

CALIBRACIÓN EXTRÍNSECA ENTRE CÁMARAS TÉRMICA Y DE ESPECTRO VISIBLE PARA INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA



SERGIO DAVID CARDONA MELO

RAFAEL EDUARDO OSPINA CAICEDO

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2014

**CALIBRACIÓN EXTRÍNSECA ENTRE CÁMARAS TÉRMICA Y DE ESPECTRO
VISIBLE PARA INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA**

SERGIO DAVID CARDONA MELO

RAFAEL EDUARDO OSPINA CAICEDO

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO ELECTRÓNICO

DIRECTOR
EVAL BLADIMIR BACCA CORTÉS, PhD.

UNIVERSIDAD DEL VALLE
FACULTAD DE INGENIERÍA
PROGRAMA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SANTIAGO DE CALI
2014

Se aprueba el siguiente Trabajo de Grado
en cumplimiento de los Requisitos
expedidos por la institución para optar al
título de:

INGENIERO ELECTRÓNICO

EVAL BLADIMIR BACCA CORTÉS, PhD.
Director

Jurado 1

Jurado 2

Santiago de Cali, 16 de Diciembre de 2014

Nota de Aceptación

*A Willy y Cris, Jota y JuanK fuentes de paz,
tranquilidad y artífices de quien soy*

Sergio David Cardona Melo

Dedico este trabajo a las personas que durante todo instante y durante toda mi vida han estado merodeando en mis pensamientos: mi apá Gildardo, mi amá Amalia, mi manita Juana de Arco, y mis manitos Juanchomilo y Calitos. Y por supuesto, a la personita que tiene siempre tanto amor en su corazón, mi agüelita Rosa.

Rafael Eduardo Ospina Caicedo

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia por haberme apoyado y guiado en todas las iniciativas de mi vida. A mis hermanos, que con sus logros me han impulsado a esforzarme por ser mejor. A mis amigos y compañeros de quienes he aprendido innumerables lecciones. Y a los profesores que han dedicado algo de su tiempo a compartir su experiencia y conocimiento conmigo.

Y agradezco especialmente a esa persona que me hace (s)onreír todos los días.

Sergio David Cardona Melo

Agradezco a Dios por guiarme en las decisiones que he tomado. A mi familia por enseñarme a caminar y a sonreír, y a mis amigos por hacerme reír a carajadas. Podría intentar nombrar las personas que han marcado mi vida, pero prefiero agradecerles personalmente con voz propia: - ¡Muuuchaaaass graaaaciaaaaas!

Agradezco los consejos de mi papá como las canciones de cuna de mamá. Sus cuidados y comprensión.

Aprovecho también para decirle gracias a todos los profesores, quienes desde mi etapa de Colegio hasta ahora la Universidad, especialmente a nuestro director Bladimir Bacca, han impartido sus conocimientos para ayudar a forjarme como persona e ingenieeeeeroo!

*"Con la gente que me gusta
me dan las claras del alba
compartiendo madrugadas,
palabras, risas y lunas.
Con la gente que me gusta
paso las noches en vela
deberían ser eternas
como la lluvia y la sed."*

(Con la gente que me gusta)

Rafael E. Ospina Caicedo.

Resumen

El siguiente trabajo presenta la implementación y descripción de una herramienta para inspección termográfica que permite fusionar imágenes de espectro térmico infrarrojo y de espectro visible. El sistema presentado se compone de un patrón de calibración, un sistema de adquisición de imágenes y una aplicación *software* que permite realizar el procedimiento de calibración, obtener fusión de imágenes, y generar el correspondiente reporte de inspección termográfica.

El sistema híbrido de cámaras se compone de una cámara termográfica y una cámara visible, montadas sobre una base fija con la menor distancia entre ellas para aumentar la superposición de campos de visión. Las cámaras pueden ser de diferente fabricante y diferentes características, como campo de visión o resolución espacial. El patrón de calibración se basa en la propuesta de Ursine et al. (2012), y se configura como un tablero de ajedrez de 9 cuadrados de ancho por 7 de alto. Los cuadrados tienen un tamaño de 8x8 cm cada uno y se encuentran organizados de forma que se intercalan cuadros de cartulina negra con cuadros de cobre de 0.3 mm de espesor.

