, para diferentes distancias entre la cámara y la baliza.

El ajuste de los parámetros del modelo, en este caso, da como resultados unos errores entre los valores medidos y los valores teóricos que están alrededor de un 4 %.

6.3.1. Errores en la estimación de distancias en función del error en el ángulo de orientación del emisor.

El ángulo de orientación de la baliza respecto a la cámara afecta la cantidad de energía que recibe la cámara mediante la función que caracteriza su patrón de radiación, de manera que los errores en la estimación de la orientación se pueden interpretar como errores en los valores de la intensidad radiante de la baliza y éstos a su vez se traducirán en errores en la estimación de la distancia.

En primer lugar, para evitar este efecto, se necesita una precisión mayor en el método de detección de los puntos de la elipse lo que permitirá obtener mayor precisión en el cálculo de los ángulos de orientación.

No obstante, más adelante se propone reducir el efecto de la estimación del ángulo mediante el método de la elipse estimada, a través de un proceso de optimización.

En la Figura 6.3.3 se muestra como sería el comportamiento del error en la medida de distancia que se produciría si el error en el ángulo de orientación del patrón varía linealmente entre -5 y 5 grados.

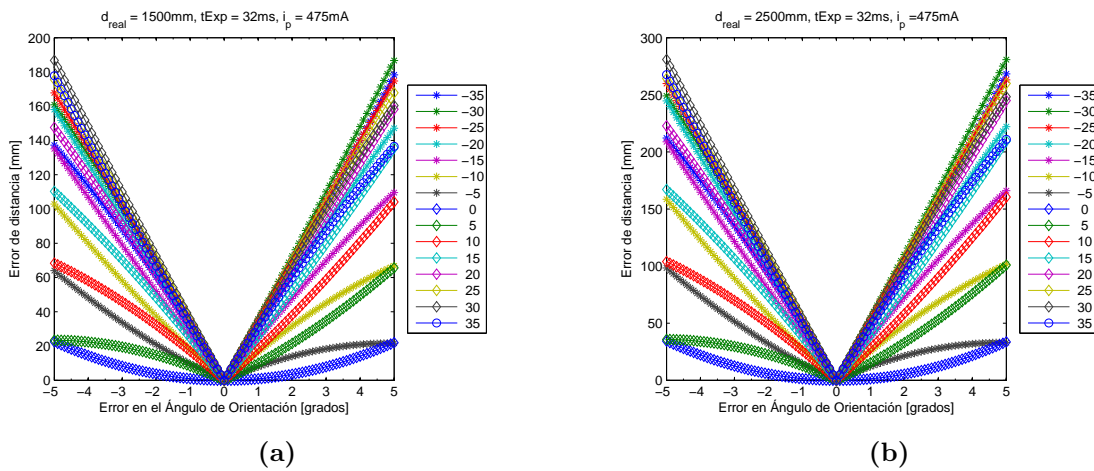


Figura 6.3.3: Simulación del comportamiento del error en la estimación de distancias en función del error en el ángulo de orientación de la baliza. 6.3.3a Distancia real 1500 mm. 6.3.3b Distancia real 2500 mm.

El cálculo del error en la estimación de la distancia como una función del error en la estimación del ángulo se ha simulado para dos distancias diferentes y usando los parámetros del modelo calculados por el método de calibración descrito en la sección anterior. Estas simulaciones es una muestra representativa de cómo variará el error en el cálculo de la distancia como una función del error en la estimación del ángulo por el método de la elipse estimada.

Para generar la Figura 6.3.3 se consideró que la corriente de polarización de la baliza es de 475mA y se utilizó un tiempo de exposición de 32ms.

6.4. Conclusiones.

Este capítulo ha presentado la metodología seguida para incluir el ángulo de inclinación de la baliza en el modelo de irradiancia acumulada propuesto en el Capítulo 4.

Para ello se ha modificado la forma de la baliza para asegurar la proyección de una superficie circular en las imágenes, y por medio de la elipse estimada, calcular el ángulo de orientación que tiene la baliza respecto a la cámara.

El proceso de modelado de la irradiancia relativa acumulada por la cámara en función del ángulo de orientación de la baliza se ha basado en medidas prácticas del comportamiento de E_r con dicho ángulo. Como resultados de estas medidas se asumió que la función que describe el patrón de la baliza puede ser aproximada mediante una función gaussiana con media cero y desviación estándar alrededor de 20 grados.

La función gaussiana que se ha utilizado para modelar el efecto del patrón de radiación en la energía acumulada por la cámara se mantendrá siendo una función gaussiana [81] lo que cambiaría sería el valor de la desviación estándar.

No obstante, se ha desarrollado una metodología de calibración del modelo, que engloba un proceso de optimización en el que se calcula los parámetros del modelo incluyendo la desviación estándar de la función gaussiana propuesta para el patrón de radiación.

Los resultados expuestos en este capítulo son más bien ilustrativos, incluso no se validó el comportamiento en experimentos de medidas de distancias, porque todavía se mantiene la dependencia de la intensidad radiante a través de la corriente de polarización del emisor, y por consiguiente, mantendrá las variaciones con la temperatura.

Este capítulo es un paso intermedio en la formulación de la propuesta final, la cual incluye el ángulo de orientación y donde se disminuye la dependencia con la intensidad radiante de la baliza.

Capítulo 7

Propuesta de independización de la intensidad radiante del emisor

7.1. Introducción.

Hasta el momento se ha propuesto una metodología para estimar la distancia entre una cámara y una baliza circular de infrarrojo que está alimentada con una corriente de polarización constante y conocida con anterioridad.

Como se ha planteado anteriormente, la corriente de polarización de la baliza, y por consiguiente la intensidad radiante de la fuente, puede variar por temperatura. De modo que no se garantizaría la estabilidad de la medida de distancias.

Una de las primeras ideas que se valoraron consistía en estimar conjuntamente la distancia y la intensidad radiante de la baliza. Sin embargo, el cálculo conjunto de la distancia y la intensidad radiante, daría infinitas soluciones, porque el problema carece de suficientes restricciones matemáticas. Esto quiere decir que hasta el momento se tiene una ecuación por cada imagen, y si se desean obtener dos incógnitas se trabajaría con un sistema indeterminado.

La solución ideal para obtener la distancia y la intensidad radiante es aumentar el número de ecuaciones dentro del modelo, de ahí que el objetivo fundamental que se desea alcanzar en este capítulo y sobre todo en esta tesis, es intentar incluir más ecuaciones dentro de la propuesta tal que se pueda eliminar la dependencia con la intensidad radiante.

En esta propuesta, un aporte excelente consistiría en poder calcular la distancia entre la cámara y la baliza sin el previo conocimiento de su intensidad radiante o partiendo de un valor aleatorio para la corriente de polarización del emisor.

El sobredimensionamiento de las ecuaciones del modelo que se propone en este capítulo se basa en la búsqueda de nuevas variables que se extraen de las imágenes y que se relacionen con las mismas magnitudes que influyen en la formación de la imagen de la baliza en la cámara.

Propuestas de nuevas ecuaciones para integrar en el modelo.

En el caso del sistema cámara-baliza de infrarrojos, existen otros métodos que se podrían usar para extraer información de la distancia y complementar el modelo de energía relativa acumulada por la cámara para aumentar el número de ecuaciones que se tienen por cada imagen que se capture.

Dos de estos métodos pueden ser: el tamaño o área iluminada en las imágenes y la información del enfoque/desenfoque en los bordes de la imagen de la baliza. Estos dos indicadores darían directamente una relación con la distancia y el ángulo de orientación, con independencia del tiempo de exposición en la cámara y la intensidad radiante.

Sin embargo, desde nuestro criterio, estos indicadores tienen una base geométrica y constituyen una especie de triangulación. En este sentido, se ha preferido usar únicamente la información de los valores de gris de las imágenes de la baliza y su relación con las magnitudes que se involucran en el modelo de $E_{r,\theta}$.

No obstante, es cierto que se obtendrían mejores resultados en la estimación de distancias entre la cámara y la baliza si se incluyeran la mayor cantidad de parámetros y ecuaciones dentro del modelo. Este hecho no se descarta en un futuro, pero en esta tesis, se ha decidido demostrar que usando un punto de vista energético (modelo radiométrico), pueden obtenerse estimaciones de distancias con precisión aceptable que puedan usarse en algoritmos de posicionamiento 3D y otras aplicaciones.

Usando únicamente la información de los valores de gris de los píxeles, se han comprobado dos indicadores que se pueden incluir como ecuaciones en la propuesta de medida de distancias. Éstos son: la componente continua de la FFT de las imágenes de la baliza y la desviación estándar de la distribución de valores de gris que provoca la energía emitida por el emisor.

7.2. Componente de continua de la FFT de las imágenes.

Para el sistema cámara/baliza, los cambios en las condiciones de iluminación debido a la intensidad radiante y la orientación de la baliza, la distancia que la separa de la cámara, y el tiempo de exposición, pueden relacionarse en una expresión que define la energía relativa acumulada por la cámara. Pero a su vez, los cambios en estas magnitudes afectan los niveles de gris en las imágenes, o lo que es lo mismo la distribución de valores de gris en la imagen, y por consiguiente su contenido espectral. Este último puede obtenerse a partir de la FFT de las imágenes.

Es decir, que a partir de los cambios en la FFT de las imágenes del emisor, sería posible obtener una relación con las mismas magnitudes que afectan la energía relativa acumulada por la cámara.

En este caso, se propone el uso de la componente continua de la FFT (frecuencia cero en la FFT) como indicador práctico que se extrae de las imágenes.

En la Figura 7.2.1a se muestra una de las imágenes de entrada utilizada para este análisis. Además, en la Figura 7.2.1b se muestra el espectro de amplitud que resulta de la FFT de la imagen anterior. De estos espectros de amplitud solamente se extrae el valor de la componente de continua ($|F(0,0)|$ siendo F la FFT de las imágenes) para relacionarla posteriormente con las magnitudes que afectan la energía relativa acumulada por la cámara.

A continuación se describen los comportamientos de dicho parámetro con el tiempo de exposición en la cámara, la intensidad radiante de la baliza, la distancia entre la cámara y la baliza, y la orientación relativa de ésta última respecto a la cámara [95].

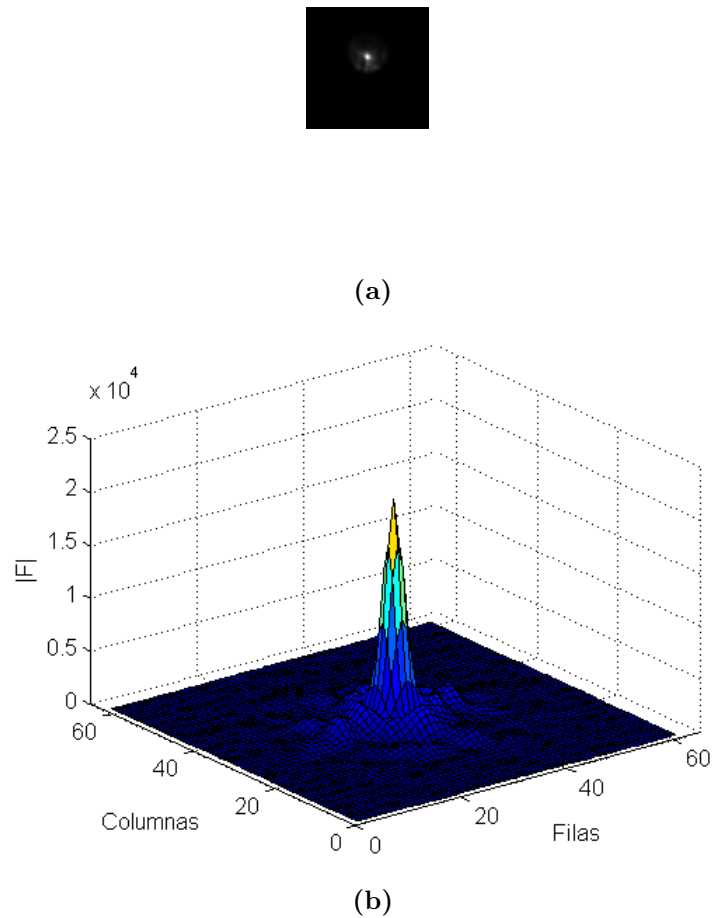


Figura 7.2.1: Imagen de entrada y su espectro de amplitud.

7.2.1. Comportamiento de la componente de continua de la FFT de las imágenes con la intensidad radiante del emisor.

El procedimiento de modelado de esta nueva variable está basado en medidas experimentales de cada uno de los comportamientos con cada magnitud, tal como se hizo para el modelado de la energía relativa acumulada por la cámara en el Capítulo 4.

Para este comportamiento individual, se situó el emisor a una distancia fija de la cámara, fijando también el tiempo de exposición y suponiendo que el emisor y la baliza están alineados. Bajo estas condiciones se varió la corriente de polarización del emisor, lo que representa una variación en la intensidad radiante de la fuente.

Para cada una de las corrientes consideradas, se capturó una imagen y se calculó el valor de la componente continua de la FFT de la imagen. En la Figura 7.2.2 se muestra el comportamiento de $|F(0,0)|$ como una función de la corriente de polarización, para diferentes tiempos de exposición.

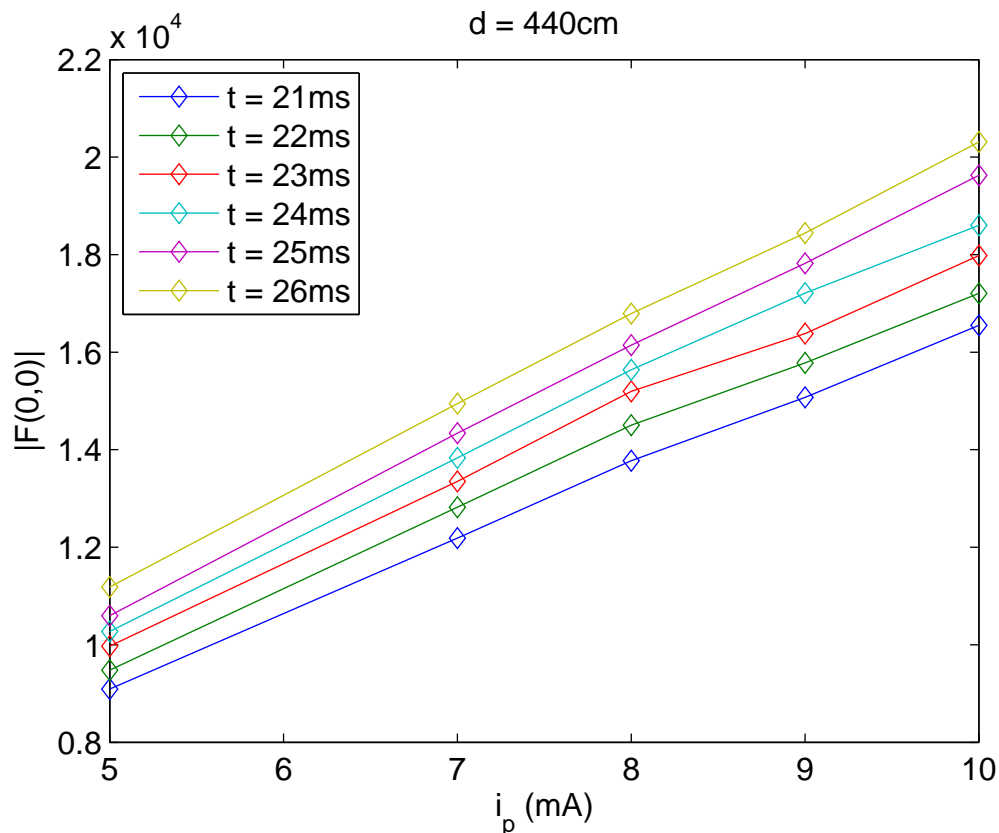


Figura 7.2.2: Comportamiento de la componente continua de la FFT de las imágenes del emisor con la corriente de polarización de la baliza para los tiempos 21, 22, 23, 24, 25 y 26 ms con una distancia de 440cm.

De modo que, para este comportamiento individual, se puede definir una función $f_1(I_0)$, tal que:

$$|F(0,0)| = f_1(I_0) \quad (7.2.1)$$

y en la que se asume un comportamiento lineal, por tanto:

$$f_1(I_0) = \rho'_F I_0 + \rho''_F \quad (7.2.2)$$

7.2.2. Comportamiento de la componente de continua de la FFT de las imágenes con el tiempo de exposición en la cámara.

Bajo condiciones similares a las descritas en la sección anterior, se capturaron imágenes con diferentes tiempos de exposición. Para ello se fija la distancia entre la cámara y la baliza, así como la corriente de polarización del emisor. Se considera que la baliza y la cámara están alineadas.

En la Figura 7.2.3 se representa la componente de continua del espectro de las imágenes captadas en función del tiempo de exposición en la cámara.

De forma similar al comportamiento medido en la energía relativa acumulada por la cámara, el comportamiento individual de la componente de continua de la FFT con el tiempo de exposición se asume lineal, por lo que:

$$|F(0,0)| = \tau'_F t + \tau''_F \quad (7.2.3)$$

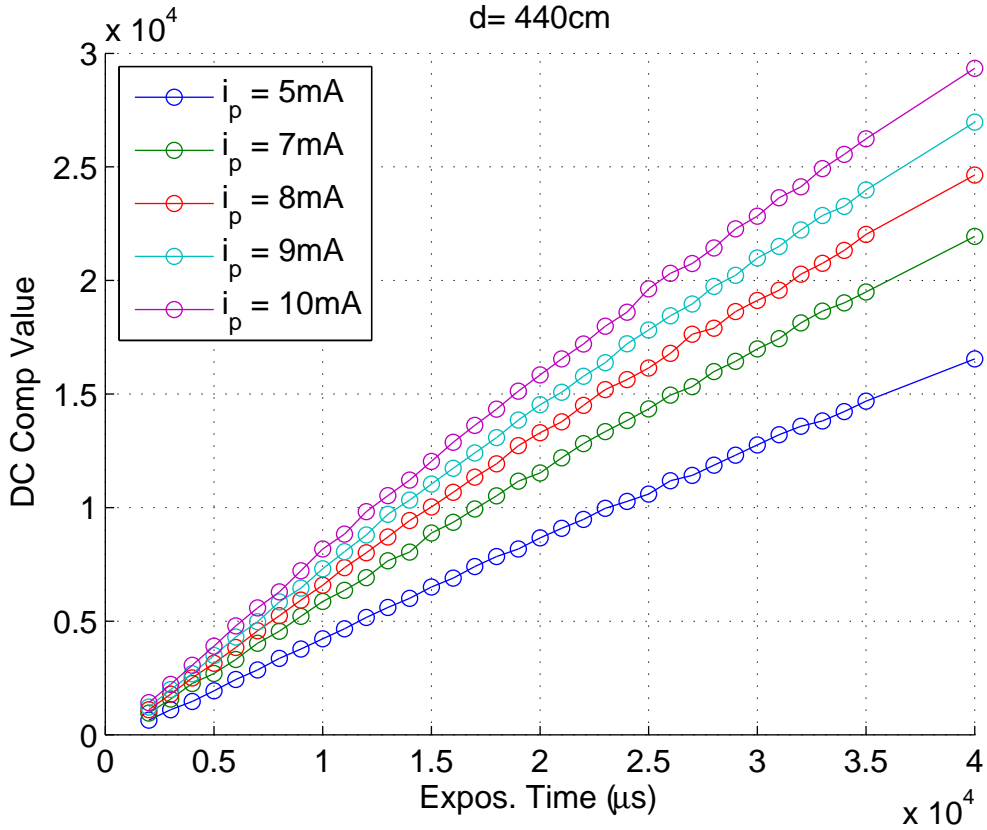


Figura 7.2.3: Componente continua de la FFT de las imágenes en función del tiempo de exposición en la cámara para las corrientes de polarización 5, 7, 8, 9, y 10mA y una distancia de 440cm.

7.2.3. Comportamiento de la componente de continua de la FFT de las imágenes con la distancia entre la cámara y la baliza.

Para esta caracterización se fijan el tiempo de exposición y la corriente de polarización de la baliza. Se asume que la cámara y el emisor están alineados y se capturan imágenes con diferentes distancias entre la cámara y la baliza, ver Figura 7.2.4.

En este caso, se asume que: $|F(0,0)|$ es una función lineal del inverso de la distancia al cuadrado entre la cámara y la baliza, por tanto:

$$|F(0,0)| = \delta'_F d^{-2} + \delta''_F \quad (7.2.4)$$

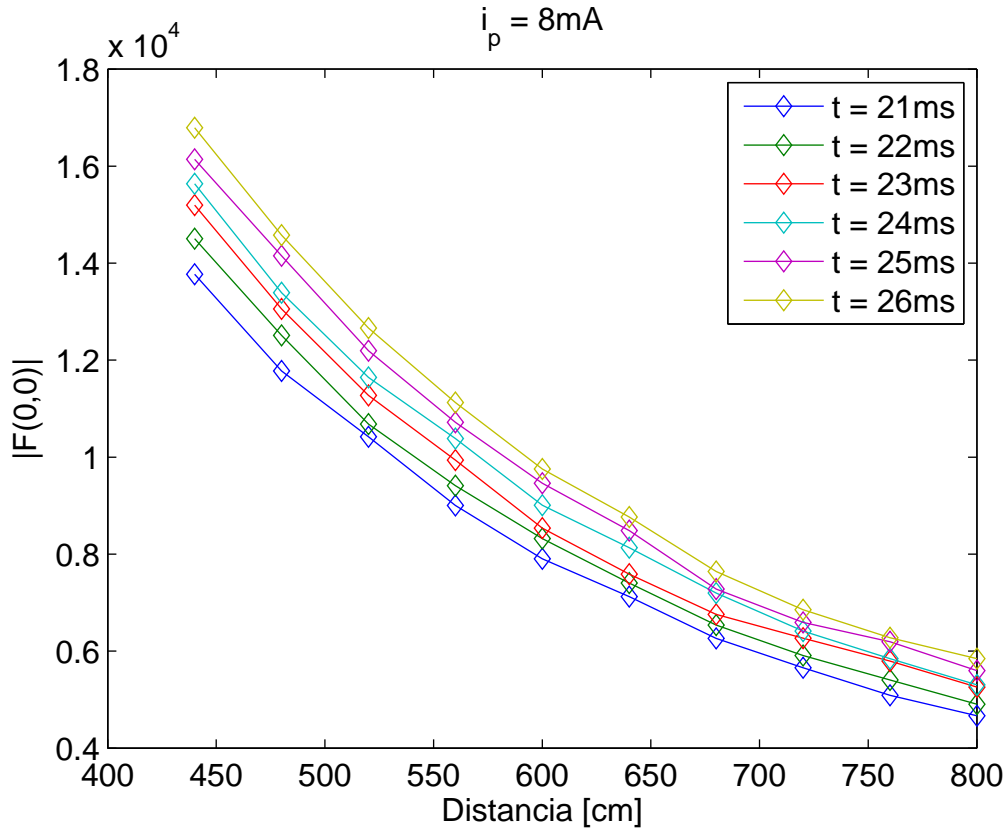


Figura 7.2.4: Comportamiento de la componente continua del espectro con la distancia cámara-baliza para una corriente de 8mA y unos tiempos desde 21 a 26ms.

7.2.4. Propuesta de modelo a partir de la componente continua de las FFT de las imágenes del emisor.

Igualmente a cómo se procedió en el Capítulo 4, los comportamientos de la componente de continua de la FFT de las imágenes, asumiendo que la cámara y el emisor están alineados, pueden escribirse como:

$$|F(0,0)| = f_1(I_0)f_2(t)f_3(d^{-2}) \quad (7.2.5)$$

donde: $f_1(I_0) = \rho'_F I_0 + \rho''_F$, $f_2(t) = \tau'_F t + \tau''_F$ y $f_3(d^{-2}) = \delta'_F d^{-2} + \delta''_F$, respectivamente.

Sustituyendo cada comportamiento en la expresión (7.2.5) quedaría:

$$|F(0,0)| = (\rho'_F I_0 + \rho''_F) (\tau'_F t + \tau''_F) (\delta'_F d^{-2} + \delta''_F) \quad (7.2.6)$$

y que al eliminar los paréntesis se obtiene una expresión muy similar a la expresión (4.3.4):

$$|F(0,0)| = \beta_1 \frac{I_0 t}{d^2} + \beta_2 \frac{I_0}{d^2} + \beta_3 \frac{t}{d^2} + \beta_4 \frac{1}{d^2} + \beta_5 I_0 t + \beta_6 I_0 + \beta_7 t + \beta_8 \quad (7.2.7)$$

donde β_i con $i = 1, \dots, 8$ son los parámetros del modelo.

La expresión (7.2.7) constituiría otra alternativa, al igual que la ecuación (4.3.4) que relaciona una variable que se extrae de las imágenes, con las magnitudes que intervienen en la formación de imágenes de la baliza en la cámara, y concretamente la distancia, de manera que se aporta una nueva ecuación para la estimación de la distancia entre la cámara y la baliza.

Por lo tanto, la expresión (7.2.7) después de un mecanismo de calibración para obtener los valores de los parámetros β_i , puede ser usada en la estimación de la distancia entre la cámara y un emisor de infrarrojos, bajo la condición de que la cámara y el emisor están alineados [95].

Para la calibración de esta alternativa se utilizó una secuencias de 220 imágenes que se captaron considerando 4 distancias. Por cada una de las distancias se utilizaron 5 corrientes de polarización y por cada distancia y cada corriente se captaron 11 imágenes con diferentes tiempos de exposición. Por cada imagen se plantea la siguiente ecuación de error:

$$\epsilon = \left[|F(0,0)| - \left(\beta_1 \frac{I_0 t}{d^2} + \beta_2 \frac{I_0}{d^2} + \beta_3 \frac{t}{d^2} + \beta_4 \frac{1}{d^2} + \beta_5 I_0 t + \beta_6 I_0 + \beta_7 t + \beta_8 \right) \right] \quad (7.2.8)$$

que matricialmente se escribe como: $\mathbf{H} \cdot \mathbf{K} = \mathbf{F}$, \mathbf{F} es el vector que contiene la componente de continua de la FFT de cada una de las imágenes captadas para la calibración, $\mathbf{K} = [\beta_1, \dots, \beta_8]^t$ y \mathbf{H} es la matriz que contiene los valores de las magnitudes I_0 , t y d , respectivamente. Los parámetros del modelos \mathbf{K} se obtienen mediante la matriz pseudoinversa de \mathbf{H}^+ : $\mathbf{K} = \mathbf{H}^+ \mathbf{F}$ con $\mathbf{H}^+ = (\mathbf{H} \cdot \mathbf{H}^t)^{-1} \mathbf{H}^t$.

Una vez calculados los parámetros del modelo, se desarrolló una metodología diferencial para el cálculo de la distancia entre la cámara y la baliza, similar a la propuesta en el Capítulo 4 (ecuación (4.3.7)) y que para el caso de la $|F(0,0)|$ quedaría:

$$|F(0,0)|_j - |F(0,0)|_r = \beta_1 \frac{I_0}{d^2} (t_j - t_r) + \beta_3 \frac{(t_j - t_r)}{d^2} + \beta_5 I_0 (t_j - t_r) + \beta_7 (t_j - t_r) \quad (7.2.9)$$

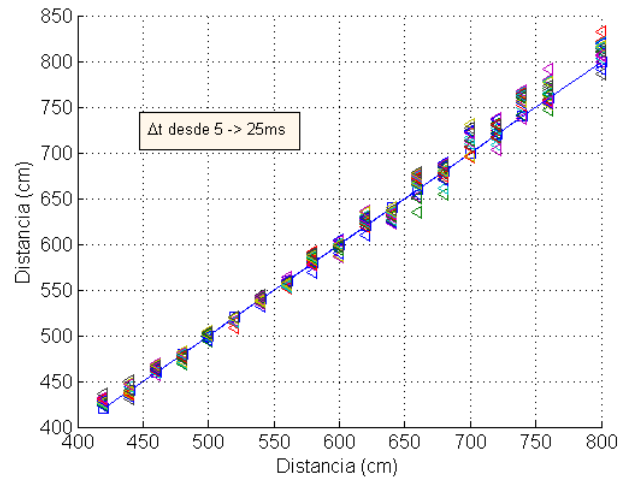
siendo $|F(0,0)|_j$ la componente de continua de la FFT de la imagen j captada con el tiempo de exposición t_j , t_r el tiempo de exposición usado como referencia para el cálculo de las diferencias y $|F(0,0)|_r$ el correspondiente valor para la componente de continua de la FFT de la imagen de referencia.

A partir de (7.2.9) puede extraerse la distancia, por tanto:

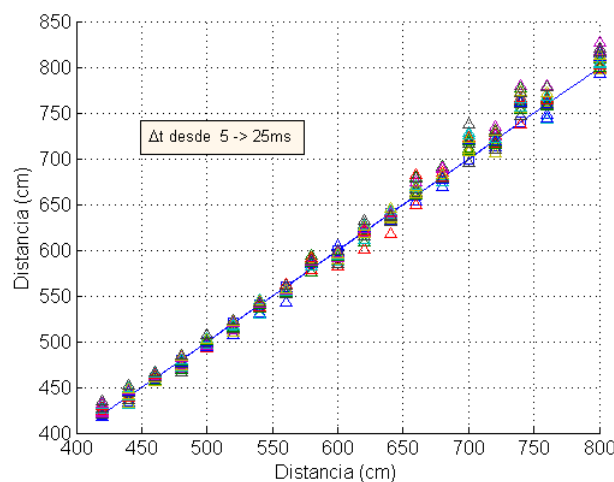
$$d_j = \sqrt{\frac{\beta_1 I_0 (t_j - t_r) + \beta_3 (t_j - t_r)}{|F(0,0)|_j - |F(0,0)|_r - \beta_5 I_0 (t_j - t_r) - \beta_7 (t_j - t_r)}} \quad (7.2.10)$$

Los resultados experimentales del uso de este indicador en la estimación de la distancia entre una cámara y un emisor de infrarrojos alineado con la cámara se muestran en las Tablas 8.3.1, 8.3.2, respectivamente, no obstante en las Figuras 7.2.5a y 7.2.5b

se muestran los resultados intermedios de la estimación de distancias usando el método diferencial a través de la componente continua de la FFT de las imágenes del emisor, bajo el supuesto de que la cámara y el emisor están alineados.



(a) $I_0 = 9\text{mA}$



(b) $I_0 = 10\text{mA}$

Figura 7.2.5: Resultados de la medida de distancias usando la componente de continua de las FFT de las imágenes del emisor. La recta con cuadros azules representa las distancias reales consideradas en el experimento. Los triángulos se corresponden con la distancia estimada para cada diferencia de tiempos de exposición.

7.3. Consideración del ángulo de orientación de la baliza en el modelo para $|F(0, 0)|$.

La expresión (7.2.7) es otra alternativa de modelo radiométrico de formación de imágenes en una cámara, para el sistema cámara/emisor.

Al igual que su homóloga, la expresión (4.3.4), es válida sólo cuando la cámara está alineada con el emisor. Es decir, no se incluye el efecto del patrón de radiación del emisor en el modelo.

7.3. Consideración del ángulo de orientación de la baliza en el modelo para $|F(0,0)|$.

Para considerar el patrón de radiación del emisor dentro del modelo de la componente continua de las FFT de las imágenes se realizó una metodología idéntica a la descrita en el Capítulo 6 para la energía acumulada por la cámara.

Es decir, se midió el comportamiento de $|F(0,0)|$ para diferentes orientaciones del emisor, se asumió, al igual que en el Capítulo 6, que el patrón de los emisores que se usan es una figura en revolución, y a partir de los resultados del comportamiento se agregó una función $f_4(\theta)$ en la expresión (7.2.5).

Por otro lado, el gráfico de $|F(0,0)|$ en función de los ángulos de orientación, da una curva muy similar a la mostrada en la Figura 6.3.1a, de manera que se asume que el comportamiento de $|F(0,0)|$ con el ángulo de orientación se aproximará a través de una función lineal del patrón de radiación ($f(\theta)$ en el Capítulo 6). Por lo tanto: $f_4(\theta) = \gamma'_F f(\theta) + \gamma''_F$.

Por la similitud entre las expresiones (4.3.4) y (7.2.7), además la similitud en los comportamientos con el ángulo de orientación del emisor, se ha supuesto también que $f(\theta) = e^{-\frac{(\theta-\theta_0)^2}{2\sigma^2}}$ con $\theta_0 = 0$ y $\sigma = 21$ grados.

La suposición de que el comportamiento de la $|F(0,0)|$ con la función gaussiana que caracteriza el patrón de radiación, suponiendo que $\sigma = 21$ grados no está muy alejada de la realidad, como se muestra en la Figura 7.3.1. No obstante, como se verá en lo adelante, este valor es una estimación inicial para σ , ya que posteriormente se realiza un proceso de optimización para obtener el valor que minimiza los errores entre las $|F(0,0)|$ medidas y teóricas.

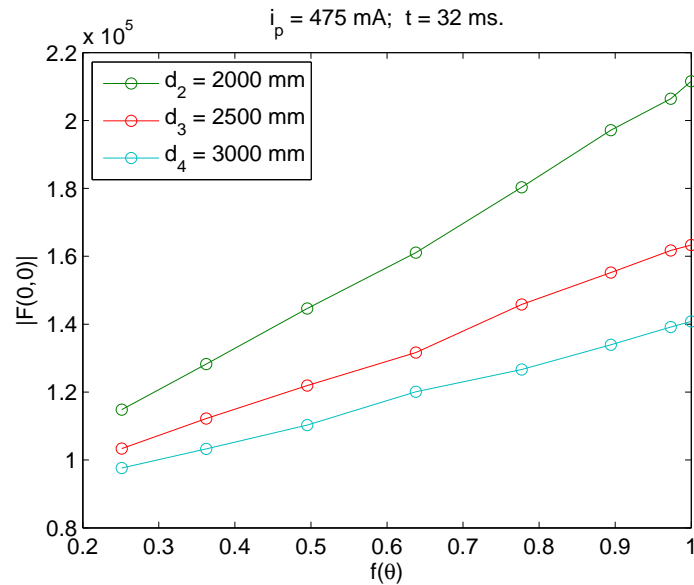


Figura 7.3.1: Componente de continua de la FFT de las imágenes en función del modelo gaussiano usado para el patrón de radiación de la baliza para tres distancias diferentes con un tiempo de exposición y corriente fijos.

La Figura 7.3.1 muestra que la componente continua de la FFT de las imágenes puede ser aproximada mediante una función de $f(\theta)$, siendo ésta última la función gaussiana modela el efecto de la orientación de la baliza en la componente continua de la FFT de las imágenes.

En estas pruebas se usó la baliza modificada, para asegurar, al igual que en el caso del modelo de energía relativa acumulada por la cámara, tener la posibilidad de estimar el ángulo de orientación de la baliza mediante el método descrito en la sección 6.2.1.

Así, la expresión final para el modelo de componente continua de la FFT de las imágenes se escribe como:

$$|F(0,0)| = \begin{cases} \beta_1 \frac{I_0 t}{d^2} f(\theta) + \beta_2 \frac{I_0}{d^2} f(\theta) + \beta_3 \frac{t}{d^2} f(\theta) + \beta_4 \frac{f(\theta)}{d^2} + \\ \beta_5 I_0 t f(\theta) + \beta_6 I_0 f(\theta) + \beta_7 t f(\theta) + \beta_8 f(\theta) + \\ \beta_9 \frac{I_0 t}{d^2} + \beta_{10} \frac{I_0}{d^2} + \beta_{11} \frac{t}{d^2} + \beta_{12} \frac{1}{d^2} + \beta_{13} I_0 t + \beta_{14} I_0 + \beta_{15} t + \beta_{16} \end{cases} \quad (7.3.1)$$

siendo β_i con $i = 1, \dots, 16$ los parámetros del modelo.

7.4. Desviación estándar de los valores de gris de las imágenes de la baliza.

Aprovechando la dependencia de los cambios en los valores de gris de las imágenes con los cambios en las magnitudes analizadas en el sistema cámara/baliza de infrarrojos, se ha intentado introducir algún parámetro estadístico como una expresión adicional en el sistema.

Los parámetros estadísticos más comunes son: la media y la desviación estándar. El primero está implícito dentro de la E_r , ver expresión (3.6.7) en el Capítulo 4.

Luego resulta interesante probar cuál sería el comportamiento que tendría la desviación estándar con los cambios en las condiciones dentro del sistema cámara/baliza.

Por su parte la desviación estándar da una idea de la dispersión de un conjunto de datos y en términos de irradiancia en la superficie del sensor, dará una idea de cuánto se dispersa la energía en la zona de interés analizada.

El proceso modelado de este indicador es idéntico al realizado para E_r y $|F(0,0)|$, respectivamente.

7.4.1. Comportamiento de la desviación estándar con la corriente de polarización del emisor.

Se ha medido empíricamente el comportamiento de la desviación estándar de los valores de gris de los píxeles en la región de interés que contiene la imagen del emisor, para diferentes corrientes de polarización de éste, manteniendo fija la distancia y el tiempo de exposición en la cámara y además asegurando que la cámara y el emisor están alineados y enfrentados.

Las medidas de la desviación estándar para diferentes corrientes se muestran en la Figura 7.4.1.

A partir de la Figura 7.4.1 se asumirá que la desviación estándar se aproxima mediante una función lineal de la corriente de polarización del emisor. Por lo tanto, al igual que para E_r y $|F(0,0)|$, el comportamiento de la desviación estándar con

la intensidad radiante (corriente de polarización del emisor) se modela mediante una función lineal.

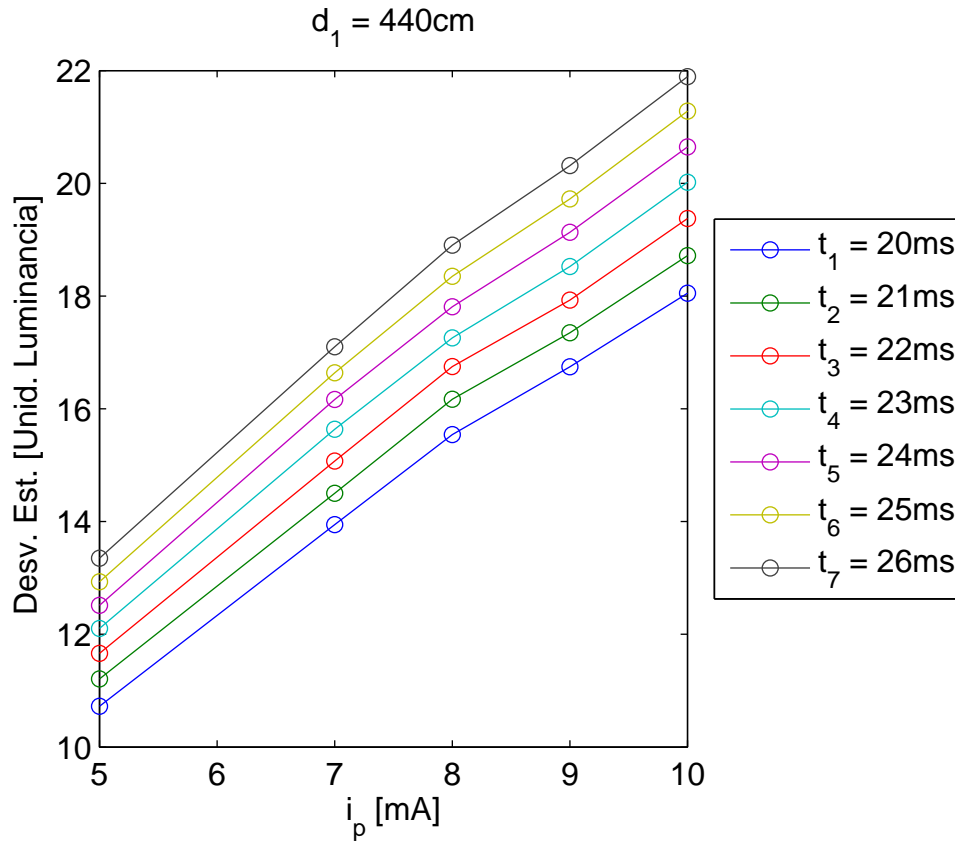


Figura 7.4.1: Desviación estándar de los valores de gris en la región de interés que contiene la imagen del emisor para diferentes tiempos de exposición y con una distancia fija.

7.4.2. Comportamiento de la desviación estándar con el tiempo de exposición.

Manteniendo constantes la intensidad radiante del emisor (corriente de polarización), la distancia entre la cámara y el emisor así como la orientación del emisor respecto a la cámara, se midió el comportamiento de la desviación estándar con las variaciones en el tiempo de exposición; para ello se capturaron diferentes imágenes con diferentes tiempos de exposición y por cada imagen se ha obtenido la desviación estándar de los valores de gris de los píxeles de la imagen del emisor.

Para este experimento los resultados se muestran en la Figura 7.4.2.

Al igual que en las variables anteriores (E_r y $|F(0,0)|$), la desviación estándar se asumirá que es una función lineal del tiempo de exposición.

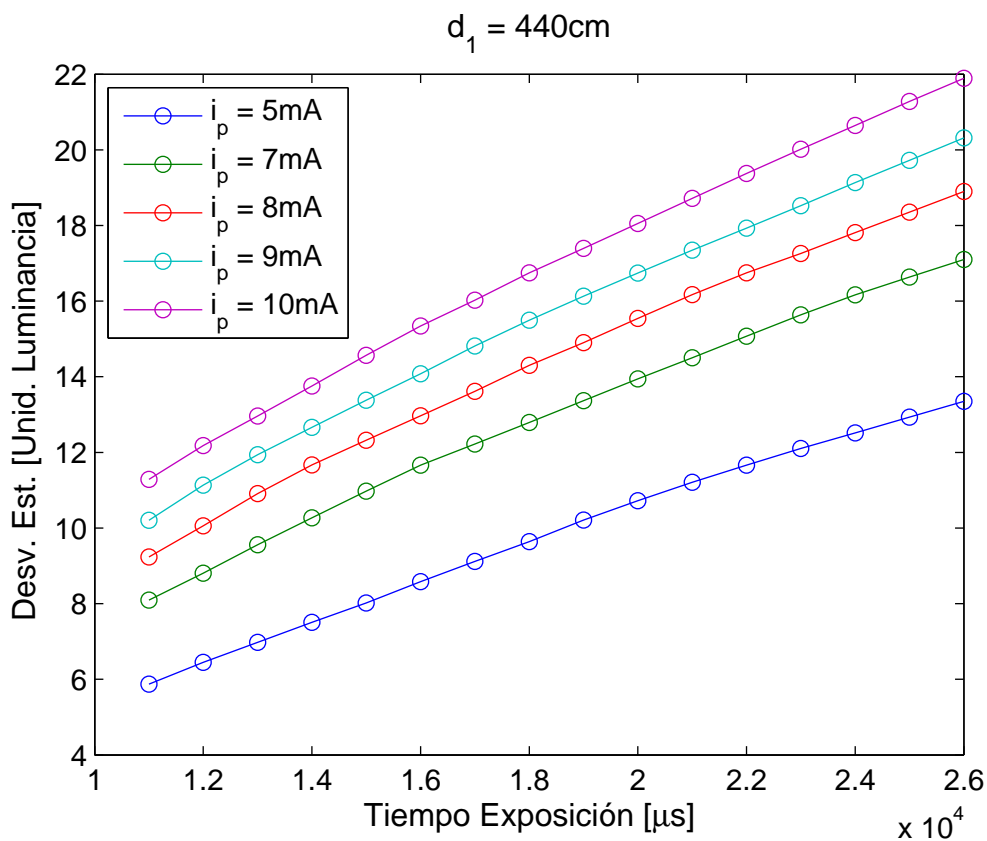


Figura 7.4.2: Comportamiento de la desviación estándar de los valores de gris en la región de interés que contiene la imagen del emisor en función del tiempo de exposición en la cámara, para diferentes corrientes de polarización y una distancia fija.

7.4.3. Comportamiento de la desviación estándar con la distancia entre la cámara y el emisor.

En este caso, se fijan la corriente de polarización del emisor (intensidad radiante) y el tiempo de exposición, se mantiene la cámara alineada con el emisor y se varía la distancia entre la cámara y el emisor.

Se capturan imágenes a diferentes distancias y se obtiene la desviación estándar de los valores de gris en la región de interés que contiene la imagen del emisor. El comportamiento de este indicador con la distancia es ligeramente diferente a los comportamientos encontrados para las otras variables empíricas (E_r y $|F(0,0)|$).

Por ejemplo, en la Figura 7.4.3a se muestra el comportamiento de $|F(0,0)|$ con el inverso de la distancia al cuadrado y como puede verse, para las dos corrientes consideradas, este comportamiento puede suponerse lineal; sin embargo, en la Figura 7.4.3b se muestra una gráfica similar, pero para la desviación estándar y ésta describe un comportamiento diferente.

Para el caso de la desviación estándar de los valores de gris de la imagen del emisor se asumirá que tiene un comportamiento cuadrático con el inverso de la distancia entre la cámara y la baliza al cuadrado.

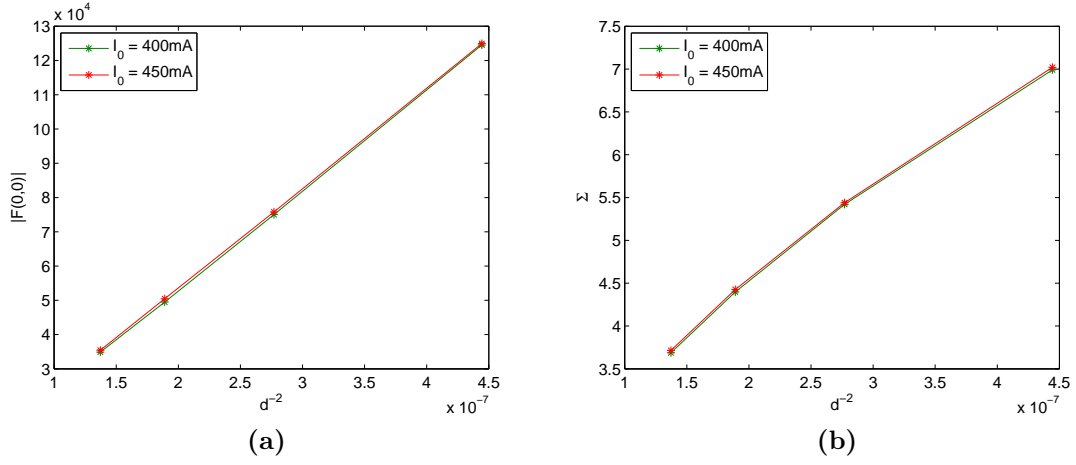


Figura 7.4.3: Comportamientos medidos con d^{-2} , para dos corrientes de polarización y un tiempo de exposición fijo. 7.4.3a de $|F(0,0)|$. 7.4.3b de Σ . Puede verse que para $|F(0,0)|$ el comportamiento es lineal con d^{-2} mientras que para Σ se describe mejor a partir de una función cuadrática de d^{-2} .

Por tanto, para la desviación estándar (Σ) se asumirá que la función que caracteriza el comportamiento con la distancia es $f_3(D) = \delta'_\Sigma D^2 + \delta''_\Sigma D + \delta'''_\Sigma$ siendo $D = 1/d^2$.

7.4.4. Propuesta de modelo de la desviación estándar para el cálculo de la distancia.

Atendiendo a la similitud entre los comportamientos medidos para la desviación estándar con las magnitudes I_0 y t , con los indicadores E_r y $|F(0,0)|$ y considerando la diferencia en el comportamiento de la distancia, la desviación estándar (Σ) puede escribirse como:

$$\Sigma = (\tau'_\Sigma t + \tau''_\Sigma) (\rho'_\Sigma I_0 + \rho''_\Sigma) (\delta'_\Sigma D^2 + \delta''_\Sigma D + \delta'''_\Sigma) \quad (7.4.1)$$

donde τ'_Σ y τ''_Σ representan los parámetros de la función lineal que modela el comportamiento con el tiempo de exposición, ρ'_Σ y ρ''_Σ , los parámetros para modelar la relación lineal con la intensidad radiante (corriente de polarización) y δ'_Σ , δ''_Σ y δ'''_Σ modelan la relación cuadrática con D .

Eliminando los paréntesis en la expresión (7.4.1) quedaría:

$$\Sigma = \begin{cases} \lambda_1 t I_0 D^2 + \lambda_2 t I_0 D + \lambda_3 t I_0 + \\ \lambda_4 t D^2 + \lambda_5 t D + \lambda_6 t + \\ \lambda_7 I_0 D^2 + \lambda_8 I_0 D + \lambda_9 I_0 + \\ \lambda_{10} D^2 + \lambda_{11} D + \lambda_{12} \end{cases} \quad (7.4.2)$$

donde λ_i con $i = 1, \dots, 12$ son los parámetros del modelo.

Como en el caso de (7.2.7), la expresión (7.4.2) es válida cuando el emisor está alineado con la cámara.

Por su parte, la desviación estándar de los niveles de gris de la región de interés que contiene la imagen del emisor puede usarse por separado para la estimación de la distancia entre el emisor y la cámara, previa realización de un proceso de calibración, en el que se obtienen los parámetros para λ_i en la ecuación (7.4.2).

Para el cálculo de los coeficientes de la ecuación (7.4.2) se utiliza la secuencia de imágenes comentada en la sección 7.2.4 que está integrada por 220 imágenes captadas a 4 distancias diferentes, con 5 corrientes de polarización diferentes y con 11 tiempos de exposición distintos.

La obtención de los valores para λ_i se realiza resolviendo la siguiente ecuación:

$$\epsilon = \Sigma - \left[\begin{array}{c} \left(\begin{array}{c} \lambda_1 t I_0 D^2 + \lambda_2 t I_0 D + \lambda_3 t I_0 + \\ \lambda_4 t D^2 + \lambda_5 t D + \lambda_6 t + \\ \lambda_7 I_0 D^2 + \lambda_8 I_0 D + \lambda_9 I_0 + \\ \lambda_{10} D^2 + \lambda_{11} D + \lambda_{12} \end{array} \right) \end{array} \right] \quad (7.4.3)$$

que para la secuencia de imágenes mencionada resulta en un sistema de ecuaciones que matricialmente puede expresarse como: $\mathbf{H}_1 \cdot \mathbf{x} = \mathbf{S}$ donde $\mathbf{S} = [\Sigma_1, \Sigma_2, \dots, \Sigma_{220}]^t$ representa las desviaciones estándar medidas en las imágenes con la baliza captada, $\mathbf{x} = [\lambda_1, \dots, \lambda_{12}]^t$ el vector de coeficientes del modelo y \mathbf{H}_1 la matriz que contiene las magnitudes I_0 , t y d , respectivamente. Posteriormente: $\mathbf{x} = \mathbf{H}_1^+ \cdot \mathbf{S}$ y $\mathbf{H}_1^+ = (\mathbf{H}_1 \cdot \mathbf{H}_1^t)^{-1} \mathbf{H}_1^t$ es la pseudoinversa de \mathbf{H}_1 .