El proceso de calibración extrínseca usa el patrón de tal manera que este sea visible en los campos de visión de ambas cámaras, capturando pares de imágenes en diferentes posiciones, y creando pares ordenados de puntos que corresponden a las esquinas del patrón de calibración en ambas imágenes. Estos puntos se emplean para calcular la matriz de Homografía, la cual permite aplicar una transformación proyectiva entre las imágenes de las cámaras. De acuerdo a los resultados experimentales, se recomienda capturar las imágenes de calibración en un ambiente interior iluminado con luz natural, y realizar una calibración intrínseca previa a la calibración extrínseca.

La validación del procedimiento anterior se desarrolló con tres configuraciones de cámaras: una cámara térmica FLIR E320 (tamaño de imagen: 320x240 píxeles / FOV: 25x19°) y tres cámaras de espectro visible de diferentes características: Sharp YH-7B50 (640x480/50x37°), webcam Genius (640x480/40x31°) y Kodak (2048x1536/74x57°). Después de la evaluación de los tres diferentes conjuntos de imágenes se obtuvo un error máximo de 5.773 píxeles para la configuración que incluye la cámara Kodak; y un error máximo normalizado de 9.8E-06 para la configuración con la cámara Genius.

El *software* presenta una interfaz de usuario que permite ejecutar la calibración intrínseca y extrínseca de las cámaras. Además permite realizar el procesamiento de las imágenes y la generación de reportes. La sección de procesamiento de imágenes ofrece herramientas para modificar las imágenes de espectro visible e infrarrojo, y permite fusionar imágenes con tres métodos: imagen en imagen, fusión térmica y umbralización de color. En la sección de generación de reporte se puede crear un archivo *pdf* a partir de una plantilla con campos de información modificable por el usuario, para presentar los datos más relevantes de una tarea de inspección.

Abstract

In this work we present the implementation and description of a thermography inspection tool that allows merging infrared and visible spectrum images. The presented system consists of a calibration rig, an image acquisition system and a software application to perform the calibration procedure, the image fusion, and the thermography inspection report.

The hybrid camera system consists of a thermal camera and a color camera, both placed on a fixed base with the lowest possible distance between them, increasing the overlapping fields of view. The cameras could be from different manufacturers and have different features like field of view or spatial resolution. The calibration rig is based on the proposed pattern by Ursine et al. (2012), and it is configured as a chessboard of 9 squares of height by 7 squares of width. The square size is 8x8 cm and they are made of black cardboard and copper (0.3 mm thickness).

For the extrinsic calibration process we use the calibration rig, which must be visible in both fields of view, and capture image pairs of the pattern in different positions. Afterwards, we create ordered point pairs which correspond to the corners of the calibration pattern in both images. Then, we take these point sets to compute the Homography matrix, i.e. the projective transformation between the camera planes. Furthermore, to improve system results, we suggest to capture the image sets in an inside environment lighted up by natural light, and to perform an intrinsic calibration before computing the homography matrix.

To prove the system, we took three different camera configurations: for all cases the thermal camera was a FLIR E320 (image size: 320x240 pixels / FOV:25x19°) and three color cameras with different features: Sharp YH-7B50 (640x480 / 50x37°) Genius webcam (640x480 / 40x31°) and Kodak (2048x1536 / 74x57°). We obtained a maximum symmetric transfer error of 5.773 pixels, which correspond to the configuration of the Kodak camera; and a maximum normalized error of 9.8E-06 for the configuration with the webcam Genius.

The software tool has a user interface that allows computing the intrinsic and extrinsic camera parameters, performing image processing and creating a report. The image processing section provides tools to work over visible and thermal images, allowing fusing the images with three methods: Picture in Picture (PiP), Thermal Fusion and Color Thresholding. The report section allows creating a pdf file from a template with editable fields, which lets the user insert the most relevant information of an inspection task.

Glosario

ALGORITMO: conjunto de instrucciones ordenadas que permiten desarrollar una actividad.

API: *Application Programming Interface* (Interfaz de programación de aplicaciones).

CENTRO ÓPTICO: punto de intersección entre el lente y el eje principal.