De manera similar a cómo se desarrollo para $|F(0, 0)|$ (ecuación (7.2.9)) y para E_r (ecuación (4.3.6)), la expresión (7.4.2) se ha reformulado considerando dos imágenes captadas con diferentes tiempos de exposición. Esto es:

$$\Sigma_j - \Sigma_r = \left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 I_0 D^2 \Delta t_j + \lambda_2 I_0 D \Delta t_j + \lambda_3 I_0 \Delta t_j + \\ \lambda_4 D^2 \Delta t_j + \lambda_5 D \Delta t_j + \lambda_6 \Delta t_j \end{array} \right. \quad (7.4.4)$$

donde Σ_j es la desviación estándar en la región que contiene la imagen del emisor, en aquella imagen captada con un tiempo t_j , t_r es el tiempo de referencia y Σ_r su desviación correspondiente, $\Delta t = t_j - t_r$.

A partir de la ecuación (7.4.4), se escribe que:

$$\begin{aligned} & (\lambda_1 I_0 \Delta t_j + \lambda_4 \Delta t) D^2 + \\ & (\lambda_2 I_0 \Delta t_j + \lambda_5 \Delta t_j) D + \\ & (\lambda_3 I_0 \Delta t_j + \lambda_6 \Delta t_j - (\Sigma_j - \Sigma_r)) = 0 \end{aligned} \quad (7.4.5)$$

que es un polinomio de segundo orden y de cuyas raíces positivas se obtiene el valor estimado de la distancia, sabiendo que $D = 1/d^2$.

En la Figura 7.4.4 se muestra el resultado de la estimación de distancias usando la alternativa de la desviación estándar, para 5 corrientes de polarización diferentes.

Para esta Figura se han utilizado 10 valores diferentes para Δt_j y el valor final de la distancia es el promedio de estas 10 estimaciones. Estos resultados se muestran en la Tablas 8.4.1 y 8.4.2..

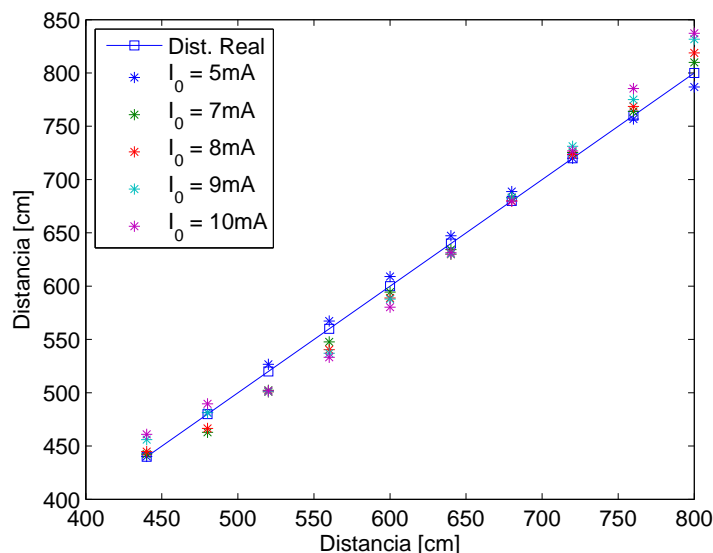


Figura 7.4.4: Estimación de la distancia entre la cámara y un emisor usando la alternativa de la desviación estándar, bajo la suposición de que el emisor y la cámara se encuentran alineados y enfrentados.

7.4.5. Consideración del ángulo de orientación en el modelo de desviación estándar.

De forma similar a los indicadores anteriores, en el modelo de desviación estándar presentado en la ecuación (7.4.2) debe garantizarse que la cámara y el emisor se encuentren alineados. Por lo tanto en la práctica este hecho no se puede garantizar y el emisor puede tener una orientación relativa cualquiera respecto a la cámara.

La metodología seguida para incluir el ángulo de orientación del emisor, en el modelo que utiliza la desviación estándar de los niveles de gris en la región de interés es exactamente igual a la metodología usada para los demás indicadores (E_r y $|F(0,0)|$). Es decir:

- Se modificó la forma de la baliza para garantizar una forma circular.
- Se midió los valores de Σ para diferentes ángulos de orientación de la baliza respecto a la cámara.
- Se asume, al igual que en los otros casos, que el patrón de radiación de la baliza es una figura en revolución.
- A partir de la forma elíptica es posible calcular el ángulo de orientación mediante una metodología externa al modelo que se propone.

De forma similar a las variables anteriores, los valores de desviación estándar en función del ángulo de orientación describen una figura muy similar a una función gaussiana, con lo cual se puede afirmar que Σ se relaciona con la función del patrón $f(\theta)$ de forma lineal. La Figura 7.4.5 confirma este planteamiento. En ésta se muestra que la desviación estándar de los valores de gris de los píxeles de la región de interés que contiene la imagen de la baliza es una función lineal de la gaussiana que modela el patrón de radiación del emisor.

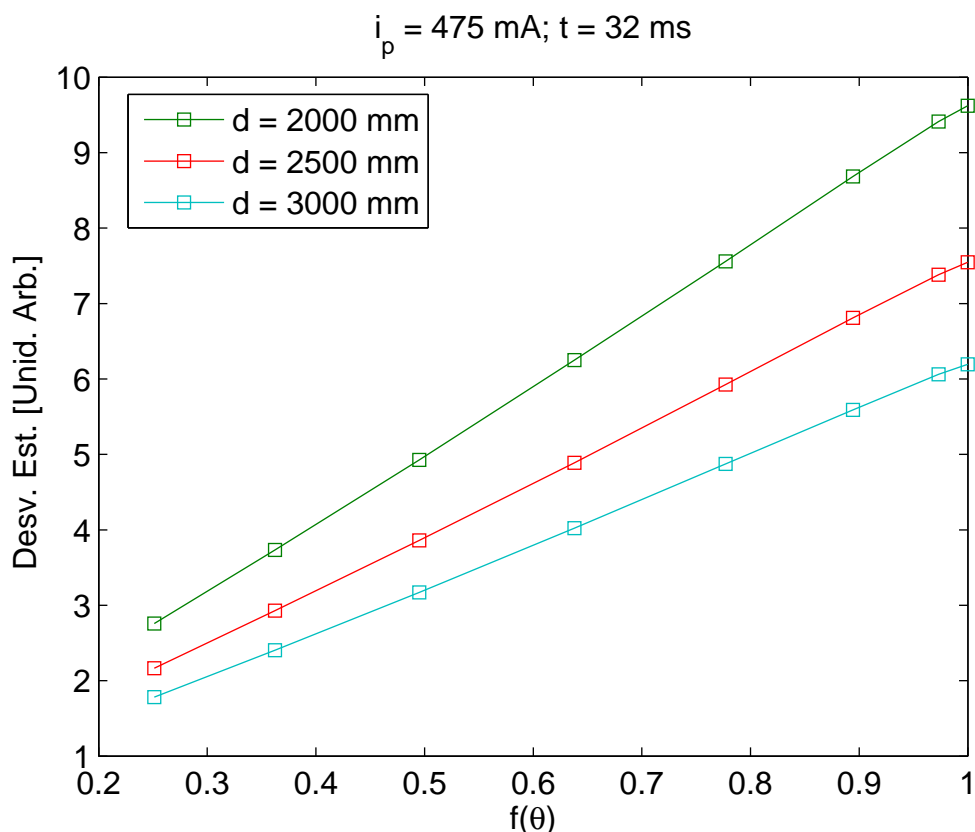


Figura 7.4.5: Desviación estándar de los valores de gris en la región de interés en función de la gaussiana que modela el patrón de radiación, para tres distancias diferentes, un tiempo de exposición y corriente de polarización fijos.

Para generar la Figura 7.4.5 se asumió que: $f(\theta) = e^{-\frac{(\theta-\theta_0)^2}{2\sigma^2}}$ con $\theta_0 = 0$ y $\sigma = 21$ grados y se representan graficamente los resultados medidos de Σ en función de $f(\theta)$.

Siguiendo el mismo mecanismo que en las otras variables, para incluir el ángulo de orientación en las expresiones basta con multiplicar la expresión (7.4.1) por $(\gamma'_\Sigma f(\theta) + \gamma'')$. Esto es:

$$\Sigma = (\tau'_\Sigma t + \tau''_\Sigma) (\rho'_\Sigma I_0 + \rho''_\Sigma) (\delta'_\Sigma D^2 + \delta''_\Sigma D + \delta'''_\Sigma) (\gamma'_\Sigma f(\theta) + \gamma'') \quad (7.4.6)$$

que al eliminar los paréntesis en la ecuación anterior quedaría:

$$\Sigma = \left\{ \begin{array}{l} \lambda_1 I_0 t D^2 f(\theta) + \lambda_2 I_0 t D f(\theta) + \lambda_3 I_0 t f(\theta) + \\ \lambda_4 t D^2 f(\theta) + \lambda_5 t D f(\theta) + \lambda_6 t f(\theta) + \\ \lambda_7 I_0 D^2 f(\theta) + \lambda_8 I_0 D f(\theta) + \lambda_9 I_0 f(\theta) + \\ \lambda_{10} D^2 f(\theta) + \lambda_{11} D f(\theta) + \lambda_{12} f(\theta) + \\ \lambda_{13} t I_0 D^2 + \lambda_{14} t I_0 D + \lambda_{15} t I_0 + \\ \lambda_{16} t D^2 + \lambda_{17} t D + \lambda_{18} t + \\ \lambda_{19} I_0 D^2 + \lambda_{20} I_0 D + \lambda_{21} I_0 + \\ \lambda_{22} D^2 + \lambda_{23} D + \lambda_{24} \end{array} \right. \quad (7.4.7)$$

con λ_i con $i = 1, \dots, 24$ los coeficientes del modelo.

7.5. Propuesta del modelo independizado de la intensidad radiante de la baliza.

Si se utilizan las variables E_r , $|F(0, 0)|$ y Σ , las cuales se extraen de una imagen de la baliza y relacionan las magnitudes que afectan la energía acumulada por la cámara, entonces, podrá formar un sistema de tres ecuaciones ((6.2.5), (7.3.1) y (7.4.7)) que dependen de I_0 , t , d y θ , respectivamente.

El interés fundamental de esta tesis es desarrollar un modelo, que permita eliminar la dependencia con la corriente de polarización (intensidad radiante de la baliza) que tienen las variables empíricas que se extraen de las imágenes para el sistema cámara/baliza de infrarrojos, y posteriormente obtener un valor final para la distancia estimada con la mayor precisión posible independientemente de la precisión en la medida del ángulo de orientación de la baliza.

De ahí que las variables anteriores ($|F(0, 0)|$ y Σ) conjuntamente con la energía relativa acumulada por la cámara (ecuación (6.2.5)) se integrarán para formar un sistema de ecuaciones, en el que la única incógnita es la distancia.

Por otro lado en la sección 4.3 se propone una metodología diferencial que mejora la precisión en la estimación de distancias y disminuye la cantidad de parámetros en el modelo utilizado en el proceso. La metodología diferencial, donde se analizan dos imágenes captadas con diferentes tiempos de exposición, asumiendo que ambas han sido captadas con el emisor estático, mejora el comportamiento de cada uno de los modelos individuales frente a ruido y a off-set de iluminación que puedan existir en el sistema.

Teniendo en cuenta esta alternativa, se decidió reformular las expresiones para las variables que se extraen de las imágenes, en su forma diferencial, considerando dos imágenes captadas con diferentes tiempos de exposición.

Suponiendo que se analizan dos imágenes, una capturada con un tiempo de exposición t_j y otra captada con un tiempo t_r , asumiendo que en la captura de las imágenes la baliza se ha mantenido estática, las variables $E_{r,\theta}$, $|F(0,0)|$ y Σ pueden escribirse en su forma diferencial como:

$$\Delta E_{r,\theta_j} = \begin{cases} \kappa_1 I_0 f(\theta) D \Delta t_j + \kappa_3 f(\theta) D \Delta t_j + \\ \kappa_5 I_0 f(\theta) \Delta t_j + \kappa_7 f(\theta) \Delta t_j + \\ \kappa_9 I_0 D \Delta t_j + \kappa_{11} D \Delta t_j + \kappa_{13} I_0 \Delta t_j + \kappa_{15} \Delta t_j \end{cases} \quad (7.5.1)$$

para la energía relativa acumulada por la cámara,

$$\Delta |F(0,0)|_j = \begin{cases} \beta_1 I_0 f(\theta) D \Delta t_j + \beta_3 f(\theta) D \Delta t_j + \\ \beta_5 I_0 f(\theta) \Delta t_j + \beta_7 f(\theta) \Delta t_j + \\ \beta_9 I_0 D \Delta t_j + \beta_{11} D \Delta t_j + \beta_{13} I_0 \Delta t_j + \beta_{15} \Delta t_j \end{cases} \quad (7.5.2)$$

para la componente de continua de las FFT de las imágenes, y

$$\Delta \Sigma_j = \begin{cases} \lambda_1 I_0 \Delta t_j D^2 f(\theta) + \lambda_2 I_0 \Delta t_j D f(\theta) + \lambda_3 I_0 \Delta t_j f(\theta) + \\ \lambda_4 \Delta t_j D^2 f(\theta) + \lambda_5 \Delta t_j D f(\theta) + \lambda_6 \Delta t_j f(\theta) + \\ \lambda_{13} \Delta t_j I_0 D^2 + \lambda_{14} \Delta t_j I_0 D + \lambda_{15} \Delta t_j I_0 + \\ \lambda_{16} \Delta t_j D^2 + \lambda_{17} \Delta t_j D + \lambda_{18} \Delta t_j \end{cases} \quad (7.5.3)$$

para la desviación estándar de los valores de gris de los píxeles en la región de interés que contiene la imagen de la baliza.

$\Delta E_{r,\theta_j}$, $\Delta |F(0,0)|_j$ y $\Delta \Sigma_j$ son las diferencias en las variables extraídas de las imágenes para cada una de las diferencias en tiempo de exposición representadas por Δt_j . El subíndice j representa la cantidad de diferencias que se consideren en el modelo, lo que es lo mismo que la cantidad de imágenes que se usen para calcular la diferencia con la imagen de referencia.

El enfoque de diferencias se realiza asumiendo un tiempo de referencia t_r , de tal manera que $\Delta t_j = t_j - t_r$, con $j = 1, \dots, N$. De esta forma: $\Delta E_{r,\theta_j} = E_{r,\theta_j} - E_{r,\theta_r}$, $\Delta |F(0,0)|_j = |F(0,0)|_j - |F(0,0)|_r$ y $\Delta \Sigma_j = \Sigma_j - \Sigma_r$, respectivamente.

Por lo tanto, al menos por cada pareja de imágenes captadas con diferentes tiempos de exposición y asumiendo que la baliza se ha mantenido estática durante la captura de las imágenes, se tienen tres ecuaciones ((7.5.1), (7.5.2) y (7.5.3)) y se desea calcular la distancia entre la cámara y la baliza.

Sin embargo, las tres ecuaciones dependen de los mismos parámetros, y al final del proceso, se desea obtener un modelo que no dependa de la intensidad radiante de la baliza.

Por lo tanto, se decidió utilizar la ecuación (7.5.2) para despejar a I_0 y posteriormente sustituirla en las demás ecuaciones.

La intensidad radiante en función de $\Delta |F(0,0)|_j$ quedaría como:

$$I_{0_j} = \frac{\Delta|F(0,0)|_j - [\beta_3 f(\theta) D \Delta t_j + \beta_7 f(\theta) \Delta t_j + \beta_{11} D \Delta t_j + \beta_{15} \Delta t_j]}{\beta_1 f(\theta) D \Delta t_j + \beta_5 f(\theta) \Delta t_j + \beta_9 D \Delta t_j + \beta_{13} \Delta t_j} \quad (7.5.4)$$

y para simplificar la notación se escribe que: $I_{0_j} = \Omega \left(f(\theta), \Delta t_j, D, \Delta|F(0,0)|_j, \vec{\beta} \right)$, donde: Ω es la función que representa la ecuación (7.5.4), $f(\theta)$ la expresión para modelar el patrón de radiación de la baliza, Δt_j la diferencia de tiempos de exposición entre la imagen j y la imagen r , D el inverso de la distancia al cuadrado que separa a la baliza de la cámara, $\Delta|F(0,0)|_j$ las diferencias de $|F(0,0)|$ entre las imágenes j y r , y $\vec{\beta}$ el vector que contiene los parámetros β de la ecuación (7.5.4).

La intensidad radiante (ecuación (7.5.4)) se sustituye en (7.5.1) y en (7.5.3), se tiene:

$$\Delta E_{r,\theta_j} = \begin{cases} \kappa_1 \left[\Omega \left(f(\theta), \Delta t_j, D, \Delta|F(0,0)|_j, \vec{\beta} \right) \right] f(\theta) D \Delta t_j + \kappa_3 f(\theta) D \Delta t_j + \\ \kappa_5 \left[\Omega \left(f(\theta), \Delta t_j, D, \Delta|F(0,0)|_j, \vec{\beta} \right) \right] f(\theta) \Delta t_j + \kappa_7 f(\theta) \Delta t_j + \\ \kappa_9 \left[\Omega \left(f(\theta), \Delta t_j, D, \Delta|F(0,0)|_j, \vec{\beta} \right) \right] D \Delta t_j + \kappa_{11} D \Delta t_j + \\ \kappa_{13} \left[\Omega \left(f(\theta), \Delta t_j, D, \Delta|F(0,0)|_j, \vec{\beta} \right) \right] \Delta t_j + \kappa_{15} \Delta t_j \end{cases} \quad (7.5.5)$$

$$\Delta \Sigma_j = \begin{cases} \lambda_1 \left[\Omega \left(f(\theta), \Delta t_j, D, \Delta|F(0,0)|_j, \vec{\beta} \right) \right] \Delta t_j D^2 f(\theta) + \\ \lambda_2 \left[\Omega \left(f(\theta), \Delta t_j, D, \Delta|F(0,0)|_j, \vec{\beta} \right) \right] \Delta t_j D f(\theta) + \\ \lambda_3 \left[\Omega \left(f(\theta), \Delta t_j, D, \Delta|F(0,0)|_j, \vec{\beta} \right) \right] \Delta t_j f(\theta) + \lambda_4 \Delta t_j D^2 f(\theta) + \\ \lambda_5 \Delta t_j D f(\theta) + \lambda_6 \Delta t_j f(\theta) + \lambda_{13} \Delta t_j \left[\Omega \left(f(\theta), \Delta t_j, D, \Delta|F(0,0)|_j, \vec{\beta} \right) \right] D^2 + \\ \lambda_{14} \Delta t_j \left[\Omega \left(f(\theta), \Delta t_j, D, \Delta|F(0,0)|_j, \vec{\beta} \right) \right] D + \\ \lambda_{15} \Delta t_j \left[\Omega \left(f(\theta), \Delta t_j, D, \Delta|F(0,0)|_j, \vec{\beta} \right) \right] + \lambda_{16} \Delta t_j D^2 + \lambda_{17} \Delta t_j D + \lambda_{18} \Delta t_j \end{cases} \quad (7.5.6)$$

Las expresiones (7.5.5) y (7.5.6) conjuntamente con (7.5.4), son las expresiones definitivas en la propuesta de modelo independiente de la intensidad radiante o la corriente de polarización de la baliza.

7.6. Metodología de calibración y ajustes de los parámetros del modelo.

A partir de (7.5.5) y (7.5.6) una vez sustituida (7.5.4) se obtiene¹:

$$\Delta E_r^{Indp} = \frac{\Delta E_{Numerador}}{\Delta E_{Denominador}} \quad (7.6.1)$$

donde

$$\Delta E_{Numerador} = \left\{ \begin{array}{l} q_1 \Delta |F(0,0)| \Delta t D f_E(\theta) + q_2 \Delta t^2 D^2 f_E^2(\theta) + \\ q_3 \Delta t^2 D f_E^2(\theta) + q_4 \Delta t^2 D^2 f_E(\theta) + \\ q_5 \Delta t^2 D f_E(\theta) + q_6 \Delta |F(0,0)| \Delta t f_E(\theta) + \\ q_7 \Delta t^2 f_E^2(\theta) + q_8 \Delta t^2 f_E(\theta) + \\ q_9 \Delta |F(0,0)| \Delta t D + q_{10} \Delta t^2 D^2 + \\ q_{11} \Delta t^2 D + q_{12} \Delta |F(0,0)| \Delta t + q_{13} \Delta t^2 \end{array} \right. \quad (7.6.2)$$

$$\Delta E_{Denominador} = q_{14} \Delta t D f_E(\theta) + q_{15} \Delta t f_E(\theta) + q_{16} \Delta t D + q_{17} \Delta t$$

De forma similar se obtiene para $\Delta \Sigma$:

$$\Delta \Sigma^{Indp} = \frac{\Delta \Sigma_{Numerador}}{\Delta \Sigma_{Denominador}} \quad (7.6.3)$$

donde

¹Se ha prescindido del subíndice j para simplificar la notación.

$$\Delta\Sigma_{Numerador} = \left\{ \begin{array}{l} p_1\Delta|F(0,0)|\Delta tD^2f_\Sigma(\theta) + p_2\Delta t^2D^3f_\Sigma^2(\theta)+ \\ p_3\Delta t^2f_\Sigma^2D^2 + p_4\Delta t^2D^3f_\Sigma(\theta)+ \\ p_5\Delta t^2D^3f_\Sigma(\theta) + p_6\Delta|F(0,0)|\Delta tDf_\Sigma(\theta)+ \\ p_7\Delta t^2Df_\Sigma^2(\theta) + p_8\Delta t^2Df_\Sigma(\theta)+ \\ p_9\Delta|F(0,0)|\Delta tf_\Sigma(\theta) + p_{10}\Delta t^2f_\Sigma^2(\theta)+ \\ p_{11}\Delta t^2f_\Sigma(\theta) + p_{12}\Delta|F(0,0)|\Delta tD^2+ \\ p_{13}\Delta t^2D^3 + p_{14}\Delta t^2D^2 + p_{15}\Delta|F(0,0)|\Delta tD+ \\ p_{16}\Delta t^2D + p_{17}\Delta|F(0,0)|\Delta t + p_{18}\Delta t^2 \end{array} \right. \quad (7.6.4)$$

$$\Delta\Sigma_{Denominador} = p_{19}\Delta tDf_\Sigma(\theta) + p_{20}\Delta tf_\Sigma(\theta) + p_{21}\Delta tD + p_{22}\Delta t$$

ΔE_r^{Indp} y $\Delta\Sigma^{Indp}$ son las medidas prácticas que se extraen de las imágenes y se relacionan con Δt , D , y con el ángulo de orientación θ .

En las expresiones ((7.6.1) y (7.6.2)) y ((7.6.3) y (7.6.4)) se ha hecho una diferencia en la notación para las funciones que caracterizan el patrón de radiación en las dos variables, nombrándolas f_E y f_Σ , respectivamente. Por su parte, f_E es el resultado del producto de la función que modela el patrón de radiación de la baliza en la variable $E_{r,\theta}$ con su equivalente para la variable $|F(0,0)|$; así mismo f_Σ resulta del producto de la función que caracteriza el patrón de radiación de la baliza para la variable Σ con su homólogo en la variable $|F(0,0)|$. En los procedimientos anteriores se han considerado las mismas funciones (una función gaussiana con media cero y desviación de 21 grados), pero en ocasiones y dependiendo del tipo de emisor y de difusor que se use, estas funciones pueden cambiar.

Para adaptarse a esos posibles cambios, se asumió que la forma seguirá siendo gaussiana con media cero, pero los valores de desviación pueden ser diferentes para cada ecuación.

Si en las tres variables (E_r , $|F(0,0)|$ y Σ) se considera que la función que caracteriza el patrón de radiación es una función gaussiana, entonces el resultado del producto entre ellas será una función gaussiana también, pero con diferente desviación. Por tanto, en cada ecuación ((7.6.1) y (7.6.2)) y ((7.6.3) y (7.6.4)), una de las incógnitas será la dispersión de la función gaussiana que se usa para modelar el efecto del patrón de radiación.

El proceso de calibración para el modelo de la energía relativa acumulada por la cámara independiente de la intensidad radiante del emisor se basa en la minimización de la siguiente ecuación:

$$\Theta_E(\mathbf{q}) = \sum_{n=1}^N [\Delta E_{r,\theta_n}^{medido} - \Delta E_{r,\theta_n}^{modelado}(\mathbf{x}_n, \mathbf{q})]^2 \quad (7.6.5)$$

que es la función objetivo de un proceso de optimización de parámetros y que representa la suma del error cuadrático en las N condiciones analizadas. La $\Delta E_r^{modelada}$ queda definida en la expresión (7.6.1) y (7.6.2), \mathbf{x} es el vector que contiene los datos de Δt , D , θ y $|F(0,0)|$ y $\mathbf{q} = [q_1, \dots, q_{17}, \sigma_E]$ el vector de las incógnitas, donde σ_E es la desviación estándar de la función gaussiana f_E .

Un procedimiento similar se realiza para obtener los parámetros del modelo de desviación estándar de los niveles de gris en la región de interés que contiene la imagen de la baliza con independencia de la intensidad radiante o corriente de polarización de la baliza:

$$\Theta_{\Sigma}(\mathbf{p}) = \sum_{n=1}^N [\Delta \Sigma_n^{medido} - \Delta \Sigma_n^{modelado}(\mathbf{x}_n, \mathbf{p})]^2 \quad (7.6.6)$$

con $\mathbf{p} = [p_1, \dots, p_{22}, \sigma_{\Sigma}]$, $\Delta \Sigma_n^{modelada}$ se representa en la ecuación (7.6.3) y (7.6.4) respectivamente y \mathbf{x}_n es el vector de los datos.

Ambas funciones objetivo ((7.6.5) y (7.6.6)) se minimizan usando el método de Levenberg-Marquardt, para calcular los parámetros \mathbf{q} y \mathbf{p} de cada modelo.