CONTRASTE: diferencia de luminosidad entre píxeles.

CUERPO NEGRO: objeto que emite el 100% de la radiación recibida.

CVBS: *Color, Video, Blanking and Sync*. Señal de vídeo analógica codificada en diferentes estándares.

DISPLAY: dispositivo de salida para la presentación de información de forma visual.

DLT: *Direct Linear Transformation* (Transformación Lineal Directa).

ECUALIZACIÓN: (de un histograma) método de ajuste del contraste que distribuye de mejor forma las intensidades en una imagen.

EMITANCIA: efectividad en la emisión de energía en forma de radiación térmica.

GEOMETRÍA EPIPOLAR: geometría definida por las relaciones entre las imágenes capturadas por dos cámaras en una escena 3D desde diferente posición.

ESPECTRO (ELECTROMAGNÉTICO): distribución energética del conjunto de ondas electromagnéticas. En este trabajo se refiere a la luz visible y/o los rayos infrarrojos.

VISIÓN ESTÉREO: extracción de información 3D a partir de imágenes digitales tomadas desde diferentes puntos de vista.

FLANN: *Fast Library For Approximate Nearest Neighbour Search*.

FOTOGRAMA: imagen capturada del espectro visible.

FOV: *Field of View* (Campo de Visión). Extensión angular de una escena capturada por una cámara.

FPA: *Focal Plane Array* (Arreglo de Plano Focal).

FREAK: *Fast Retina Keypoint*.

GNU: licencia pública general que ofrece la libertad de usar, estudiar, compartir y modificar códigos de software.

GUI: *Grafical User Interface* (Interfaz Gráfica de usuario).

HISTOGRAMA: (de imagen) representación gráfica de la distribución de tonos en una imagen. El eje Y representa la cantidad de pixeles y el eje X el tono.

HSV: Modelo de color compuesto de las capas Matiz, Saturación y Valor (Brillo). En inglés *Hue, Saturation, Value*.

IDC: *International Data Corporation*.

IDE: *Integrated Development Environment* (Entorno de desarrollo integrado).

JDK: *Java Development Kit*.

JRE: *Java Run Environment*.

LCD: *Liquid Crystal Display* (Pantalla de cristal líquido).

LUT: *Lookup Tables* (Tabla de consulta).

MICROBOLÓMETRO: tipo específico de bolómetro usado como detector de radiación infrarroja en cámaras térmicas.

NETD: *Noise Equivalent Temperature Difference* (Diferencia de Temperatura Equivalente a Ruido)

NTSC: *National Television System Committee*. Estándar de transmisión de video análogo usado mayormente en América.

OpenCV: Open Computer Vision (Biblioteca libre de Visión Artificial).

PAL: *Phase Alternating Line*. Estándar de transmisión de video análogo distribuido mundialmente.

PAR IMAGEN: par de imágenes capturadas por dos cámaras en el mismo instante.

PARALAJE: En inglés *parallax*, es la diferencia en la posición aparente de un objeto visto desde dos puntos de visión diferentes

PINHOLE: pequeño hoyo utilizado como apertura en sistemas ópticos.

PIXEL: *Picture Element*. Elemento accesible más pequeño en una imagen digital.

PS/2: puerto de comunicación serial de 6 pines.

RAT: *Reflected Apparent Temperature* (Temperatura Aparente Reflejada).

RCA: conector eléctrico comúnmente utilizado para señales de audio o video análogas.

REFLECTANCIA: Propiedad de un cuerpo para reflejar la luz.

RESOLUCIÓN: La resolución de una imagen indica la cantidad de detalle que se puede apreciar en ella.

RUP: *Rational Unified Process*. Proceso iterativo de diseño de *software*.

SDK: *Set Development Kit*.

SIFT: *Scale-Invariant Feature Transform*.

SURF: *Speeded Up Robust Features*.

SVD: *Singular Value Decomposition* (Descomposición en Valores Singulares).

TERMOGRAMA: Imagen capturada del espectro infrarrojo térmico.

USB: *Universal Serial Bus* (Bus Universal en Serie).

WOCA: *Write Once, Compile Anywhere* (Escribe una vez, compila en cualquier lugar).