Los datos usados para la calibración del modelo se forman tomando 4 distancias distintas, por cada distancia se consideran 8 ángulos de orientación. Por cada distancia y ángulo se utilizan 2 corrientes de polarización y en cada caso, se capturan 5 imágenes para formar 4 diferencias. En total, se manejan 320 imágenes de ellas se extraen 256 diferencias, que representan 256 ecuaciones.

Para los datos de calibración utilizados, el ajuste del modelo se presenta en las Figuras 7.6.1 a la 7.6.4.

En la Figura 7.6.1 se muestra los valores de ΔE_r medido y modelado, respectivamente; para cada una de las diferencias consideradas en el ajuste y en la Figura 7.6.2 el correspondiente error relativo en % de la exactitud en el ajuste del modelo.

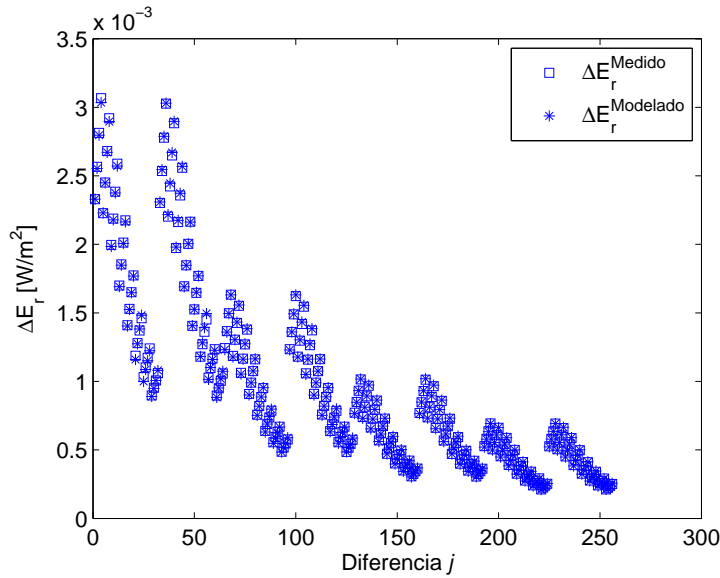


Figura 7.6.1: Valores de ΔE_r medidos y modelados, para cada diferencia considerada en el proceso de calibración. Cada punto en la Figura representa una diferencia usada en la calibración.

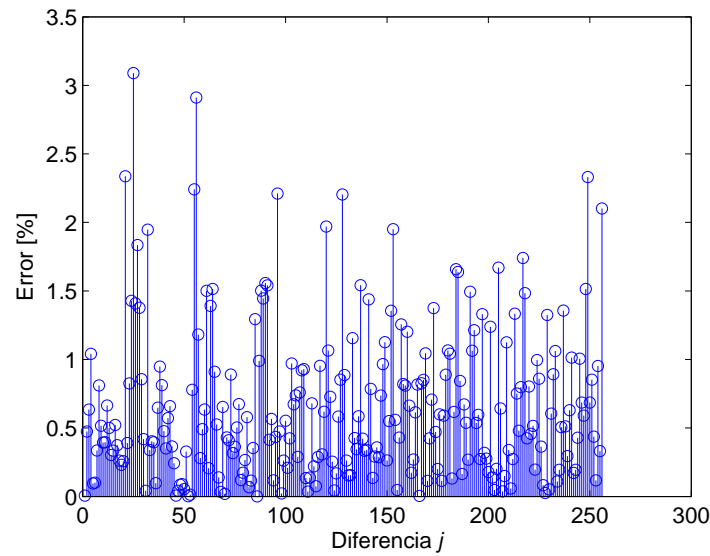


Figura 7.6.2: Error relativo en el proceso de ajuste de los parámetros del modelo de ΔE_r .

Igualmente en las Figuras 7.6.3 se muestran los valores de $\Delta\Sigma$ por cada una de las 256 diferencias que se usaron en la calibración del modelo independiente. A su vez, los errores relativos del ajuste del modelo se muestran en la Figura 7.6.4.

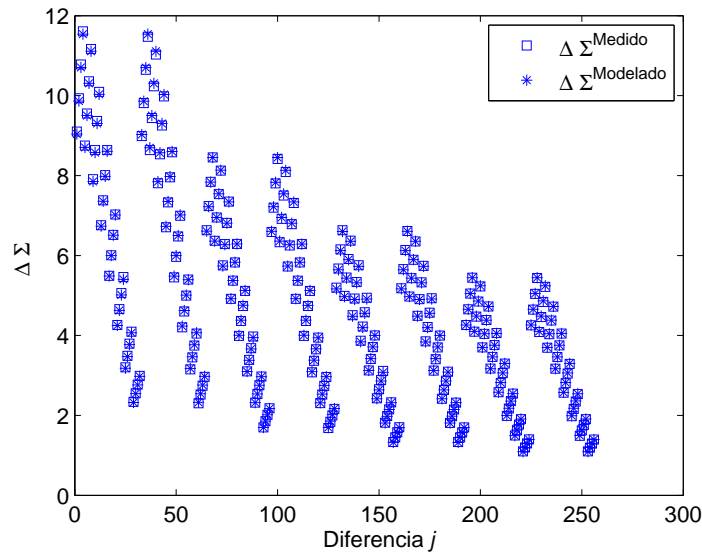


Figura 7.6.3: Valores de $\Delta\Sigma$ medidos y modelados, para cada diferencia considerada en el proceso de calibración. Cada punto en la Figura representa una diferencia usada en la calibración.

Como se comentó anteriormente, se utilizaron 4 distancias: 1500, 2000, 2500 y 3000 mm; se utilizaron como ángulos de orientación 0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 35 grados. Se usaron dos corrientes: 475 y 500 mA. Los tiempos de exposición fueron: $t_r = 8\text{ms}$ y $t_j = 30, 32, 34$ y 36 ms.

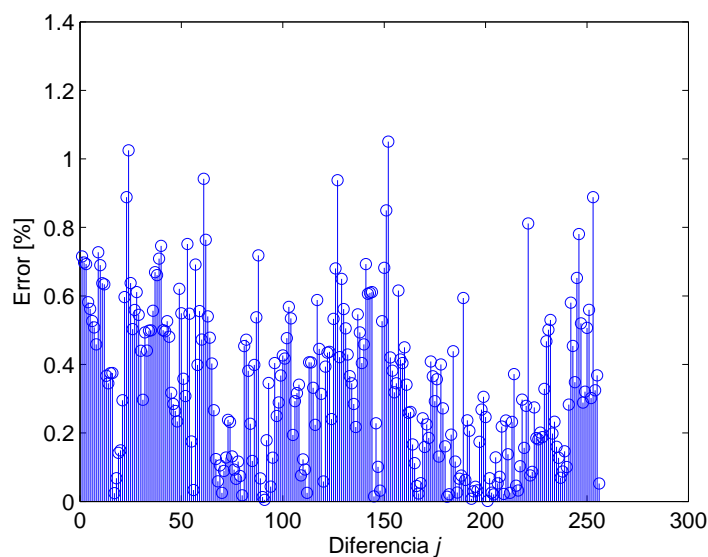


Figura 7.6.4: Error relativo en el proceso de ajuste de los parámetros del modelo de $\Delta\Sigma$.

Para minimizar el efecto del ruido, por cada condición se capturaron 30 imágenes. Por cada una de las imágenes se extraen las variables empíricas que se proponen (E_r , $|F(0,0)|$ y Σ). El valor final en cada condición de tiempo de exposición, distancia, ángulo de orientación y corriente de polarización de la baliza es el promedio de los 30 valores calculados. No obstante, en los errores en el ajuste de ΔE_r se obtienen picos de 3,5%, mientras que en el ajuste de $\Delta\Sigma$ están por debajo de 1,2%, lo que representa unos valores aceptables para nuestra implementación.

7.7. Modelo independiente de la intensidad radiante de la baliza para el cálculo de la distancia.

Una vez obtenidos los valores para cada uno de los integrantes del vector \mathbf{q} y \mathbf{p} , las ecuaciones (7.6.1) y (7.6.3) pueden utilizarse para calcular la distancia entre la cámara y la baliza de infrarrojos, despejando a D de la ecuación ((7.6.1) y (7.6.2)) y de la ecuación ((7.6.3) y (7.6.4)).

Para el caso de $\Delta E_{r,\theta}$ y una pareja de imágenes captadas con diferentes tiempos de exposición, la distancia se obtiene de:

$$a_1 D^2 + a_2 D + a_3 = 0 \quad (7.7.1)$$

donde:

$$a_1 = q_2 \Delta t^2 f_E^2(\theta) + q_4 \Delta t^2 f_E(\theta) + q_{10} \Delta t^2 \quad (7.7.2)$$

$$a_2 = \begin{cases} q_1 \Delta |F(0, 0)| \Delta t f_E(\theta) + q_3 \Delta t^2 f_E^2(\theta) + \\ q_5 \Delta t^2 f_E(\theta) + q_9 \Delta |F(0, 0)| \Delta t + \\ q_{11} \Delta t^2 - q_{14} \Delta E_r \Delta t f_E(\theta) - q_{16} \Delta E_r \Delta t \end{cases} \quad (7.7.3)$$

$$a_3 = \begin{cases} q_6 \Delta |F(0, 0)| \Delta t f_E(\theta) + q_7 \Delta t^2 f_E^2(\theta) + \\ q_8 \Delta t^2 f_E(\theta) + q_{12} \Delta |F(0, 0)| \Delta t + \\ q_{13} \Delta t^2 - q_{15} \Delta E_r \Delta t f_E(\theta) - q_{17} \Delta E_r \Delta t \end{cases} \quad (7.7.4)$$

Y en el caso de $\Delta\Sigma$ también para el caso de dos imágenes:

$$c_1 D^3 + c_2 D^2 + c_3 D + c_4 = 0 \quad (7.7.5)$$

donde:

$$c_1 = p_2 \Delta t^2 f_\Sigma^2(\theta) + p_4 \Delta t^2 f_\Sigma(\theta) + p_{13} \Delta t^2 \quad (7.7.6)$$

$$c_2 = \begin{cases} p_1 \Delta |F(0, 0)| \Delta t f_\Sigma(\theta) + p_3 \Delta t^2 f_\Sigma^2(\theta) + \\ p_5 \Delta t^2 f_\Sigma(\theta) + p_{12} \Delta |F(0, 0)| \Delta t + \\ p_{14} \Delta t^2 \end{cases} \quad (7.7.7)$$

$$c_3 = \begin{cases} p_6 \Delta |F(0, 0)| \Delta t f_\Sigma(\theta) + p_7 \Delta t^2 f_\Sigma^2(\theta) + \\ p_8 \Delta t^2 f_\Sigma(\theta) + p_{16} \Delta t^2 - p_{19} \Delta \Sigma \Delta t f_\Sigma(\theta) + \\ -p_{21} \Delta \Sigma \Delta t \end{cases} \quad (7.7.8)$$

$$c_4 = \begin{cases} p_9 \Delta |F(0, 0)| \Delta t f_\Sigma(\theta) + p_{10} \Delta t^2 f_\Sigma^2(\theta) + \\ p_{11} \Delta t^2 f_\Sigma(\theta) + p_{17} \Delta |F(0, 0)| \Delta t + \\ p_{18} \Delta t^2 - p_{20} \Delta \Sigma \Delta t f_\Sigma(\theta) - p_{22} \Delta \Sigma \Delta t \end{cases} \quad (7.7.9)$$

De las imágenes capturadas, se extraen todos los datos de los que dependen las expresiones (7.7.1) y (7.7.5). Ambas expresiones tienen una única incógnita, por lo que cualquiera de ellas puede ser usada para estimar la distancia.

Lógicamente, si se comparan ambas propuestas atendiendo a la precisión en el ajuste de los parámetros, para el modelo de $\Delta\Sigma$ se obtendría menos error que para el modelo de $\Delta E_{r,\theta}$. Esto pudiera tenerse en cuenta y ponderar el aporte de cada una de ellas al cálculo de la distancia final, atendiendo a cuánta precisión se obtiene en el proceso de calibración.

Por el momento, sólo se han igualado ambas expresiones ((7.7.1) y (7.7.5)) y se ha resuelto la expresión resultante (ecuación (7.7.10)) para obtener el valor de D , sabiendo que $D = 1/d^2$.

$$c_1 D^3 + (c_2 - a_1) D^2 + (c_3 - a_2) D + (c_4 - a_3) = 0 \quad (7.7.10)$$

De la resolución de (7.7.10) se obtienen 3 raíces, se desprecian las raíces negativas y complejas, y de las posibles raíces reales y positivas, se escoge la mayor.

Utilizando las mismas imágenes usadas en la calibración, se comprobó el funcionamiento de la expresión final para la estimación de la distancia (ecuación (7.7.10)), con el objetivo de representar gráficamente el comportamiento del valor absoluto de la expresión (7.7.10) en el rango desde 1000 a 3500mm. En la Figura 7.7.1 se muestra dicho comportamiento.

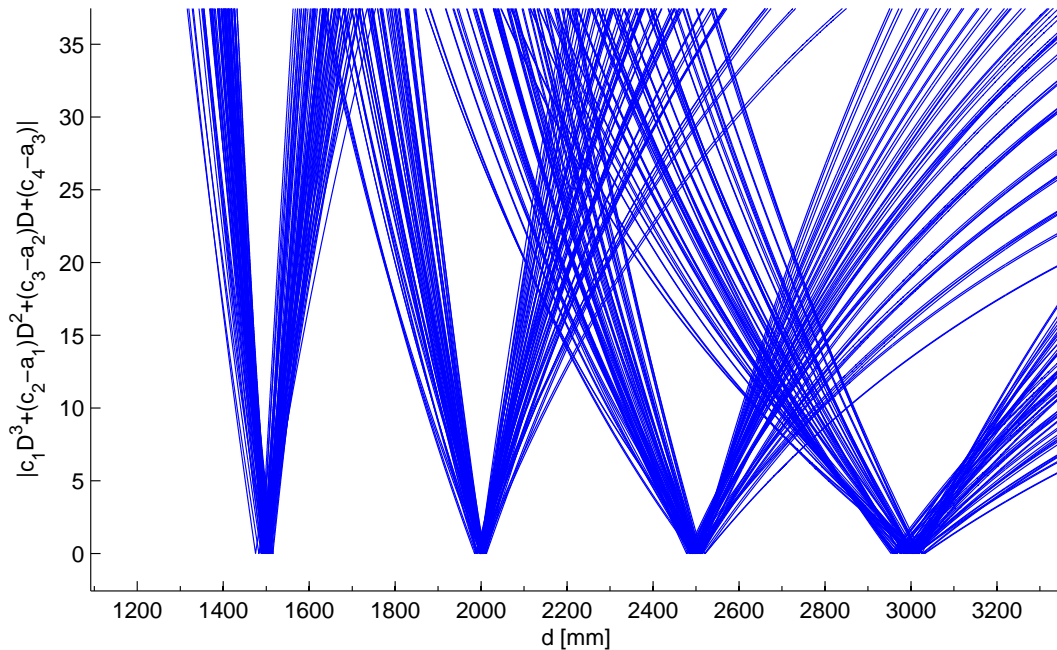


Figura 7.7.1: Valor absoluto de la expresión (7.7.10) en el rango de 1000 a 3500 mm. Nótese cómo la función tiene ceros alrededor de los valores de distancias utilizados en la calibración.

La Figura 7.7.1 es una muestra representativa del comportamiento de la expresión (7.7.10) y donde se han superpuesto en la misma gráfica todas las condiciones analizadas. Puede verse en la figura que aparecen ceros alrededor de los valores de distancias usados en la calibración y que además puede medirse el valor de las dispersiones en la estimación de la distancias.

Para este caso, usando las mismas imágenes de calibración la dispersión en la medida de la distancia es 1 % del valor real de la distancia.

7.8. Metodología para optimización del ángulo de orientación y la distancia.

A partir de la ecuación para la energía acumulada por la cámara (7.6.1) y la ecuación de la desviación estándar de los valores de gris en la región de interés de la imagen de la baliza (7.6.3) se puede formar un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas para estimar conjuntamente la distancia entre la cámara y la baliza y la orientación de la baliza respecto a la cámara.

Las ecuaciones se resuelven utilizando Levenberg-Marquardt que utiliza como entrada para la optimización el valor del ángulo de orientación y la distancia que es la mayor de las raíces reales positivas de la ecuación (7.7.10).

Está claro que para el valor del ángulo de orientación estimado, el cual es un valor aproximado de la orientación de la baliza respecto a la cámara se obtiene entonces, un valor aproximado de la distancia, en este caso es el valor de distancia que coincide con el cero de la expresión (7.7.10) evaluada para el ángulo de orientación suministrado por el método de la elipse estimada.

Ambos valores: el ángulo de orientación y la distancia serán soluciones aproximadas, por lo tanto, se ha decidido utilizar estos valores como entradas de un algoritmo de optimización que calcule los valores del ángulo de orientación de la baliza y la distancia entre la cámara y la baliza, tal que se minimice el error entre las variables ΔE_r y $\Delta \Sigma$ medidas y teóricas, respectivamente.

En las Figuras 7.8.1, 7.8.2 y 7.8.3 se muestran las funciones objetivo que pertenecen al modelo considerando tres distancias y ángulos, además se representa el mínimo valor de la función objetivo para cada caso.

En la Figura 7.8.1 ha sido obtenida para las ecuación de la energía relativa acumulada por la cámara y la desviación estándar, para una distancia de 1600 mm, un ángulo de orientación de 30 y para un $\Delta t = 28$ ms. Nótese que en la Figura se muestra una curva en el plano θ - d que se corresponde con el valor mínimo de cada ecuación y que el punto mínimo está cercano a los valores que se utilizaron para generarla.

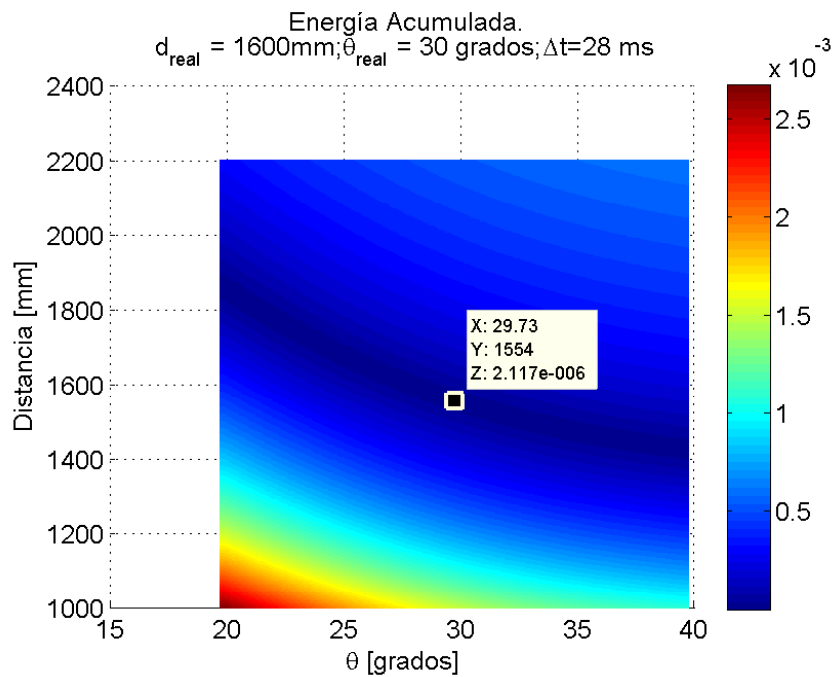
Igualmente, la Figura 7.8.2 se han representado las ecuaciones para ΔE_r y $\Delta \Sigma$ considerando $d = 2100$ mm, $\theta = 20$ grados y $\Delta t = 27$ ms. De igual forma que en la Figura 7.8.1 se ha seleccionado el valor mínimo en cada caso.

Un procedimiento similar se ha realizado para generar la Figura 7.8.3, en este caso considerando $d = 3000$ mm, $\theta = 30$ grados y $\Delta t = 29$ ms.

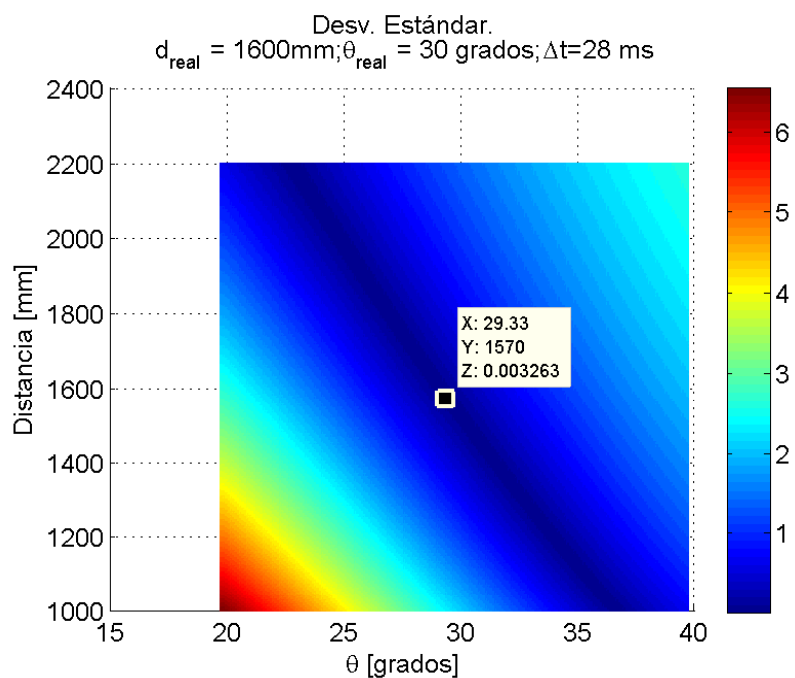
Por lo tanto, con el ángulo de orientación inicial, que se ha obtenido a partir de la elipse estimada y la distancia obtenida a partir de (7.7.10), se resuelve el sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} \Delta E_r^{Medido} - \Delta E_r^{teor}(\mathbf{x}, \mathbf{Y}_{\mathbf{E}_r}) &= 0 \\ \Delta \Sigma^{Medido} - \Delta \Sigma^{teor}(\mathbf{x}, \mathbf{Y}_{\Sigma}) &= 0 \end{aligned} \tag{7.8.1}$$

donde $\mathbf{x} = [\theta, d]^t$, son las incógnitas del sistema, $\mathbf{Y}_{\mathbf{E}_r}$ representa los datos que contienen los parámetros q_i de la ecuación de energía relativa, las diferencias de tiempos de exposición y $\Delta|F(0,0)|$, a su vez \mathbf{Y}_{Σ} contiene los parámetros p_i , las diferencias de tiempos de exposición y los valores para $\Delta|F(0,0)|$.



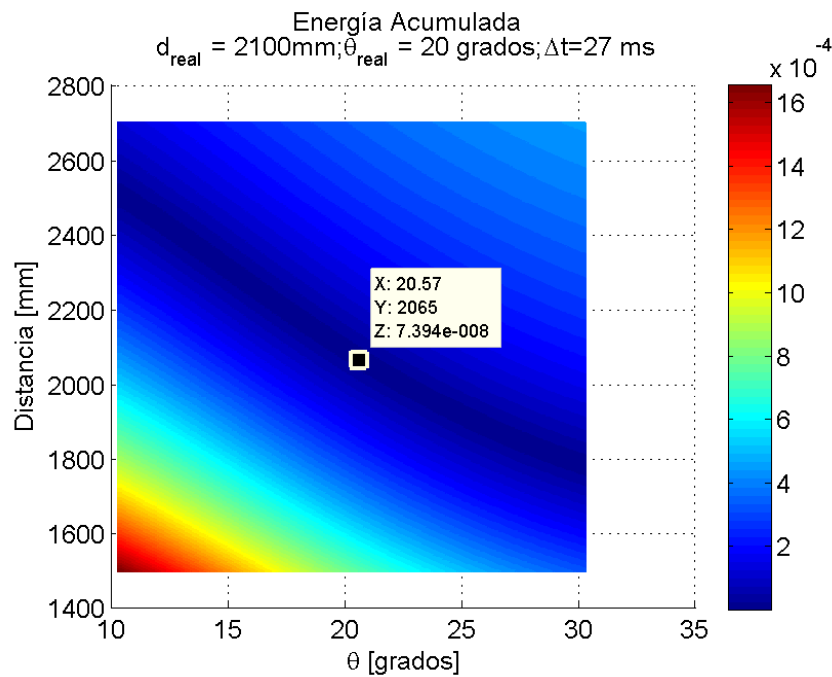
(a)



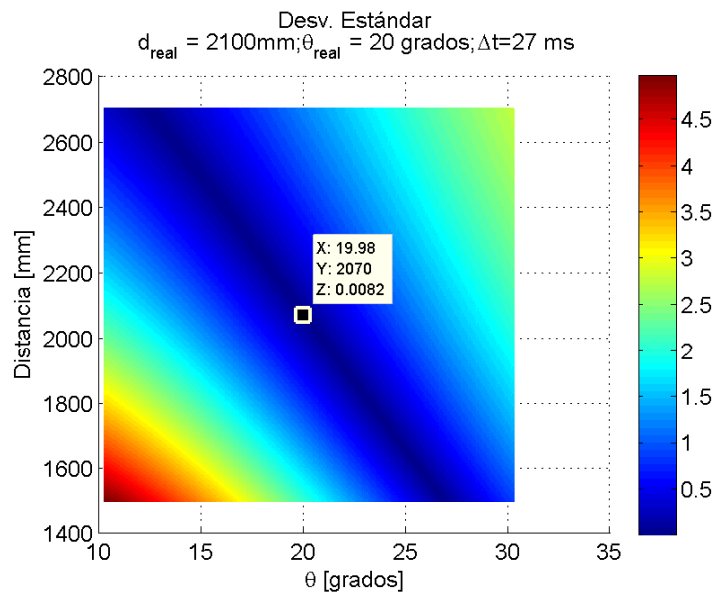
(b)

Figura 7.8.1: Comportamiento de las ecuaciones que pertenecen al modelo independiente para la distancia real de 1600 mm, un ángulo de orientación en la baliza de 30 grados $\Delta t = 28 \text{ ms}$.