WORA: *Write Once, Run Anywhere* (Escribe una vez, ejecuta en cualquier lugar).

Tabla de Contenido

Resumen	7
Abstract	8
Glosario.....	9
Tabla de Contenido	11
Lista de Figuras	13
Lista de Tablas	15
1 Introducción	16
1.1 Motivación.....	16
1.2 Descripción del Problema.....	17
1.2.1 Planteamiento del Problema.....	17
1.2.2 Justificación.....	18
1.3 Objetivos.....	19
1.3.1 Objetivo General	19
1.3.2 Objetivos Específicos	19
1.4 Solución propuesta	19
1.5 Metodología del trabajo y estructura del libro.....	20
2 Marco Teórico	21
2.1 Introducción	21
2.2 Estado del Arte	22
2.2.1 Técnicas de calibración Extrínseca entre cámaras de espectro visible e Infrarrojo	25
2.2.2 Aplicativos de Inspección Termográfica	28
2.2.3 Observaciones Finales.....	30
2.3 Revisión de Conceptos de Visión Artificial y Termografía	30
2.3.1 Conceptos generales de Termografía	31
2.3.2 Inspección Termográfica	34
2.3.3 Calibración Monocular de Cámaras	36
2.3.4 Calibración estéreo.....	45
3 Herramienta para inspección termográfica usando la combinación de imágenes térmicas y de espectro visible	52
3.1 Introducción	52
3.2 Descripción de Equipos y Software	53
3.2.1 Cámaras	53
3.2.2 Herramientas Software	55
3.2.3 Patrón de Calibración.....	56

3.3	Descripción del Algoritmo de Calibración para fusión de imágenes	57
3.3.1	Condiciones Iniciales.....	57
3.3.2	Calibración Monocular	61
3.3.3	Calibración Extrínseca entre cámaras y Fusión de imágenes	64
3.4	Descripción de la Aplicación	70
3.4.1	Especificación de Requerimientos	71
3.4.2	Diagramas de Clases	74
4	Pruebas y Análisis de Resultados.....	76
4.1	Introducción	76
4.2	Medición del error en el cálculo de la homografía.....	76
4.3	Procesamiento de imágenes.....	84
4.4	Protocolo de validación y reporte de inspección termográfica	87
4.4.1	Protocolo de Inspección	87
4.4.2	Reporte de Inspección Termográfica	88
4.5	Herramienta de software.....	89
5	Conclusiones	92
5.1	Trabajos Futuros	94
6	Referencias	96
7	Anexos	100
7.1	Casos de Uso Reales	100
7.2	Diagramas de secuencias	100
7.3	Pruebas Funcionales	100
7.4	Manual de Usuario	100