En la Figura 7.8.4 se muestra la diagrama de flujo de la metodología de medida que se propone en esta tesis.



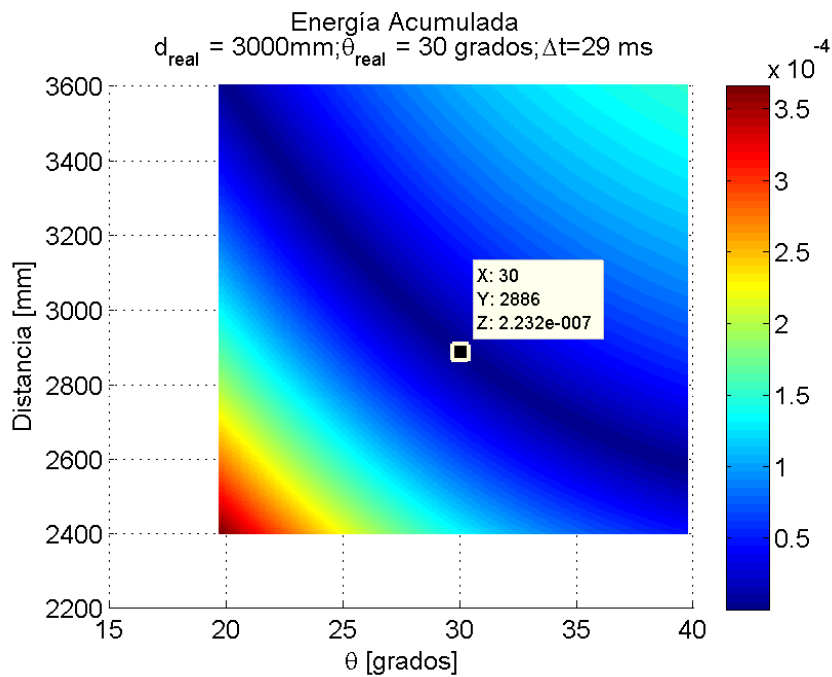
(a)



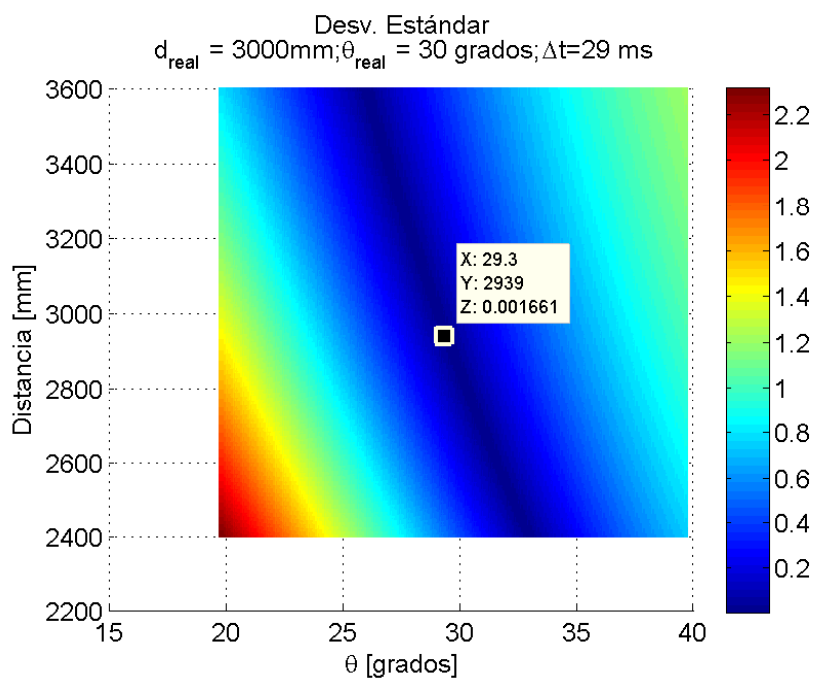
(b)

Figura 7.8.2: Comportamiento de las ecuaciones que pertenecen al modelo independiente para la distancia real de 2100 mm, un ángulo de orientación en la baliza de 20 grados $\Delta t = 27\text{ms}$.

En cada posición, para la cuál se desea medir la distancia entre la cámara y la baliza, se captura una imagen de referencia con un tiempo de exposición t_r y una segunda imagen con un tiempo de exposición t_j . A partir de ésta última imagen se detectan los puntos de borde y se extrae la elipse estimada. Usando la elipse se calculan los ángulos de inclinación de la baliza respecto a la cámara (θ y ϕ).



(a)



(b)

Figura 7.8.3: Comportamiento de las ecuaciones que pertenecen al modelo independiente para la distancia real de 3000 mm, un ángulo de orientación en la baliza de 30 grados $\Delta t = 29 \text{ ms}$.

De las dos imágenes capturadas se extraen sus correspondientes valores de energía relativa acumulada por la cámara, desviación estándar de los valores de gris en la mancha y la componente continua de la FFT.

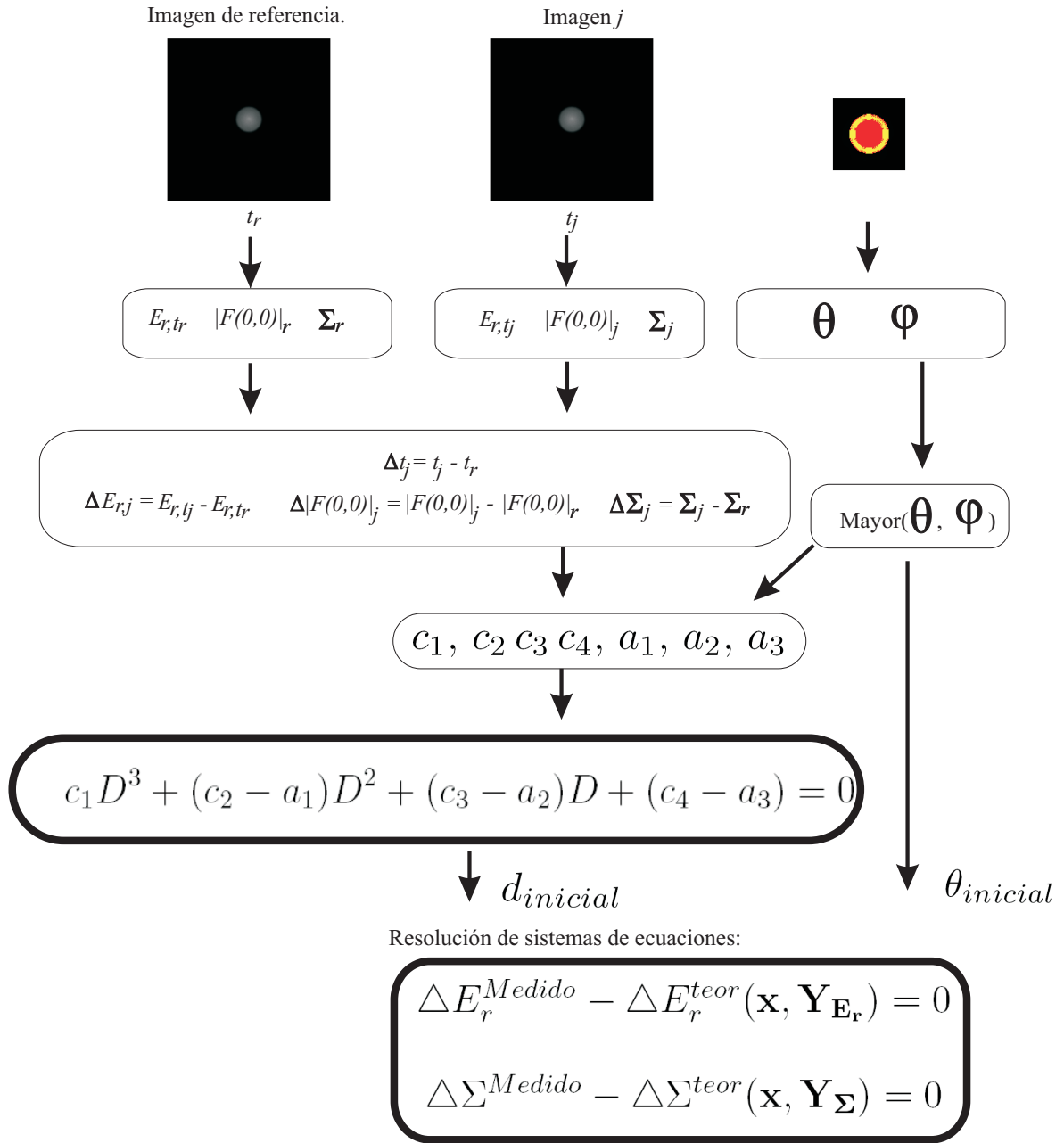


Figura 7.8.4: Metodología de cálculo de la distancia entre una cámara y una baliza circular de infrarrojos y el ángulo de orientación relativa, a partir de los valores de gris de imágenes captadas con diferentes tiempos de exposición, independiente de la intensidad radiante de la baliza.

Se calculan las diferencias Δt , ΔE_r , $\Delta |F(0,0)|$ y $\Delta \Sigma$, respectivamente y utilizando el mayor de los ángulos de orientación se obtienen los coeficientes c_1 , c_2 , c_3 , c_4 , a_1 , a_2 y a_3 . Con estos coeficientes se calculan las raíces del polinomio mostrado en la expresión (7.7.10) y se obtiene el valor para $d_{inicial}$.

Posteriormente, el valor de la distancia estimada ($d_{inicial}$) y el mayor de los ángulos obtenidos por la elipse estimada ($\theta_{inicial}$) se utilizan como entradas para la minimización de las ecuaciones (7.8.1).

7.9. Conclusiones.

En este capítulo se ha descrito el proceso para independizar la propuesta de medida de distancias de la intensidad radiante (corriente de polarización) de la baliza.

Este proceso llevó a cabo la búsqueda de nuevas variables que se extraen de las imágenes y su correspondiente relación con el tiempo de exposición en la cámara, la distancia entre la baliza y el dispositivo de visión, la orientación de la baliza y su intensidad radiante.

Si bien otros métodos o medidas empíricas pueden relacionarse directamente con la distancia y manteniendo una independencia de los demás parámetros, se prefirió usar solamente la información de los valores de gris, para confirmar la hipótesis de que a partir de la distribución de los valores de gris pueden extraerse restricciones matemáticas suficientes para implementar algoritmos de medidas cuantitativas en el sistema cámara-baliza de infrarrojo.

En este sentido se han propuesto dos parámetros empíricos que se extraen de las imágenes de la baliza, los cuales son: la componente continua de la FFT de las imágenes, y la desviación estándar de los valores de gris en la región de interés. Cada uno de ellos ha sido analizado en detalle y se han propuesto dos alternativas que relacionan los parámetros empíricos extraídas de las imágenes de la baliza con el tiempo de exposición, la intensidad radiante y orientación de la baliza; así como con la distancia que separa a la baliza de la cámara.

Se ha demostrado, tanto experimentalmente como analíticamente, que los indicadores encontrados pueden modelarse mediante una función lineal del tiempo de exposición, una función lineal de la corriente de polarización y una función lineal del patrón de radiación, suponiendo a éste último como una función gaussiana.

En cuanto a la distancia, se ha demostrado que la desviación estándar de los niveles de gris en la región de interés que contiene la imagen de la baliza se puede modelar mediante una función cuadrática del inverso de la distancia entre la cámara y la baliza al cuadrado, mientras que para la componente de continua la distancia se ha modelado mediante una relación lineal con el inverso de la distancia entre la cámara y la baliza al cuadrado.

Añadiendo a estas dos alternativas estudiadas en este capítulo, la alternativa de la energía relativa acumulada por la cámara (Capítulo 4), se ha definido un problema que desde el punto de vista matemático está compuesto por tres ecuaciones y tres incógnitas. Las incógnitas son: la distancia entre la cámara y la baliza, la intensidad radiante de la baliza y la orientación relativa de la baliza.

De la ecuación para $|F(0,0)|$ se ha despejado la intensidad radiante y se ha sustituido en las demás ecuaciones, de manera que el sistema final se compone de 2 ecuaciones independientes de la intensidad radiante y que tienen dos incógnitas: la distancia y la orientación de la baliza,

El cálculo de la intensidad radiante, en este caso, no aporta ningún beneficio en nuestra propuesta, porque el objetivo primordial es estimar la distancia entre la cámara y la baliza de infrarrojos y el ángulo de orientación de la baliza, por consiguiente se decidió prescindir del cálculo de la intensidad radiante.

Se ha propuesto un método de calibración, en el que se calculan los valores para cada uno de los parámetros de las ecuaciones que integran el modelo y se muestran sus correspondientes resultados.

El cálculo para la distancia entre la cámara y la baliza, y la orientación relativa de la última respecto a la cámara se ha utilizado un algoritmo de optimización que resuelve un sistema de dos ecuaciones con dos incógnitas

Por tanto, se puede resumir, que en este capítulo se propone un modelo independiente de la intensidad radiante de la baliza, y que es una alternativa para el cálculo de la distancia que separa a una cámara de una baliza circular de infrarrojo.

Capítulo 8

Validación experimental

8.1. Introducción.

En los capítulos anteriores se han propuesto algunas alternativas para la medida de la distancia entre una cámara y una baliza de infrarrojo, mediante la información que se extrae de los valores de gris de las imágenes. En el proceso de desarrollo de estas alternativas se han presentado algunos resultados que confirman la hipótesis de que extraer información útil, para la medida de la distancia a partir de los valores de gris, es una idea viable en determinadas condiciones (Ver Tabla 4.2.1, Figura 4.3.3, Figura 4.3.4, Figura 4.4.5).

En este capítulo se muestran los resultados experimentales que validan cada una de las alternativas de medida que se han propuesto a lo largo de la tesis.

Las magnitudes utilizadas en el desarrollado son: la energía relativa acumulada por la cámara (que se calcula a partir de la respuesta radiométrica de la cámara), la componente continua de la FFT de las imágenes de la baliza y la desviación estándar de los valores de gris en la región de interés que contiene la imagen de la baliza.

Por otro lado se ha propuesto una metodología que utiliza los tres parámetros anteriores para crear un modelo definitivo independiente de la intensidad radiante de la baliza y que permita obtener medidas de la distancia entre la cámara y la baliza y el ángulo de orientación de esta última respecto a la cámara.

En los experimentos de este capítulo se han utilizado la cámara Basler A622f (tecnología CMOS) [87] y los emisores SFH 4200 [88] y el SFH 4231[90]. Ambos emisores tienen un patrón de radiación lambertiano que permite considerar ángulos de orientación de hasta 40 grados, que, en futuras aplicaciones para posicionamiento de robots garantizará una “visibilidad” adecuada para la baliza.

En la reformulación del modelo para incluir el ángulo de orientación de la baliza se ha construido una baliza circular que permite que en la cámara se obtenga una imagen más grande que la que se obtiene con el emisor solo y facilitar la estimación de los ángulos de orientación. Por tal motivo se utilizó un difusor circular de 2,5 cm de radio delante del emisor. El difusor provoca una atenuación en la energía que recibe la cámara, lo que se ha compensado usando el emisor SFH 4231[90] que suministra mayor intensidad radiante.

8.2. Modelo de la energía relativa acumulada por la cámara.

En el Capítulo 4 se ha definido un modelo para la energía relativa acumulada por la cámara (E_r). En la definición de este modelo se demostró que E_r puede aproximarse mediante el producto de unas funciones lineales del tiempo de exposición, la intensidad radiante del emisor y el inverso de la distancia al cuadrado.

Para utilizar la función propuesta para E_r se requiere de un proceso de calibración en el que se calculen los valores para los parámetros del modelo. Para este caso en el proceso de calibración se utilizaron 108 imágenes distribuidas en distintas condiciones tanto de corrientes de polarización, de tiempos de exposición, así como de distancias entre la cámara y la baliza.

Específicamente las imágenes usadas para la calibración del modelo de E_r se han distribuido de la siguiente forma: se han fijado 3 corrientes de polarización, por cada corriente se han analizado 4 distancias y por cada corriente y distancia se han capturado 9 imágenes con diferentes tiempos de exposición en la cámara. En todos los casos se ha asegurado que la cámara y la baliza estén alineadas y enfrentadas.

Los datos de calibración se resumen en la Tabla 8.2.1.

Tabla 8.2.1: Datos usados para calibrar el modelo de energía acumulada por la cámara.

Datos de Calibración	
Distancias [cm]	400; 350; 300; 250
Corrientes de polarización [mA]	3; 5; 7
Tiempos de Exposición [ms]	3; 4; 5; ...; 11

Una vez que se han obtenido los valores para los parámetros del modelo de E_r , éste se ha utilizado para la medida de la distancia.

El experimento considera el rango de distancias de 200 a 380 cm para estimar la distancia, y se ha utilizado la metodología de diferencias entre imágenes captadas con diferentes tiempos de exposición. Se ha elegido un tiempo de exposición de referencia $t_r = 2$ ms y se capturaron 7 imágenes con tiempos de exposición $t_j = 8, \dots, 14$ ms. Los resultados de la estimación de distancias para cada una de las diferencias se muestran en la Figura 8.2.1 que pone de manifiesto que la metodología de diferencias entre la energía acumulada en imágenes captadas con diferentes tiempos de exposición es bastante precisa.

El valor final para la distancia estimada se ha calculado mediante el promedio de las 7 estimaciones anteriores. Los resultados finales, así como los errores en la estimación de distancias se muestran en la Tabla 8.2.2.

En el Capítulo 4 se demostró que la precisión en la estimación de la distancia depende de la selección de los tiempos de exposición que se utilicen en la captura de las imágenes.

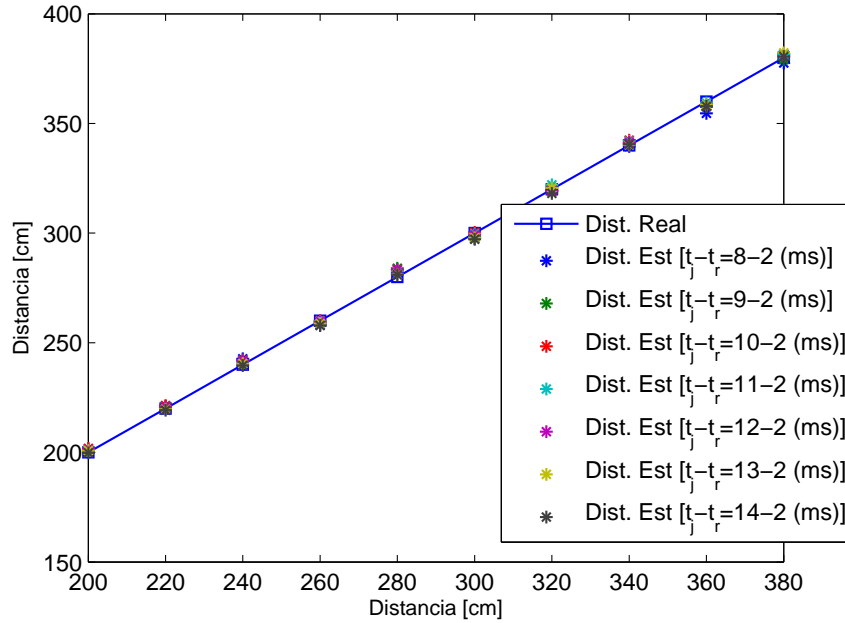


Figura 8.2.1: Resultados en la estimación de distancias a partir del modelo de E_r mediante el método de diferencias de imágenes captadas con diferentes tiempos de exposición.

En el experimento anterior los tiempos t_j pertenecen al rango de tiempos óptimos, en los cuales el error en la estimación de distancias es mínimo.

Posteriormente se ha considerado un rango mayor de distancias manteniendo la condición de que la cámara y la baliza de infrarrojos se encuentren alineadas y enfrentadas. Para este caso se han capturado imágenes en el rango de distancias de 400 cm a 600 cm.

Tabla 8.2.2: Estimación de distancias usando el mecanismo de diferencias propuesto en (4.3.7).

Dist. Real [cm]	Dist. Est. [cm]	Error Abs. [cm]	Error Rel. [%]
200	200.9	0.9	0.4
220	220.6	0.6	0.3
240	241.7	1.7	0.7
260	258.9	1.1	0.4
280	282.5	2.5	0.9
300	298.4	1.6	0.5
320	319.6	0.4	0.1
340	340.9	0.9	0.3
360	358.0	2.0	0.6
380	380.6	0.6	0.1

A partir de la metodología de diferencias de imágenes captadas con tiempos de exposición diferentes se ha realizado la medida de la distancia entre la cámara y la baliza, considerando las mismas diferencias de tiempos que se utilizaron para la Figura 8.2.1. El valor final para la distancia estimada se calcula promediando las estimaciones correspondientes para estas diferencias de tiempos de exposición.

Los resultados finales así obtenidos, como los errores absolutos y relativos se presentan en la Tabla 8.2.3.

Tabla 8.2.3: Estimación de distancias usando el mecanismo de diferencias propuesto en (4.3.7).

Dist. Real [cm]	Dist. Est. [cm]	Error Abs. [cm]	Error Rel. [%]
400	408.0	8.0	2.0
420	426.0	6.0	1.4
440	446.4	6.4	1.4
460	467.8	7.8	1.7
480	486.2	6.2	1.3
500	504.9	4.9	1.0
520	527.5	7.5	1.5
540	548.1	8.1	1.5
560	567.1	7.1	1.3
580	581.2	1.2	0.2
600	610.4	10.4	1.7

En general, en ambos rangos de distancias en que se probó el modelo para E_r los errores en la estimación de distancias están por el momento por debajo de 10 cm, con lo cual se demuestra la validez del modelo como una alternativa de medida de distancias para el sistema cámara/baliza de infrarrojo.

8.2.1. Selección de tiempos óptimos.

La precisión en la estimación de la distancia usando el modelo para E_r que se propone en el Capítulo 4 depende de la selección de las diferencias de tiempos de exposición para realizar la medida de la distancia. Por lo tanto, si se usan solamente los tiempos óptimos en la medida de distancias, entonces es posible disminuir la cantidad de imágenes necesarias para obtener el valor final de la distancia con la mayor precisión posible.

Por tal motivo se ha propuesto una metodología de calibración que calcula los parámetros del modelo, y además estima los valores para las diferencias de tiempos de exposición donde se obtendrían las mejores estimaciones de distancias.

Para comprobar experimentalmente el método de selección de tiempos óptimos se implementado el proceso de calibración considerando los siguientes datos en la Tabla 8.2.4:

Tabla 8.2.4: Datos utilizados en la calibración del modelo.

Datos de Calibración.	
Distancias [cm]	440; 560; 680; 720; 800
Corrientes de polarización [mA]	5; 7; 8; 9; 10
Tiempos de exposición [ms]	6; 7; 8; ...; 21

Los valores presentados en la Tabla 8.2.4 representan una secuencia de imágenes que se conforma capturando por cada distancia y corriente 11 imágenes correspondiente a cada uno de los tiempos mostrados. En total se procesan 220 imágenes para calcular los coeficientes del modelo.

Indicar que adicionalmente además de los tiempos de exposición mostrados en la Tabla 8.2.4, también se capturaron imágenes con otros tiempos para tener suficientes datos para generar las curvas de bañera del proceso de calibración. Aunque para el cálculo de los parámetros del modelo solamente se usaron los que se muestran en la Tabla 8.2.4.

Para este experimento el proceso de calibración y de selección de tiempos de exposición óptimos para la medida de distancia sugiere que los tiempos de exposición que deben usarse son: $t_j = 18, 20, 22$ y 24 ms con $t_r = 2$ ms, con lo cual, las diferencias en tiempos de exposición serían: $\Delta t_j = 16, 18, 20$ y 22 ms.

Una vez obtenidos los valores de los parámetros del modelo y los tiempos de exposición óptimos se capturaron imágenes considerando el rango de distancias entre la cámara y la baliza de 440 cm a 800 cm, con varias corrientes de polarización de la baliza. El valor final de la distancia estimada se calcula mediante el promedio de los valores estimados para cada diferencia de tiempos óptimos.

En la Tabla 8.2.5 se muestran los valores finales de la distancia estimada para cada corriente de polarización usada en el experimento.

Tabla 8.2.5: Estimación final de la distancia, para diferentes corrientes de polarización en el emisor rango de 440 a 800 cm.

Dist. Real[cm]	Distancia Estimada. [cm]				
	$I_0 = 5\text{mA}$	$I_0 = 7\text{mA}$	$I_0 = 8\text{mA}$	$I_0 = 9\text{mA}$	$I_0 = 10\text{mA}$
440	434.2	434.2	435.3	439.1	438.2
480	481.3	475.3	481.8	482.5	485.0
520	531.0	526.6	527.4	522.7	525.4
560	566.1	573.1	568.3	568.5	566.7
600	601.6	609.7	619.9	617.2	613.9
640	652.0	643.7	657.4	647.0	655.4
680	677.4	695.3	695.6	686.4	692.0
720	739.3	733.6	740.1	724.2	729.3
760	776.3	761.4	770.5	756.8	754.8
800	836.9	785.4	799.1	781.3	777.6

Como prueba complementaria de este experimento se ha decidido capturar imágenes para valores de distancias de 420 a 740 cm (no usadas en calibración) con incrementos de 40 cm.

Se usaron los mismos parámetros del proceso de calibración anterior e incluso las imágenes para la medida fueron capturadas en diferentes días. Los resultados para este caso se muestran en la Tabla 8.2.6.

Tabla 8.2.6: Estimación final de la distancia para diferentes corrientes de polarización en el emisor rango de 460 a 740 cm.

Dist. Real [cm]	Distancia Estimada. [cm]				
	$I_0 = 5\text{mA}$	$I_0 = 7\text{mA}$	$I_0 = 8\text{mA}$	$I_0 = 9\text{mA}$	$I_0 = 10\text{mA}$
460	467.7	467.6	469.2	470.9	467.9
500	494.8	513.7	514.1	507.2	511.9
540	525.0	548.1	557.2	556.1	553.2
580	561.2	578.2	601.7	592.5	603.6
620	605.5	612.7	633.9	620.7	630.5
660	651.6	653.7	660.5	655.0	657.7
700	686.2	693.0	705.3	690.9	702.1
740	733.4	719.7	741.6	731.2	730.3

Los errores en la estimación de la distancia mediante el modelo de E_r aplicando la metodología de tiempos óptimos, para los dos conjuntos de valores de distancias, se muestran en las Tablas 8.2.7 y 8.2.8, respectivamente.

Tabla 8.2.7: Error relativo en la estimación de distancias en el rango de 400 a 800 cm, usando solamente los tiempos óptimos.

Dist. Real[cm]	Error Relativo [%]				
	$I_0 = 5\text{mA}$	$I_0 = 7\text{mA}$	$I_0 = 8\text{mA}$	$I_0 = 9\text{mA}$	$I_0 = 10\text{mA}$
440	1,3	1,3	1,1	0,2	0,4
480	0,3	1,0	0,4	0,5	1,0
520	2,1	1,3	1,4	0,5	1,0
560	1,1	2,3	1,5	1,5	1,2
600	0,3	1,6	3,3	2,9	2,3
640	1,9	0,6	2,7	1,1	2,4
680	0,4	2,2	2,3	0,9	1,8
720	2,7	1,9	2,8	0,6	1,3
760	2,1	0,2	1,4	0,4	0,7
800	4,6	1,8	0,1	2,3	2,8

Como puede verse en las Tablas 8.2.7 y 8.2.8, a excepción de la distancia de 800 cm con $I_0 = 5\text{mA}$, la mayoría de los errores de la distancia estimada con respecto al valor real en ambos rangos, están por debajo de un 4%, lo cual es un resultado aceptable en esta alternativa. El error promedio para todas las corrientes que se han considerado y todas las distancias está por debajo del 2%.

8.3. Modelo de la componente continua de la FFT de las imágenes de la baliza.

Tabla 8.2.8: Error relativo en la estimación de distancias en el rango de 460 a 740 cm, usando solamente los tiempos óptimos.

Dist. Real [cm]	Error Relativo [%]				
	$I_0 = 5\text{mA}$	$I_0 = 7\text{mA}$	$I_0 = 8\text{mA}$	$I_0 = 9\text{mA}$	$I_0 = 10\text{mA}$
460	1,7	1,6	2,0	2,4	1,7
500	1,0	2,7	2,8	1,4	2,4
540	2,8	1,5	3,2	3,0	2,4
580	3,2	0,3	3,7	2,2	4,1
620	2,3	1,2	2,2	0,1	1,7
660	1,3	1,0	0,1	0,8	0,3
700	2,0	1,0	0,8	1,3	0,3
740	0,9	2,7	0,2	1,2	1,3

8.3. Modelo de la componente continua de la FFT de las imágenes de la baliza.

La componente de continua de la FFT de las imágenes ($|F(0,0)|$) es otro de los parámetros que se proponen como modelo del sistema cámara-baliza para la medida de la distancia que los separa.

Para validar experimentalmente esta alternativa se han utilizado las mismas imágenes con las que se realizaron los experimentos anteriores. Es decir, las imágenes han sido tomadas en el rango de distancias de 440 a 800 cm, dividido en dos conjuntos: el primero de 440 a 800 y el segundo de 420 a 760 cm; ambos con incrementos de 40 cm.

En primer lugar se calcularon los coeficientes del modelo utilizando los datos de calibración mostrados en la Tabla 8.2.4. Estos datos de calibración representan una secuencia de 220 imágenes, y cada una de ellas se aporta una ecuación, mediante la que se han obtenido los coeficientes del modelo.

Atendiendo al análisis de tiempo óptimos para todas las diferencias de tiempos de exposición no se obtienen la misma precisión, sino que existe un rango de diferencias de tiempos donde el ajuste del modelo es mucho mejor y por tanto las estimaciones de distancias serán más precisas. Para el caso de este experimento, los tiempos óptimos se encuentran entre 12 y 17 ms tomando como tiempo de referencia 2ms, lo que darían diferencias de tiempos de exposición que van desde 10 a 15ms.

Por lo tanto, teniendo en cuenta los tiempos óptimos, el algoritmo en este experimento utiliza 7 imágenes capturadas con los tiempos 12, 13, 14, 15, 16, y 17, además de la imagen correspondiente al tiempo de referencia (2ms). De estas imágenes se calculan 6 valores de distancia estimada. El valor final para la distancia estimada será el promedio de estas 6 estimaciones anteriores.

En la Tabla 8.3.1 se muestra el resultado en la estimación de la distancia a partir de la alternativa de la componente continua de la FFT, mediante una metodología diferencial y usando solamente los tiempos óptimos; para el primer conjunto de distancias utilizadas en el experimento.

A su vez, el resultado final para las imágenes correspondiente al segundo conjunto se muestra en la Tabla 8.3.2. En este caso se han utilizado los mismos coeficientes del modelo y los mismos tiempos de exposición óptimos.

Tabla 8.3.1: Distancia final estimada mediante la alternativa de $|F(0,0)|$ con la metodología de diferencias en el rango de distancias de 440 a 800 cm.

Distancia Real [cm]	Distancias Estimadas [cm]			
	$I_0 = 7\text{mA}$	$I_0 = 8\text{mA}$	$I_0 = 9\text{mA}$	$I_0 = 10\text{mA}$
440	438.3	433.0	435.0	437.4
480	473.6	473.3	470.5	471.0
520	513.9	514.0	515.5	513.9
560	552.8	553.6	554.8	554.0
600	595.3	589.8	595.4	592.5
640	633.8	627.0	628.6	636.3
680	679.7	685.1	675.5	683.6
720	724.3	706.6	721.1	717.5
760	754.9	754.8	764.4	758.5
800	803.3	806.9	810.9	799.2

Los errores de la estimación de la distancia para ambos conjuntos de distancias se muestran en las Tablas 8.3.3 y 8.3.4.

En ambos conjuntos de distancias, los errores relativos en la distancia estimada están por debajo de 2,5 %, en ambos rangos de distancias considerados y para todas las corrientes de polarización el error relativo promedio es menor del 1 %, demostrando la validez de esta alternativa.

Tabla 8.3.2: Distancia final estimada mediante la alternativa de $|F(0,0)|$ con la metodología de diferencias en el rango de distancias de 420 a 740 cm.

Distancia Real [cm]	Distancia Estimada [cm]			
	$I_0 = 7\text{mA}$	$I_0 = 8\text{mA}$	$I_0 = 9\text{mA}$	$I_0 = 10\text{mA}$
420	429.1	424.7	426.0	423.4
460	461.5	460.9	461.5	458.5
500	499.3	497.1	500.2	498.7
540	540.9	542.8	539.9	538.7
580	586.2	586.2	582.5	585.8
620	618.4	628.0	623.6	619.7
660	663.6	663.2	662.7	667.4
700	713.8	708.5	707.6	714.0
740	745.8	754.4	759.2	758.4

Tabla 8.3.3: Error relativo en la estimación de la distancia usando la alternativa de componente continua, en el rango de 440 a 800 cm.

Distancia Real [cm]	Error relativo [%]			
	$I_0 = 7\text{mA}$	$I_0 = 8\text{mA}$	$I_0 = 9\text{mA}$	$I_0 = 10\text{mA}$
440	0.4	1.6	1.1	0.6
480	1.3	1.4	2.0	1.9
520	1.2	1.2	0.9	1.2
560	1.3	1.1	1.0	1.1
600	0.8	1.7	0.8	1.2
640	1.0	2.0	1.8	0.6
680	0.1	0.8	0.7	0.5
720	0.6	1.9	0.2	0.3
760	0.7	0.7	0.6	0.2
800	0.4	0.9	1.4	0.1

Tabla 8.3.4: Error relativo en la estimación de la distancia usando la alternativa de componente continua, en el rango de 420 a 740 cm.

Distancia Real [cm]	Error relativo [%]			
	$I_0 = 7\text{mA}$	$I_0 = 8\text{mA}$	$I_0 = 9\text{mA}$	$I_0 = 10\text{mA}$
420	2.2	1.1	1.4	0.9
460	0.3	0.2	0.3	0.3
500	0.1	0.6	0.1	0.3
540	0.2	0.5	0.1	0.2
580	1.0	1.0	0.4	1.0
620	0.3	1.3	0.6	0.1
660	0.6	0.5	0.4	1.1
700	2.0	1.2	1.1	2.0
740	0.8	2.0	2.1	2.5

8.4. Modelo de la desviación estándar de los valores de gris.

Otro de los indicadores que se modela a partir de las magnitudes que afectan la energía en la superficie del sensor es la desviación estándar de los valores de gris en la región de interés que contiene la imagen del emisor (Σ). A partir del modelo que se propone para este indicador, se requiere validarlo como posible alternativa para la medida de distancias, considerando que la cámara está alineada con la baliza y que ambas están enfrentadas. Para ello se utiliza el primer conjunto de distancias del rango de 440 a 800 cm.

En este experimento, se han utilizado los datos de calibración de la Tabla 8.2.4. De forma similar a los experimentos realizados con E_r y $|F(0,0)|$, se han calculado los coeficientes del modelo y además se han seleccionado 10 diferencias de tiempos de exposición para obtener la estimación final de la distancia. Para este experimento se ha

asumido el rango de tiempos de exposición ($t_j = 10, \dots, 20\text{ms}$) como tiempos óptimos.

En este caso se han utilizado 10 imágenes por cada distancia, de las cuales se obtienen igual número de estimaciones de distancias. El valor final para la distancia estimada es el promedio de las 10 estimaciones anteriores.

Los valores finales de la distancia estimada para este experimento se muestran en la Tabla 8.4.1.

Tabla 8.4.1: Resultados en la medida de distancia mediante el modelo de la desviación estándar de los valores de gris en la región de interés que contiene la imagen de la baliza, para el rango de 440 a 800 cm.

Distancia Real [cm]	Distancia Estimada [cm]				
	$I_0 = 5\text{mA}$	$I_0 = 7\text{mA}$	$I_0 = 8\text{mA}$	$I_0 = 9\text{mA}$	$I_0 = 10\text{mA}$
440	440,2	442,5	444,8	456,0	461,0
480	481,4	462,9	466,4	481,3	489,5
520	526,7	502,2	500,9	501,0	501,8
560	567,3	547,7	540,4	537,0	533,3
600	609,0	594,4	588,9	587,9	580,2
640	647,3	634,2	630,0	630,3	631,4
680	688,8	683,1	679,9	682,9	679,6
720	719,9	725,4	723,5	731,3	726,8
760	756,7	764,0	768,5	775,1	785,3
800	786,9	809,9	818,8	831,7	837,2

El error en el proceso de estimación de la distancia final mediante este modelo se muestra en la Tabla 8.4.2.

Tabla 8.4.2: Error relativo en la estimación de distancias usando el modelo de desviación estándar para el rango de distancias de 440 a 800 cm.

Distancia Real [cm]	Error relativo [%]				
	$I_0 = 5\text{mA}$	$I_0 = 7\text{mA}$	$I_0 = 8\text{mA}$	$I_0 = 9\text{mA}$	$I_0 = 10\text{mA}$
440	0,05	0,57	1,09	3,64	4,77
480	0,29	3,56	2,83	0,27	1,98
520	1,29	3,42	3,67	3,65	3,50
560	1,30	2,20	3,50	4,11	4,77
600	1,50	0,93	1,85	2,02	3,30
640	1,14	0,91	1,56	1,52	1,34
680	1,29	0,46	0,01	0,43	0,06
720	0,01	0,75	0,49	1,57	0,94
760	0,43	0,53	1,12	1,99	3,33
800	1,64	1,24	2,35	3,96	4,65

Como se muestra en la Tabla 8.4.2 los errores en el proceso de medida en este rango de distancias están por debajo de un 5 %, y de 2 % de media para todas las corrientes y todas las distancias. Al igual que en los indicadores anteriores, la desviación estándar

puede considerarse como una alternativa útil para la medida de la distancia entre una cámara y una baliza alineadas y enfrentadas.

Los experimentos realizados con los indicadores $|F(0,0)|$ y Σ , así como los resultados obtenidos en la medida de distancias avalan su uso en el sistema cámara-baliza para el cálculo de la distancia. No obstante, la búsqueda de estos parámetros y su correspondiente relación con las magnitudes que influyen en la energía acumulada por la cámara, han motivado la necesidad de sobredimensionamiento del modelo de E_r , para posteriormente independizar la propuesta final de modelo de la intensidad radiante de la baliza y a su vez minimizar los errores en el valor final de la distancia estimada, debido a los errores en la estimación del ángulo de orientación de la baliza.

8.5. Resultados del modelo independiente.

En la sección 7.6 se ha descrito el procedimiento de calibración utilizado para obtener los parámetros de cada una de las ecuaciones que componen el modelo. Los datos usados en este ajuste se muestran en la Tabla 8.5.1.

Tabla 8.5.1: Datos de calibración para el modelo independiente.

Datos usados en la Calibración	
Tiempo de exposición	$t_r = 8\text{ms}$; $t_j = 30, 32, 34$ y 36ms
Corriente de polarización	475 y 500 mA
Distancias [mm]	1500, 2000, 2500, 3000
Ángulo de orientación	0, 5, 10, 15, 20, 25, 30 y 35 grados

En la validación experimental de la propuesta final de modelo para la estimación de la distancia entre una cámara y una baliza de infrarrojos, con independencia de la intensidad radiante de la baliza, se ha utilizado una plataforma controlable desde el ordenador, que permite variaciones en distancias desde 485 hasta 3195 mm. Además, permite el cambio en el ángulo de orientación mediante un sistema *pan-tilt* que va desde -49 a 49 grados en un ángulo y desde -30 a 30 en el otro.

La plataforma usada en el proceso de calibración y medida se muestra en el Figura 8.5.1.

Por otro lado, en los experimentos, además de la imagen de referencia capturada con $t_r = 8\text{ms}$, se consideraron los siguientes tiempos de exposición: $t_j = 30, 32, 34, 36, 38$ y 40ms ($j = 1, \dots, 6$), lo que resultaría en las siguientes diferencias: $\Delta t_j = 22, 24, 26, 28, 30$ y 32ms .

Una vez calibrado el modelo, (ver resultados en las Figuras 7.6.1, 7.6.2, 7.6.3 y 7.6.4), se realizaron varios experimentos que se describirán a continuación.

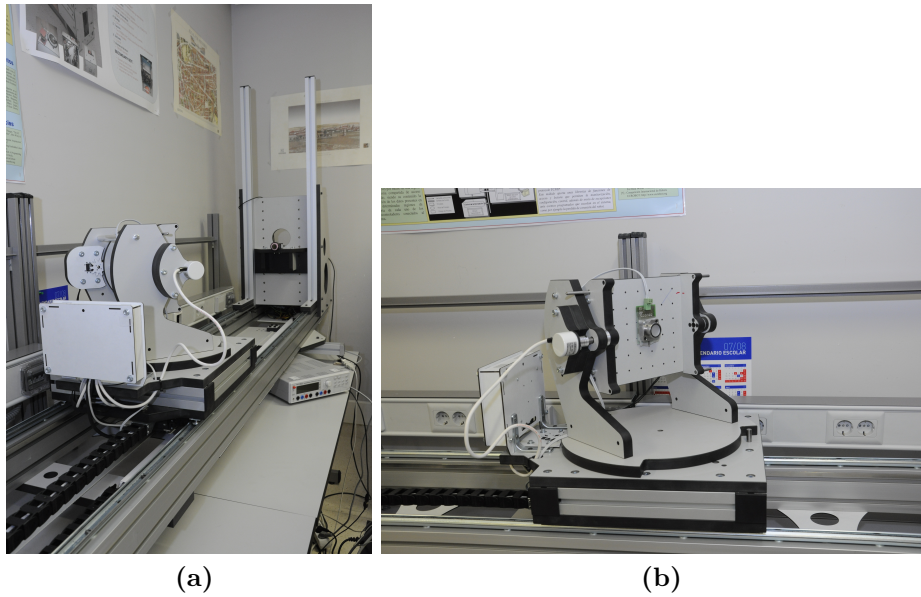


Figura 8.5.1: Plataforma controlable desde el ordenador para la validación práctica de la metodología de medida de distancias.

8.5.1. Estimación de distancias mediante modelo independiente de la corriente de polarización de la baliza.

Se ha considerado un rango de distancias desde 1500 a 2900 mm con incremento de 20 cm, considerando los ángulos de orientación de la baliza respecto a la cámara de 0, 10, 20 y 30 grados y una corriente de polarización fija. La Figura 8.5.2 muestra los resultados de la distancia estimada.

En la Figura 8.5.2 se superponen por cada distancia todas las distancias estimadas para todos los ángulos de orientación considerados y todas las diferencias de tiempos de exposición utilizadas en el experimento. Puede verse en esta Figura que la mayor cantidad de los puntos que representan la distancia estimada están alrededor de la distancia real. Por otro lado, a medida que aumenta la distancia la dispersión es mayor, lo que es consistente con el hecho de que disminuye la energía recibida de la fuente y por consiguiente decrece la relación señal a ruido y por tanto la probabilidad de error aumenta.

Una muestra más ilustrativa del comportamiento de la estimación de distancias puede hacerse si se representa gráficamente los valores estimados de distancias como una función de las diferencias de tiempos exposición. Esta representación se muestran en las Figuras 8.5.3, 8.5.4 y 8.5.5 que muestran el comportamiento de la estimación de distancias como una función de las diferencias de tiempos de exposición, y como en casos anteriores, existe unos tiempos de exposición donde la precisión es mejor.

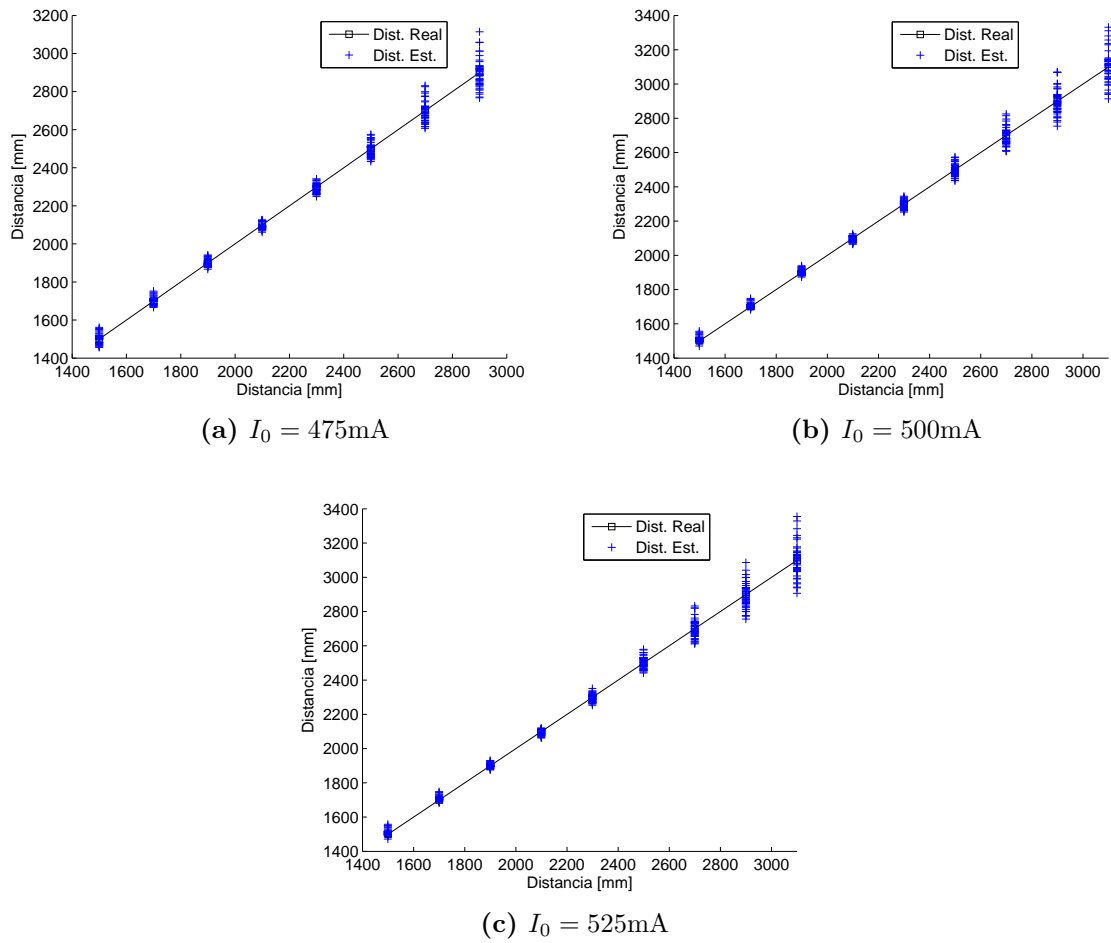


Figura 8.5.2: Resultados en la estimación de distancias usando la metodología independiente para tres corrientes de polarización diferentes.

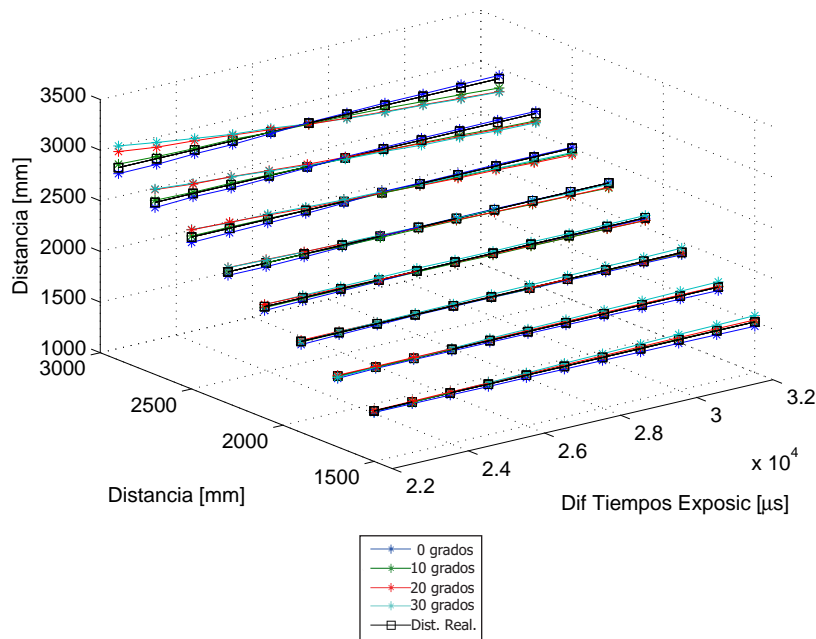


Figura 8.5.3: Comportamiento de la distancia estimada con las diferencias de tiempos de exposición, para $I_0 = 475\text{mA}$.

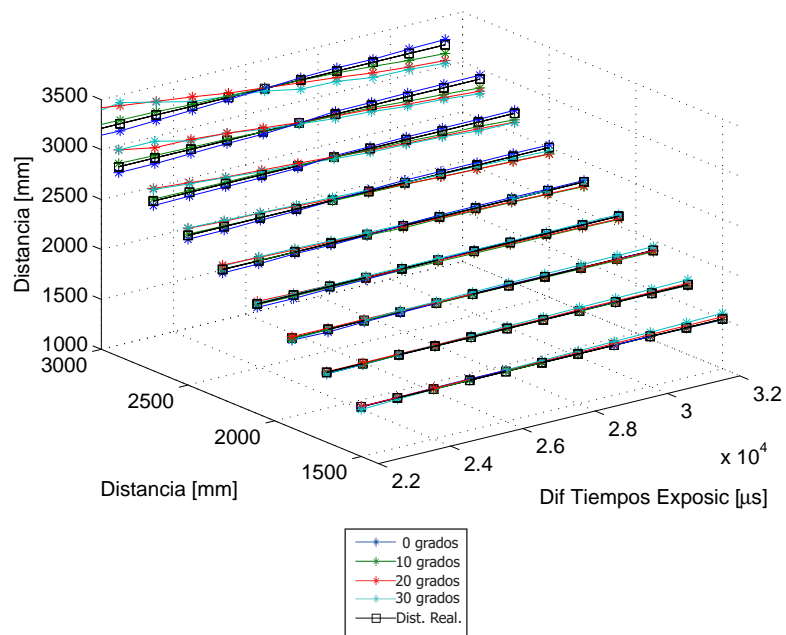


Figura 8.5.4: Comportamiento de la distancia estimada con las diferencias de tiempos de exposición, para $I_0 = 500\text{mA}$.

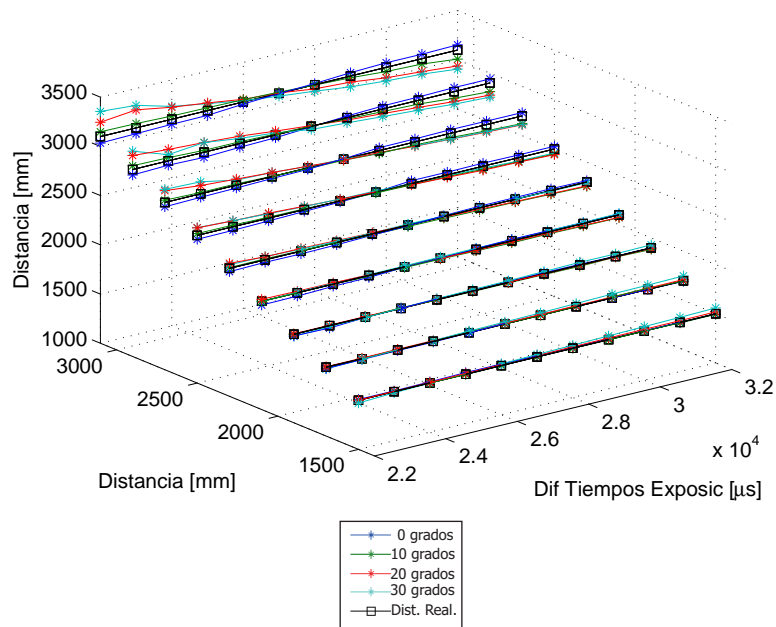


Figura 8.5.5: Comportamiento de la distancia estimada con las diferencias de tiempos de exposición, para $I_0 = 525\text{mA}$.

En las Figuras 8.5.6, 8.5.7 y 8.5.8, respectivamente, puede verse con más claridad este planteamiento. Se muestran la estimación de distancias por cada una de las diferencias de tiempos de exposición que se consideraron en este experimento y por cada una de las tres corrientes usadas en el experimento. En ellas se demuestra que existe

un comportamiento en la precisión de la estimación de distancias, con el tiempo de exposición.

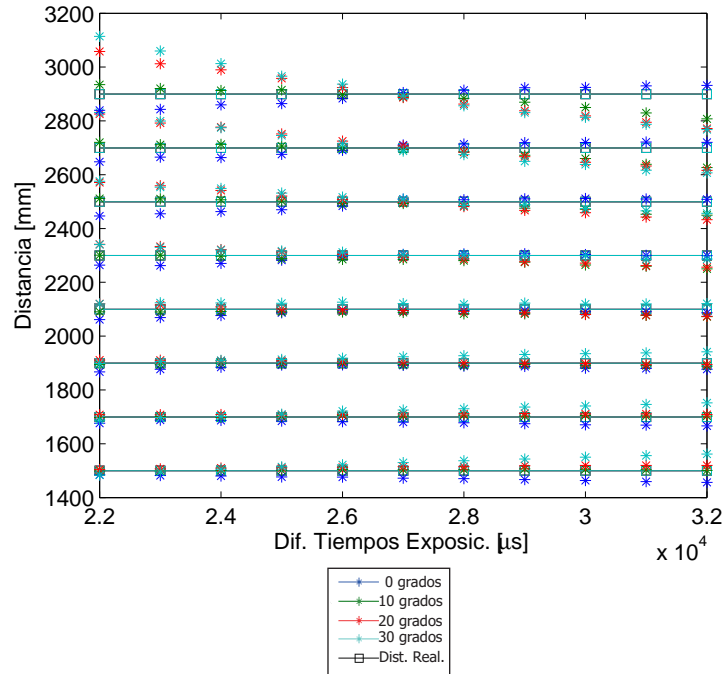


Figura 8.5.6: Comportamiento de la distancia estimada con las diferencias de tiempos de exposición para $I_0 = 475\text{mA}$ y diferentes ángulos de orientación de la baliza.

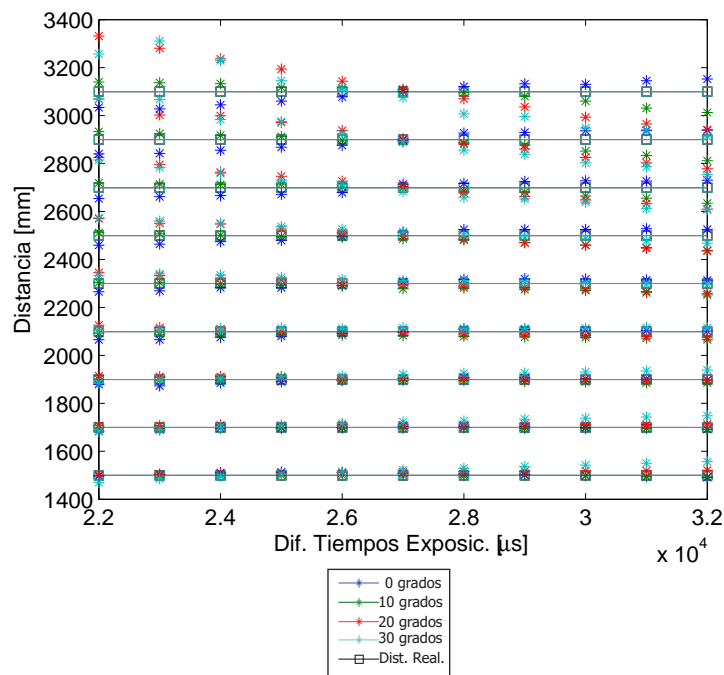


Figura 8.5.7: Comportamiento de la distancia estimada con las diferencias de tiempos de exposición para $I_0 = 500\text{mA}$ y diferentes ángulos de orientación de la baliza.

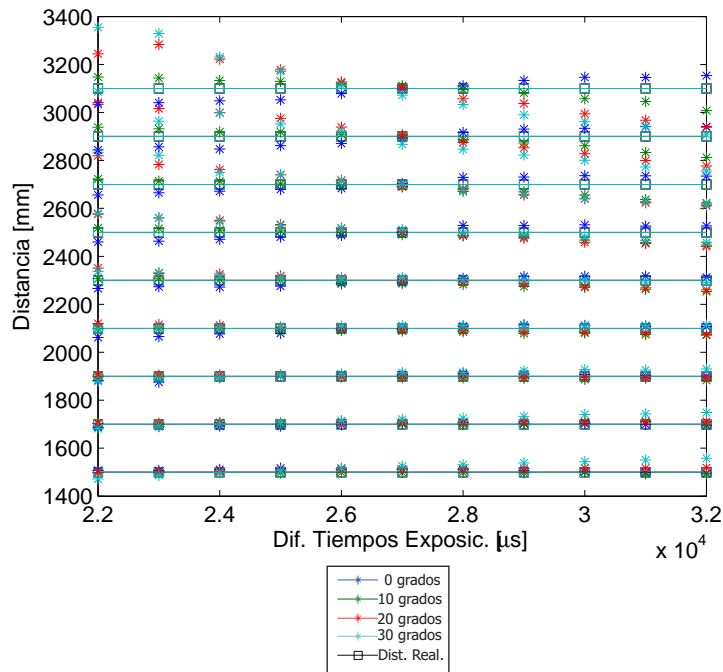


Figura 8.5.8: Comportamiento de la distancia estimada con las diferencias de tiempos de exposición para $I_0 = 525\text{mA}$ y diferentes ángulos de orientación de la baliza.

De las Figuras 8.5.6, 8.5.7 y 8.5.8 puede obtenerse que para $\Delta t_j = 27\text{ms}$, se obtiene una precisión aceptable en todo el rango de distancias analizado, por lo que se asumirá que este es valor óptimo de diferencias de tiempos de exposición.

En cuanto a la independencia con la intensidad radiante de la baliza, en las Figuras 8.5.3, 8.5.4 y 8.5.5, así como en las Figuras 8.5.6, 8.5.7 y 8.5.8 se puede comprobar este hecho en las estimaciones de distancias para diferentes corrientes de polarización.

En parte de este experimento se ha supuesto que la baliza está alimentada, con una corriente fija de 500mA , y se ha asumido que por derivas y variación de la temperatura la corriente de polarización puede variar $\pm 25\text{mA}$. En las Figuras 8.5.3, 8.5.4 y 8.5.5, así como en las Figuras 8.5.6, 8.5.7 y 8.5.8 se demuestra que para los valores picos la estimación de la distancia se mantiene dentro de los rangos permisibles (errores menores de un 10%).

8.5.2. Estimación de la distancia alimentando la baliza con una corriente aleatoria.

Tal como ocurre en la realidad, las derivas corriente por temperatura tienen un frecuencia mucho menor que la frecuencia de captura de las imágenes y que durante el tiempo de adquisición de las imágenes la variación de la corriente de polarización es despreciable y puede asumirse constante.

Otro de los experimentos que se realizaron para comprobar la independencia del modelo frente a los cambios en la corriente de polarización de la baliza, ha consistido en alimentar la baliza con una corriente fija y sumarle un ruido aleatorio de amplitud 25mA . En total se capturaron 3 imágenes con corrientes de polarización aleatorias por

cada diferencia de tiempo de exposición y distancias y ángulos de orientación de la baliza respecto a la cámara.

En este experimento, se han utilizado las distancias 1500, 2000, 2500 y 3000 mm y los ángulos 0, 10, 20, 30 y 40 grados.

Para este caso, las estimaciones de la distancia así como el ángulo de orientación estimado se muestran en la Figura 8.5.9.

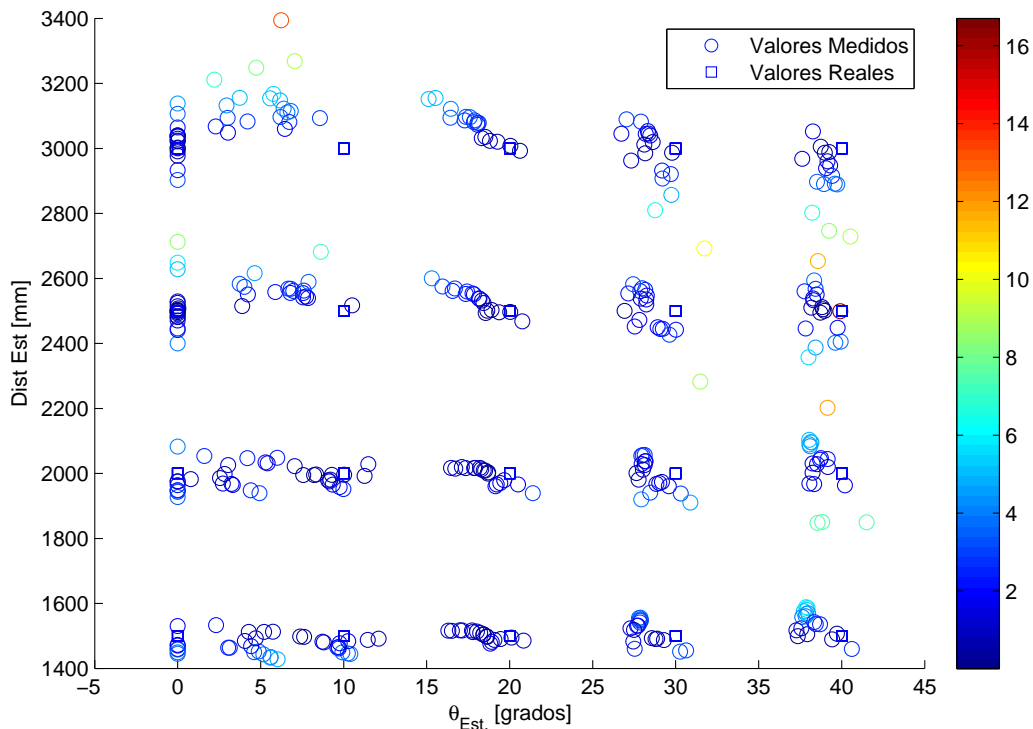


Figura 8.5.9: Comportamiento de la estimación de la distancia y el ángulo de orientación de la baliza, para diferentes tiempos de exposición, considerando que la baliza se alimenta con una corriente fija de 400mA y que está afectada por una señal aleatoria de amplitud 25mA. Las coordenadas x, y de los círculos y su color, se corresponden con el ángulo de orientación estimado, la distancia estimada y el error relativo en la estimación de la distancia, respectivamente.

En la Figura 8.5.9 las coordenadas (x, y) de los círculos dependen de los valores estimados para el ángulo de orientación de la baliza y la distancia estimada según el modelo independiente. A su vez, los colores de los círculos representa el error relativo en la estimación de la distancia respecto al valor real.

Independientemente de que el proceso de estimación del ángulo de orientación de la baliza puede fallar, los valores de la distancia estimada se mantienen dentro del rango de un 10% de error. Como puede verse, el error en la estimación de la distancia está por debajo de un 10%.

8.5.3. Repetitividad en la estimación de distancias.

Este experimento se realizó ejecutando la metodología de medida de distancias en un bucle de 100 repeticiones para cada ángulo de orientación y distancia considerada, manteniendo la corriente de polarización constante. A partir de esta prueba se pretende demostrar que el sistema es estable a lo largo del tiempo.

Como puede verse en las Figuras 8.5.3, 8.5.4, 8.5.5, 8.5.6, 8.5.7 y 8.5.8, en todos los tiempos no se obtiene la misma precisión; sin embargo, en estas mismas Figuras puede verse que para la diferencia de tiempos de exposición de 27 ms se obtiene una precisión aceptable para todas las distancias en las que se ha utilizado el algoritmo.

En cada repetición, se captan dos nuevas imágenes, la imagen de referencia con un tiempo de exposición de $t_r = 8\text{ms}$ y la segunda con un tiempo $t_j = 35\text{ms}$, lo cual resulta en $\Delta t_j = 27\text{ms}$.

El experimento considera las distancias: 1700, 2200 y 2700 mm y los ángulos 0, 10, 20 y 30 grados.

Los resultados de las medidas de distancias usando el modelo que se propone en esta tesis, para éstas condiciones, se presentan en forma de histogramas en las Figuras 8.5.10 a la 8.5.12.

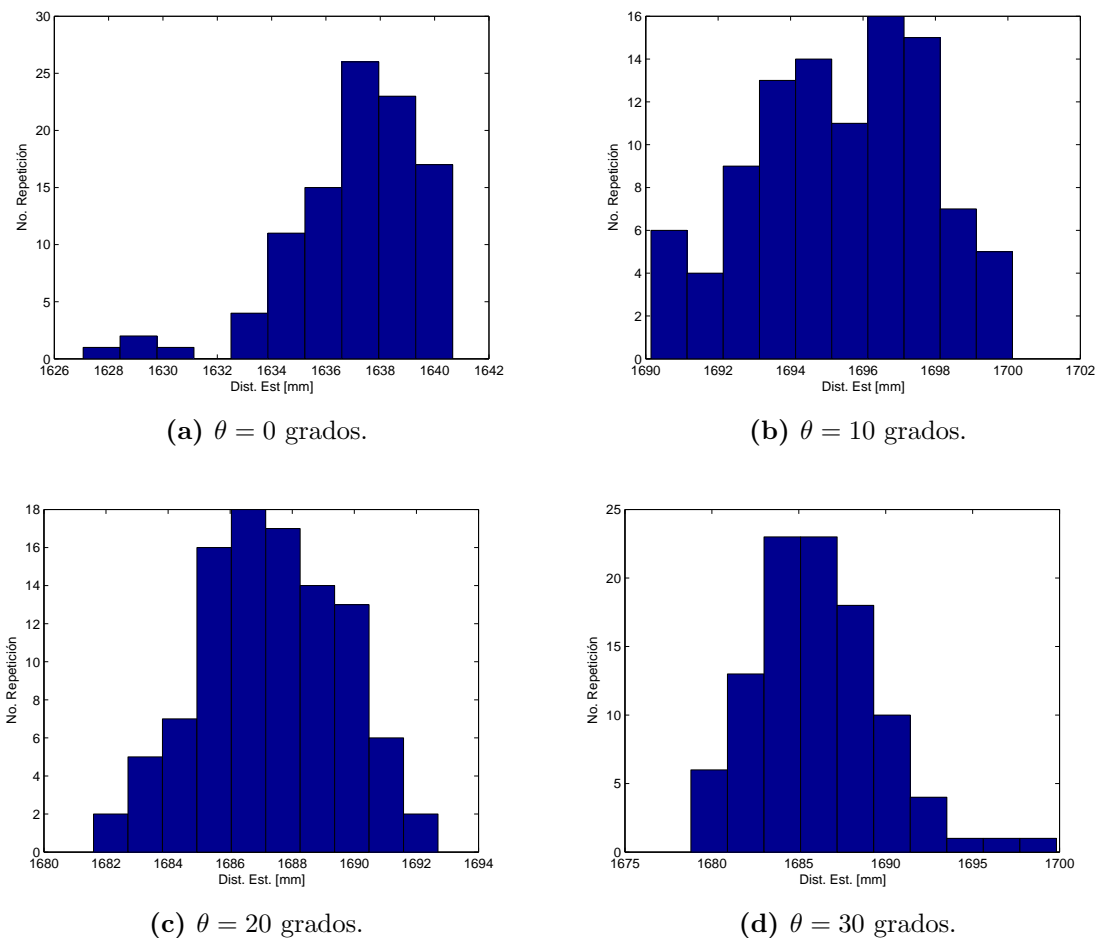
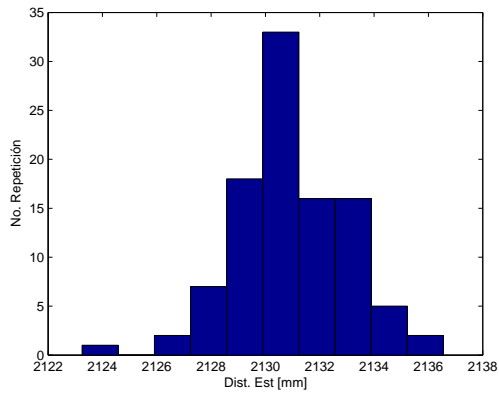
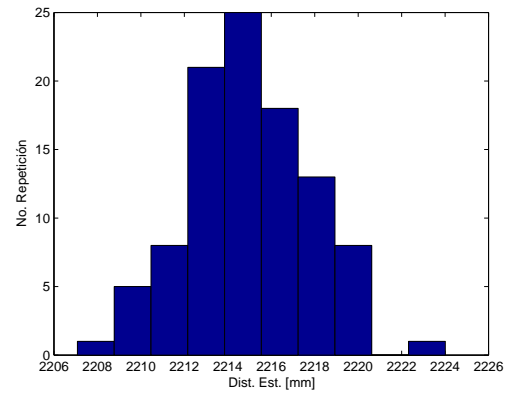


Figura 8.5.10: Histogramas en 100 repeticiones, capturando una pareja de imágenes nuevas en cada repetición. Distancia real 1700 mm.

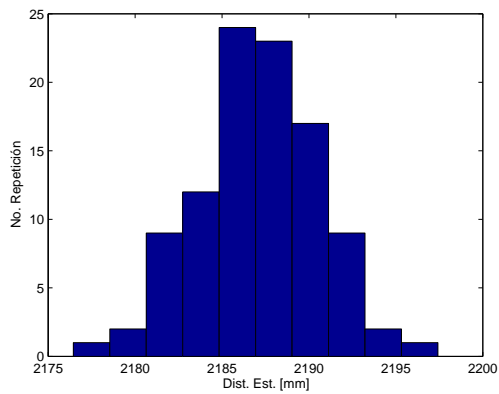
8.5. Resultados del modelo independiente.



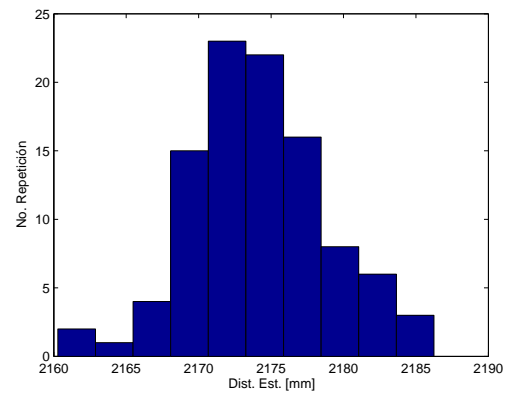
(a) $\theta = 0$ grados.



(b) $\theta = 10$ grados.



(c) $\theta = 20$ grados.



(d) $\theta = 30$ grados.

Figura 8.5.11: Histograma en 100 repeticiones, capturando una pareja de imágenes nuevas en cada repetición. Distancia real 2200 mm.

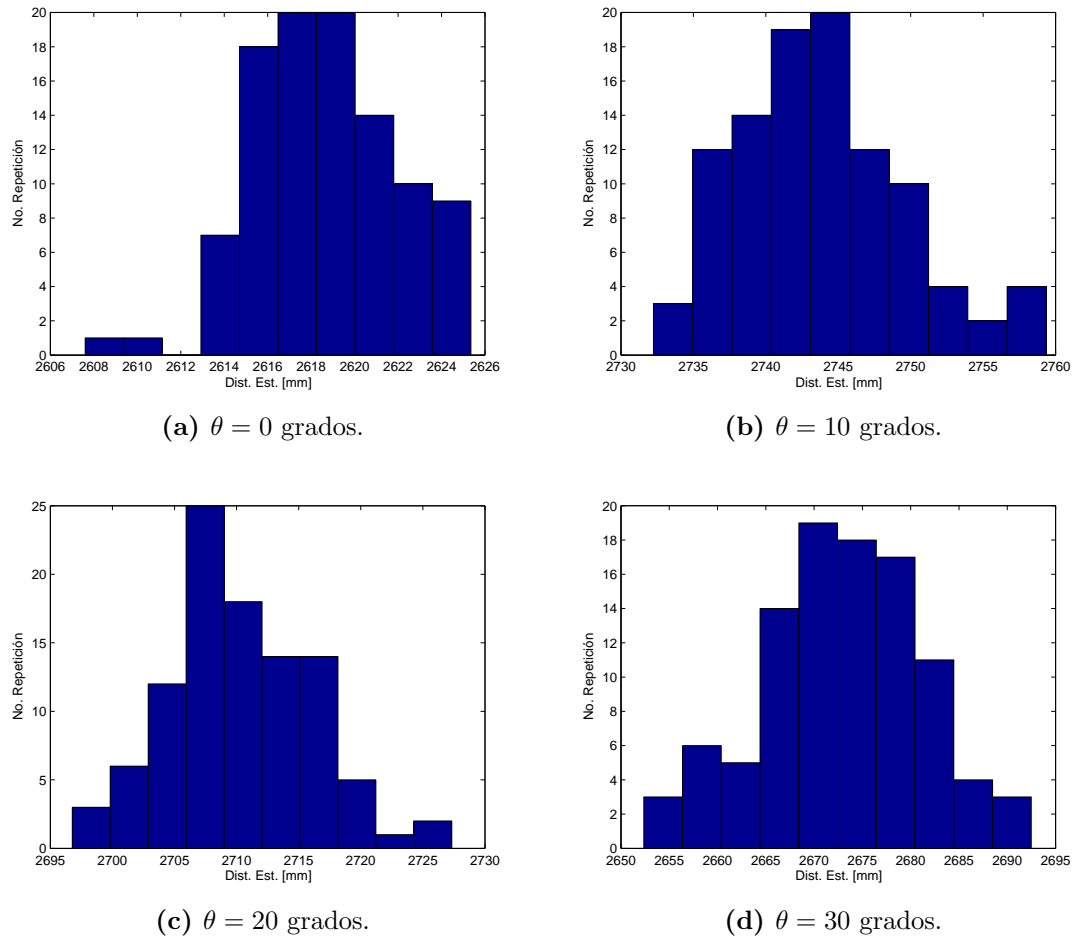


Figura 8.5.12: Histogramas en 100 repeticiones, capturando una pareja de imágenes nuevas en cada repetición. Distancia real 2700 mm.

8.6. Conclusiones.

En este capítulo se describen los experimentos realizados para validar la propuesta de modelo para estimar la distancia entre una baliza de infrarrojos y una cámara, usando la información de los valores de gris, el cuál es el objetivo fundamental de esta tesis.

Los experimentos realizados demuestran que el modelo que se propone es una alternativa útil para el sistema cámara-baliza.

En primer lugar, para la definición de un modelo para estimar la distancia entre una cámara y una baliza de infrarrojos con independencia de la corriente de polarización de la baliza se necesita aumentar el número de ecuaciones en el modelo a partir del uso de nuevos indicadores.

Los parámetros que se han definido se extraen de las imágenes de la baliza y solamente utilizan la información de los niveles de gris de los píxeles y no su posición en la imagen.

Se ha demostrado que estos parámetros seleccionados pueden utilizarse individual-

mente para la medida de la distancia cuando la cámara y la baliza se encuentran alineadas y enfrentadas.

Posteriormente, con la integración conjunta de dichos parámetros, se puede eliminar la restricción de alineación entre la cámara y la baliza y además definir una expresión conjunta que no depende de forma directa de la corriente de polarización de la baliza.

El modelo propuesto ha sido probado para la medida de la distancia en el rango de 1500 a 3000mm utilizando una plataforma controlable por el ordenador mostrada en la Figura 8.5.1.

En cuanto a la estimación de la distancia, en los experimentos realizados, los errores de medida de distancias no superan el 10 %, lo que valida a esta propuesta como una alternativa de utilidad para medir la distancia que separa a una baliza de infrarrojos de una cámara.

Si bien el comportamiento del modelo depende de la estimación del ángulo de orientación de la baliza, incluso para ángulos errores las estimaciones de distancias se mantienen dentro del 10 % de error antes mencionado, como se muestra en la Figura 8.5.9.

Por otro lado, el método de medida de distancias que se propone en ésta tesis, se probó para diferentes corrientes y los resultados confirman que se disminuye considerablemente el efecto de la corriente de polarización en la estimación de la distancia final.

Capítulo 9

Conclusiones y trabajos futuros

9.1. Introducción.

En este capítulo se exponen las conclusiones generales de la investigación realizada en esta tesis, considerando que la mayoría están relacionadas con el hecho de obtener información útil para medidas cuantitativas a partir de los valores de gris de los píxeles en la imagen.

Las aportaciones fundamentales son la propuesta de una metodología de medida de la distancia entre una cámara y una baliza de infrarrojo a partir de la información de los valores de gris de las imágenes de la baliza y su independización de la intensidad radiante de la baliza.

9.2. Conclusiones y aportaciones de la tesis.

El objetivo fundamental que se ha motivado esta investigación es demostrar que a partir de los valores de gris de las imágenes de una baliza de infrarrojo es posible estimar la distancia que la separa de una cámara.

De forma general se ha demostrado que en los valores de gris obtenidos en las imágenes existe información que puede utilizarse para la medida de la distancia.

A partir de este hecho se ha propuesto un modelo preliminar que se basa en comportamientos empíricos de una medida de la energía acumulada por la cámara con las magnitudes que afectan el nivel de gris de las imágenes. Este modelo fue validado en ambientes oscuros y suponiendo que la cámara y la baliza están alineadas y enfrentadas.

Del proceso de modelado se puede concluir que la energía relativa acumulada por la cámara puede modelarse a partir de una función lineal del tiempo de exposición, de la intensidad radiante de la baliza y del inverso de la distancia entre la cámara y la baliza al cuadrado.

Utilizando estas afirmaciones se ha propuesto un modelo preliminar y se ha validado en la estimación de distancias entre una cámara y una baliza de infrarrojo bajo la condición de coplanaridad y en un salón oscuro.

Se ha propuesto además una modificación del modelo preliminar partiendo los comportamientos de la energía relativa. Esta modificación, que resulta en un modelo de 8 parámetros ha resultado ser más precisa en la estimación de la distancia entre la baliza y la cámara que el modelo preliminar, y además se elimina la restricción de ausencia de luz de fondo en la escena mediante un filtro interferencial que mejora la relación señal

a ruido en el sistema.

El modelo de 8 parámetros se ha utilizado para estimar la distancia entre una cámara y una baliza de infrarrojo usando dos metodologías: el método directo y el método de diferencias de energías acumuladas en imágenes captadas con diferentes tiempos de exposición. De la comparación de estos métodos se concluye que el método de diferencias de energías es más preciso que la alternativa directa y que ofrece mayor inmunidad al ruido o iluminación de fondo.

Por otro lado, la precisión en la estimación de la distancia mediante el método de diferencias es dependiente del tiempo de exposición de las imágenes que se consideren, con lo que se puede afirmar que existe un rango de tiempos óptimos en los que la precisión aumenta y se puede identificar en el proceso de calibración del modelo.

Independientemente de los resultados obtenidos con el modelo de 8 parámetros y la metodología de diferencias de energías en imágenes captadas con tiempos de exposición diferentes, esta propuesta es insuficiente en la realidad porque no incluye el efecto de la orientación de la baliza respecto a la cámara.

Para solucionar este problema se ha modelado el patrón de radiación del emisor y se ha comprobado su efecto en la energía acumulada por la cámara. En este proceso puede concluirse que de forma genérica el efecto de la orientación de la baliza en la energía acumulada por la cámara puede caracterizarse mediante una función lineal del modelo usado para el patrón de radiación del emisor.

Paralelamente se ha definido características que se extraen de las imágenes y se han relacionado con las mismas magnitudes que afectan a la energía. De este proceso puede concluirse que no solamente la energía acumulada puede usarse para relacionarla con la distancia en el problema cámara-baliza. Concretamente se escogieron dos: la componente continua de la FFT de las imágenes y la desviación estándar de los valores de gris de la imagen de la baliza. Ambas características utilizan como entrada los niveles de gris de la imagen de la baliza.

En el proceso de modelado para incluir estas características en el modelo se demostró que pueden modelarse mediante una función lineal del tiempo de exposición en la cámara, la intensidad radiante y la función que modela al patrón de radiación de la baliza. Con relación a la distancia, la componente continua de la FFT puede modelarse de la misma manera que la energía acumulada, mientras que la desviación estándar se modela mediante una función cuadrática del inverso de la distancia al cuadrado.

En total se dispone de tres características que se extraen de las imágenes y que se relacionan con las mismas magnitudes que se utilizan en la energía acumulada. Esto permite implementar una metodología independiente de la intensidad radiante de la baliza que además se ha usado en la medida de distancia obteniendo errores relativos por debajo de un 10 %.

En la propuesta independiente de medida de distancia se ha demostrado que es posible formar un sistema de ecuaciones, cuyas incógnitas son la distancia y la orientación de la baliza.

9.3. Publicaciones derivadas de la tesis.

A lo largo de la tesis se han logrado las siguientes publicaciones:

- *Simplified Method for Radiometric Calibration of an Array Camera*, A. Cano-García, J.L. Lazaro, P.R. Fernandez, Intelligent Signal Processing, 2007. WISP 2007. IEEE International Symposium on. 03/11/2007; DOI: 10.1109/WISP.2007-4447619.
- *A Preliminary Model for a Distance Sensor, Using a Radiometric Point of View*, Angel Cano-García, José Luis Lázaro, Pedro Fernández, Óscar Esteban, and Carlos A. Luna Sensor Letters, Volume 7, No. 1, pp 17–23 (2009). (JCR 2008 IF: 1.16, 24/56)
- *Camera to Emitter Distance Estimation Using Pixel Grey-Levels*, Lázaro Galilea, J.L.; Cano-García, Angel; Esteban, O.; Pompa-Chacón, Yamilet, Sensor Letters, Volume 7, Number 2, April 2009 , pp. 133-142(10) (JCR 2008 IF: 1.16, 24/56) .
- *Selecting an Optimal Exposure Time for Estimating the Distance Between a Camera and an Infrared Emitter Diode Using Pixel Grey-Level Intensities*, José L. Lázaro, Ángel E. Cano, Pedro R. Fernández, and Carlos A. Domínguez, Sensor Letters. Volume 7, No. 6, 1086–1092 (2009) (JCR 2008: IF: 1.16, 24/56) .
- *Sensor for Distance Measurement Using Pixel Grey-Level Information*, José L. Lázaro, Angel E. Cano, Pedro R. Fernández and Yamilet Pompa Article: Sensors 2009, 9(11), 8896-8906; doi:10.3390/s91108896 (JCR 2008 IF: 1,870, 11/56).
- *Sensor for Distance Estimation Using FFT of Images*, José L. Lázaro, Angel E. Cano, Pedro R. Fernández and Carlos A. Luna Article: Sensors 2009, 9(12), 10434-10446; doi:10.3390/s91210434 (JCR 2008 IF: 1,870, 11/56).
- *Método simplificado de Calibración radiométrica para una cámara CCD*. A. Cano-García, Ó. Esteban, J. L. Lázaro, F. B. Naranjo, 5^a Reunión Española de Optoelectrónica, OPTOEL'07, Libro de Actas OPTOEL'07, ISBN 978-84-95809-30-8, 2007.

9.4. Trabajos Futuros.

La propuesta de medida de distancias que se ha descrito en esta tesis constituye una alternativa para el sobredimensionado del modelo geométrico utilizando una única cámara.

La idea fundamental en un futuro es reformular el modelo geométrico para incluir la información de los valores de luminancia y su relación con la distancia entre una cámara y una baliza circular de infrarrojo. Sabiendo que con el modelo geométrico se pierde la información de la profundidad que puede recuperarse utilizando la alternativa propuesta en esta tesis. Con lo cual se podría implementar una metodología de posicionamiento 3D con una única cámara y una baliza de infrarrojo.

Una vez demostrado que es posible utilizar la información de los valores de gris para estimar la distancia, como posibles trabajos futuros pueden indicarse:

- Reformular los comportamientos individuales de las características propuestas en esta tesis para todo el rango de valores posibles de tiempos de exposición e intensidad radiante en la baliza.
- Modelar el comportamiento de las características considerando movimientos en la baliza durante el proceso de captura de las imágenes.
- Estudiar el comportamiento de esta alternativa bajo otras condiciones de luz que son probables en interiores.

En cuanto a las características de la baliza, en esta tesis se ha preferido trabajar con fuentes lambertianas porque simplifica el proceso de modelado del efecto del ángulo de orientación de la baliza en la energía acumulada por la cámara. No obstante, como trabajos futuros se propone:

- Extender este análisis a balizas con patrones de radiación diferentes y que no cumplan con el principio de ser una figura en revolución.
- Proponer un análisis “pixélico” del proceso de formación de imágenes debido a una baliza de infrarrojo, asumiendo que la imagen se debe a la proyección de un cuerpo que tiene la misma forma que el patrón de radiación del emisor.

Otros trabajos estarían encaminados al mejoramiento de la precisión de esta alternativa, como por ejemplo:

- Modelar nuevas características para aumentar lo máximo posible, el número de ecuaciones que se proponen en esta alternativa, con lo cual permitiría una estimación más precisa de la distancia y la orientación de la baliza.

En cuanto a las restricciones aplicadas a la cámara sería interesante:

- Modelar el efecto en la estimación de la distancia de los cambios en la distancia focal y la apertura del diafragma y proponer una alternativa que elimine la restricción impuestas para estos parámetros y además para la ganancia. Esto facilitaría la integración con el modelo geométrico.

Y finalmente:

- Reformular el modelo geométrico para incluir la alternativa radiométrica y permitir un posicionamiento 3-D.

Bibliografía

- [1] I. Fernández, *Sistema de Posicionamiento Absoluto de un Robot Móvil utilizando Cámaras Externas*. PhD thesis, Universidad de Alcalá., 2005.
- [2] R. Horaud, F. Dornaika, B. Lamiroy, and S. Christy, “Object pose: The link between weak perspective, paraperspective, and full perspective,” *International Journal of Computer Vision*, vol. 22, pp. 173–189, March 1997.
- [3] D. F. DeMenthon and L. S. Davis, “Model-based object pose in 25 lines of code,” *International Journal of Computer Vision.*, vol. 15, pp. 123–141, 1995.
- [4] G. Xu and Z. Zhang, *Epipolar geometry in Stereo, Motion and Object recognition. A unified Approach*. Kluwer Academic Publisher, 1996.
- [5] R. I. Hartley, “Self-calibration from multiple views with a rotating camera,” pp. 471–478, Springer-Verlag, 1994.
- [6] R. Hartley and A. Zisserman, *Multiple View Geometry in Computer Vision*. Press Syndicate of the University of Cambridge, second ed., 2003.
- [7] Z. Zhang, “Flexible camera calibration by viewing a plane from unknown orientations,” *International Conference on Computer Vision ICCV’99*, pp. 666–673, 1999.
- [8] C. A. Luna-Vázquez, *Medida de la posición 3D de los cables de contacto que alimentan a los trenes de tracción eléctrica mediante visión*. PhD thesis, Universidad de Alcalá, 2006.
- [9] A. Gardel, *Calibración de una cámara con zoom y movimiento pan-tilt*. PhD thesis, Universidad de Alcalá, 2004.
- [10] J. Heikkila and O. Silven, “A four-step camera calibration procedure with implicit image correction,” *CVPR ’97: Proceedings of the 1997 Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR ’97)*, 1997.
- [11] J. Heikkilä, “Geometric camera calibration using circular control points.,” *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence.*, vol. 1, pp. 1066–1076, 2000.
- [12] M. Li and J.-M. Lavest, “Some aspects of zoom lens camera calibration,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 18, pp. 1105–1110, 1996.

- [13] A. Gardel, J. L. Lázaro, and J. M. Lavest, “Camera auto-calibration with visual patterns,” *Proceeding of ETFA 2003*, vol. 2, pp. 566–572.
- [14] C. A. Luna, M. Mazo, J. L. Lázaro, J. F. Vázquez, J. Ureña, S. E. Palazuelos, J. J. García, F. Espinosa, and E. Santiso, “Method to measure the rotation angles in vibrating systems.,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 55, no. 2, pp. 232–239, 2006.
- [15] L. J. L., J. M. Lavest, C. A. Luna, and A. Gardel, “Sensor for simultaneous high accurate measurement of three-dimensional points,” *Journal of Sensor Letters.*, vol. 4, pp. 426–432, 2006.
- [16] O. D. Faugeras and Q. T. Luong, “The geometry of multiple images, the laws that govern the formation of multiple images of a scene and some of their application.,” *The MIT Press. Cambridge. MA.*, 2001.
- [17] O. D. Faugeras, “Three- dimensional computer vision,” *The MIT Press. Cambridge. MA.*, 1993.
- [18] D. Scharstein and R. Szeliski, “A taxonomy and evaluation of dense two-frame stereo correspondence algorithms,” *International Journal of Computer Vision*, vol. 47, pp. 7–42, 2001.
- [19] M. A. Fischler and O. Firschein, *Intelligence: the eye, the brain, and the computer*. Boston, MA, USA: Addison-Wesley Longman Publishing Co., Inc., 1987.
- [20] C. Tomasi and T. Kanade, “Shape and motion from image streams: a factorization method 2. point features in 3d motion,” tech. rep., *International Journal of Computer Vision*, 1991.
- [21] H. Longuet Higgins and K. Prazdny, “The interpretation of a moving retinal image,” *Proceedings of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, vol. 208, no. 1173, pp. 385–397, 1980.
- [22] A. R. Bruss and B. K. P. Horn, “Passive navigation,” *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 21, no. 1, pp. 3–20, 1983.
- [23] S. Uras, F. Girosi, A. Verri, and V. Torre, “A computational approach to motion perception.,” *Biological Cybernetics*, vol. 60, no. 2, pp. 79–87.
- [24] H.-H. Nagel, “On the estimation of optical flow: Relation between different approaches and some new results.,” *Artificial Intelligence*, vol. 33, pp. 299–324, 1987.
- [25] D. J. Heeger, “Optical flow using spatiotemporal filters.,” *International Journal of Computer Vision.*, pp. 279–302, 1988.
- [26] M. Spetsakis and J. Aloimonos, “Optimal computing of structure from motion using point correspondences in two frames,” *Second International Conference on Computer Vision.*, pp. 449–453, 1988.

-
- [27] J. L. Barron, D. J. Fleet, and S. S. Beauchemin, "Performance of optical flow techniques," *International Journal of Computer Vision*, vol. 12, pp. 43–77, 1994.
- [28] S. Nayar, M. Watanabe, and M. Noguchi, "Real-time focus range sensor," *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence.*, vol. 18, no. 12, pp. 1186–1198, 1996.
- [29] J. Ens and P. Lawrence, "An investigation of methods for determining depth from focus," *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 15, no. 2, pp. 97–108, 1993.
- [30] H. Gross, *Handbook of Optical Systems*. Wiley-VCH, 2005.
- [31] M. Born and E. Wolf, *Principles of Optics*. 1965.
- [32] B. K. P. Horn, "Focusing," *Artificial Intelligence Memo 160*.
- [33] A. Pentland, T. Darell, M. Turk, and W. Huang, "A simple, real-time range camera.," *IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 1989. Proceedings CVPR '89.*, pp. 256 – 261, 1989.
- [34] M. Subbarao, T.-C. Wei, and G. Surya, "Selecting the optimal focus measure for autofocusing and depth-from-focus," *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence.*, vol. 20, no. 8, pp. 864 – 870, 1998.
- [35] C. T. Subbarao, M. and A. Nikzad, "Focusing techniques," *OE/Technology'92, SPIE Conference.*, 1992.
- [36] A. P. Pentland, "A new sense for depth of field," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 9, no. 4, pp. 523–531, 1987.
- [37] A. Pentland., "Depth of scene from depth of field," *Proceeding on Image Understanding Workshop*, 1982.
- [38] M. Subbarao, "Parallel depth recovery by changing camera parameters," *Second International Conference on Computer Vision.*, pp. 149 – 155, 1988.
- [39] M. Subbarao, "Direct recovery of depth-map I: Differential methods," *Proceeding of IEEE Workshop on Computer Vision, Representation and Control, CVWS87*, pp. 58–65, 1987.
- [40] M. Subbarao, "Efficient depth recovery through inverse optics," *Machine Vision Inspection and Measurement*, 1989.
- [41] M. Subbarao and N. Gurumoorthy, "Depth recovery from blurred edges," *Computer Vision and Pattern Recognition, 1988. Proceedings CVPR '88., Computer Society Conference on*, pp. 498–503, Jun 1988.
- [42] Y. Y. Shechener and N. Kiryati, "Depth from defocus vs. stereo: how different really are they?," *Fourteenth International Conference on Pattern Recognition, 1998. Proceedings.*, vol. 2, pp. 1784 – 1786, 1998.

- [43] Y. Y. Schechner and N. Kiryati, “Depth from defocus vs. stereo: How different really are they?,” *Int. J. Comput. Vision*, vol. 39, no. 2, 2000.
- [44] J. L. Lázaro, *Modelado de entornos mediante Infrarrojos. Aplicación al guiado de robots móviles*. PhD thesis, Universidad de Alcalá, 1998.
- [45] J. L. Lázaro, C. Mataix, A. Gardel, and E. Martín, “Calibración de cámaras ccd con corrección bidimensional de Ópticas de gran angular.,” *Información Tecnológica*, vol. 11, no. 2, pp. 129–134, 2000.
- [46] G. A. M. M. C. Lázaro, J. L. and J. C. García, “Guidance of autonomous vehicles by means of structured light.,” *IFAC Workshop on Intelligent Components for Vehicles. Sevilla, España.*, pp. 1227–132.
- [47] J. L. Lázaro, M. Mazo, and C. Mataix, “3-d environments recognition using structured light and active triangulation for the guidance of autonomous vehicles.,” *50th Aniversario de la Universidad de Oriente, FIE’97*.
- [48] J. L. Lázaro, M. Mazo, and C. Mataix, “3-d vision system using structured light and triangulation to create maps of distances for guiding autonomous vehicles.,” *International Conference on Control and Industrial Systems. La Habana*.
- [49] J. L. Lázaro, A. Gardel, M. Mazo, C. Mataix, J. C. García, and E. Bueno, “Mobile robot with wide capture active laser sensor and environment definition.,” *Journal of Intelligent & Robotic Systems.*, vol. 3, pp. 27–248.
- [50] Y. Shirai, “Recognition of polyhedrons with a range finder,” *Bul. Electrotech. Lab.*, vol. 35, no. 3, pp. 290–296, 1971.
- [51] A. Gruss, T. Kanade, and L. R. Carley, “Integrated sensor and range-finding analog signal processor.,” *IEEE Journal of Solid State Circuits.*, vol. 26, pp. 184–191, 1991.
- [52] S. Chakravarthy, R. Sharma, and R. Kasturi, “Noncontact level sensing technique using computer vision,” *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, vol. 51, pp. 353–361, Apr 2002.
- [53] C. Luna, M. Mazo, J. Lázaro, J. Vázquez, J. Ureña, J. García, and H. Sarmiento, “Reduction of vibration-induced errors in 3d measurement systems with vision and structured light,” in *Industrial Electronics, 2005. ISIE 2005. Proceedings of the IEEE International Symposium on*, vol. 3, pp. 1291 – 1296 vol. 3, 20-23 2005.
- [54] E. Reinhard, G. Ward, S. Pattanaik, and P. Debevec, *High Dynamic Range Imaging: Acquisition, Display, and Image-Based Lighting (The Morgan Kaufmann Series in Computer Graphics)*. San Francisco, CA, USA: Morgan Kaufmann Publishers Inc., 2005.
- [55] M. Subbarao and A. Nikzad, “A model for image sensing and digitization in machine vision,” *Proceeding of SPIE.*, vol. 1385, pp. 70–84, nov 1990.
- [56] T. Mitsunaga and S. K. Nayar, “Radiometric self calibration,” *Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1999.

-
- [57] M. D. Grossberg and S. K. Nayar, “What can be known about the radiometric response from images?,” *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, 2002.
- [58] M. D. Grossberg and S. K. Nayar, “Modeling the space of camera response functions,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 2004.
- [59] M. D. Grossberg and S. K. Nayar, “Determining the camera response from images: What is knowable?,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 25, November 2003.
- [60] S. Mann and R. Picard, “Being ‘undigital’ with digital cameras: Extending dynamic range by combining differently exposed pictures,” *In Proceedings of IS&T 46th annual conference*, pp. 422–428, May 1995.
- [61] P. E. Debevec and J. Malik, “Recovering high dynamic range radiance maps from photographs,” *SIGGRAPH ’97: Proceedings of the 24th annual conference on Computer graphics and interactive techniques*, pp. 369–378, 1997.
- [62] Q. Zheng and R. Chellapa, “Estimation of illuminant direction, albedo, and shape from shading,” *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence.*, vol. 13, no. 7, pp. 680–702, 1991.
- [63] R. Zhang, P.-S. Tsai, J. E. Cryer, and M. Shah, “Shape from shading: A survey,” *IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence.*, vol. 21, no. 8, pp. 690–706, 1999.
- [64] A. Pentland, “Finding the illuminant direction,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 72, no. 4, pp. 448–455, 1982.
- [65] B. T. Phong, “Illumination for computer generated pictures,” *Comm. ACM*, vol. 18, pp. 311–317, 1975.
- [66] K. E. Torrance and E. M. Sparrow, “Theory off-specular reflections from roughened surfaces,” *J. Opt. Soc. Am. A*, vol. 57, pp. 1105–1114, 1967.
- [67] G. Healy and T. O. Binford, “Local shape from specularity,” *Computer Vision, Graphics, and Image Processing*, vol. 42, pp. 62–86, 1988.
- [68] I. K. Nayar, S. K. and T. Kanade, “Surface reflection: Physical and geometrical perspectives,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 13, no. 7, pp. 611 – 634, 1991.
- [69] K. Ikeuchi and B. K. P. Horn, “Numerical shape from shading and occluding boundaries,” *Artificial Intelligence*, vol. 17, pp. 141–184, 1981.
- [70] M. J. Brooks and B. K. P. Horn, “Shape and source from shading,” *Proceeding International Conference of Artificial Intelligence*, pp. 932–936, 1985.
- [71] B. K. P. Horn, *Shape from Shading: A method for obtaining the shape of a smooth opaque object from one view*. PhD thesis, 1970.

- [72] E. Rouy and A. Tourin, “A Viscosity Solutions Approach to Shape-from-shading,” *SIAM Journal on Numerical Analysis*, vol. 29, pp. 867–884, June 1992.
- [73] J. Oliensis and P. Dupuis, “A Global Algorithm for Shape from Shading,” in *Proceedings of the 4th IEEE International Conference on Computer Vision*, (Berlin, Germany), pp. 692–701, May 1993.
- [74] R. Kimmel and A. M. Bruckstein, “Shape from Shading via Level Sets,” Center for Intelligent System Report CIS9209, Technion-Israel Institute of Technology, Haifa, Israel, 1992.
- [75] A. P. Pentland, “Local Shading Analysis,” *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, vol. 6, pp. 170–187, Mar. 1984.
- [76] C. H. Lee and A. Rosenfeld, “Improved method of estimating shape from shading using the light source coordinate system,” *Artificial Intelligence*, vol. 26, pp. 125–143, 1985.
- [77] A. Pentland, “Shape information from shading: A theory about human perception,” *Proceeding IEEE Conference of Computer Vision.*, pp. 403–413, 1988.
- [78] P.-S. Tsai and M. Shah, “Shape From Shading Using Linear Approximation,” tech. rep., Computer Vision Laboratory, University of Central Florida, Orlando, Florida, USA, 1994.
- [79] J.-D. Durou, M. Falcone, and M. Sagona, “A Survey of Numerical Methods for Shape from Shading,” Rapport de Recherche 2004-2-R, Institut de Recherche en Informatique de Toulouse, Toulouse, France, Jan. 2004.
- [80] W. R. McCluney, *Introduction to Radiometry and Photometry*. Artech House.
- [81] I. Moreno and C.-C. Sun, “Modeling the radiation pattern of leds,” *Opt. Express*, vol. 16, no. 3, pp. 1808–1819, 2008.
- [82] M. Bigas, E. Cabruja, J. Forest, and J. Salvi, “Review of cmos image sensors,” *Microelectronics Journal*, vol. 37, no. 5, pp. 433 – 451, 2006.
- [83] Thorlabs.com, “Hot and cold mirrors.” http://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=897.
- [84] Thorlabs.com, “Bandpass filters.” http://www.thorlabs.com/NewGroupPage9.cfm?ObjectGroup_ID=1001.
- [85] A. Cano-García, O. Esteban, J. L. Lázaro, and F. Naranjo, “Método simplificado de calibración radiométrica para una cámara ccd.,” *Quinta Reunión Española de Optoelectrónica, OPTOEL’07.*, 2007.
- [86] A. Cano-García, J. L. Lázaro, and P. Fernández, “Simplified method for radiometric calibration of a ccd camera.,” *IEEE International Symposium on Intelligent Signal Processing (WISP-2007).*, 2007.

- [87] *Basler A620f, User's Manual.*
- [88] O. O. S. GmbH, *High Power Infrared Emitter (940 nm) SFH 4200.*
- [89] O. D. Corp., *Super High-Power GaAlAs IR Emitters(OD-50L).*
- [90] O. O. S. GmbH, *High Power Infrared Emitter (940 nm) SFH 4231.*
- [91] A. Cano-García, J. L. Lázaro, P. Fernández, O. Esteban, and C. A. Luna, "A preliminary model for a distance sensor, using a radiometric point of view," *Sensor Letters*, vol. 7, pp. 17–23(7), February 2009.
- [92] J. Lázaro Galilea, A. Cano-García, O. Esteban, and Y. Pompa-Chacón, "Camera to emitter distance estimation using pixel grey-levels," *Sensor Letters*, vol. 7, pp. 133–142(10), April 2009.
- [93] J. L. Lázaro, A. E. Cano, P. R. Fernández, and C. A. Dominguez, "Selecting an optimal exposure time for estimating the distance between a camera and an infrared emitter diode using pixel grey-level intensities," *Sensor Letters*, vol. 7, pp. 1086–1092(7), December 2009.
- [94] V. Putz and B. Zagar, "Single-shot estimation of camera position and orientation using svd," pp. 1914 –1919, may. 2008.
- [95] J. L. Lázaro, A. E. Cano, P. R. Fernández, and C. A. Luna, "Sensor for distance estimation using fft of images," *Sensors*, vol. 9, no. 12, pp. 10434–10446, 2009.