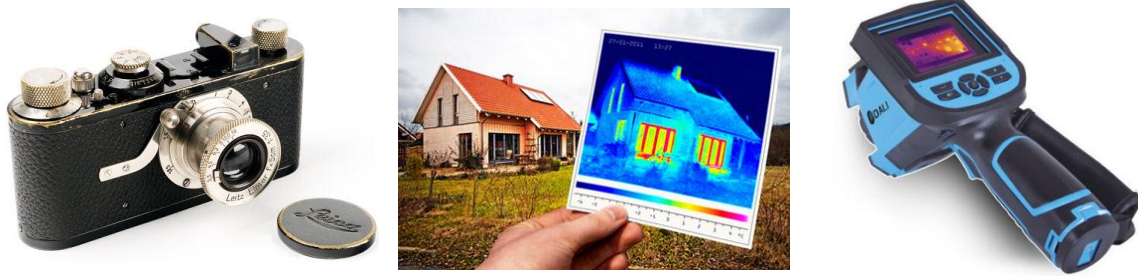
Lista de Figuras

Figura 1.1 Ejemplos de aplicación termográfica: (a) Inspección de conexiones eléctricas, tomada de (Sinais, 2013). (b) Inspección de edificios, tomada de (Arquitectura, 2013)	17
Figura 1.2 Esquema general de solución planteada	19
Figura 2.1 Diagrama Conceptual del Marco Teórico.	31
Figura 2.2 Ley de Kirchhoff	31
Figura 2.3 Configuración de una cámara infrarroja	33
Figura 2.4 Temperatura Aparente Reflejada (RAT)	33
Figura 2.5 Termograma de filtración de aire	34
Figura 2.6 (a) Interruptor de Aire incorrectamente conectado (b) Desbalance de carga en ducto de bus (c) Porta fusibles deteriorado (T/IR Systems LLC, 2014)	34
Figura 2.7 (a) (b) Aislamientos húmedos en techos (c) Inspección aérea de techo (T/IR Systems LLC, 2014)	35
Figura 2.8 (a) Calentamiento desigual, causado por desalineamiento (b) Almohadilla de bloque de rodamiento defectuosa (c) Rodamiento de eje sobrecalentado (T/IR Systems LLC, 2014)	35
Figura 2.9 (a) Aislamiento faltante edificio (b) Refractario dañado en caldera (c) Refractario comprometido en caldero de acero (T/IR Systems LLC, 2014)	35
Figura 2.10 Modelo <i>Pinhole</i> de la Cámara	36
Figura 2.11 Modelo <i>Pinhole</i> con el plano de la imagen al frente (Szeliski, 2010)	37
Figura 2.12 Centro Óptico (Hoff, 2014)	38
Figura 2.13 Efecto ' <i>barrel</i> ' (izq) y ' <i>pincushion</i> ' (der) (Szeliski, 2010).	39
Figura 2.14 Componentes de distorsión: (a) Componente Radial del Modelo de Distorsión (Hoff, 2014) (b) Componente Tangencial del Modelo de Distorsión (Hoff, 2014)	40
Figura 2.15 Transformación 3D de un punto (Hoff, 2014)	41
Figura 2.16 Método de Gradiente Descendente	45
Figura 2.17 Línea Epipolar correspondiente a un Punto 3D (Szeliski, 2010)	46
Figura 2.18 Plano Epipolar (Szeliski, 2010)	46
Figura 2.19 Homografía inducida por un plano (Zisserman & Hartley, 2004)	50
Figura 3.1 Arreglo de cámaras y Patrón de Calibración	53
Figura 3.2 Salidas y alimentación FLIR E320 (FLIR Systems, 2006)	54
Figura 3.3 Patrón de Calibración	56
Figura 3.4 Diagrama de Flujo del Algoritmo de Calibración General	58
Figura 3.5 Par imágenes en ambientes diferentes: (a) Luz de sol directa. (b) Sombra con luz natural. (c) En interior con luz artificial. (d) En interior con luz natural	59
Figura 3.6 Superposición de campos de visión. (a) Configuración cámaras. (b) Comparación de superposición del campo de visión horizontal entre cámaras con distancia $d=22.8$ cm entre los ejes ópticos	60
Figura 3.7 Esquema general de calibración monocular	61
Figura 3.8 Diagramas de flujo: (a) Calibración monocular (b) Detección de esquinas (c) Mejoramiento de localización a nivel de subpíxel	62
Figura 3.9 Fundamento gráfico de la función <i>cornerSubPix</i> de OpenCV	63
Figura 3.10 Resultado de proceso calibración monocular. (a) Imagen de entrada. (b) Detección de esquinas. (c) Imagen rectificada	63
Figura 3.11 Esquema general para el cálculo de la matriz de homografía	66
Figura 3.12 Implementaciones realizadas para aplicación de descriptores	67
Figura 3.13 Imágenes resultantes de la implementación de 4 metodologías para emparejamiento entre dos imágenes de la misma escena pero de espectro diferente,	

exceptuando (a) que presenta la relación entre dos imágenes idénticas. Tomando el orden de: búsqueda de características, descripción y matching, se tiene que: (a) SIFT-SIFT-FLANN. (b) SURF-SURF-FLANN. (c) SIFT-SURF-FLANN. (d) SIFT-SIFT-FLANN. (e) SIFT-FREAK-Fuerza Bruta.....	68
Figura 3.14 Diagramas de flujos: (a) cálculo de homografía, (b) fusión de imágenes.	69
Figura 3.15 Métodos para fusión de imágenes con proyección de espectro térmico a visible: (a) imagen en imagen, (b) fusión térmica, 60%visible-40%térmico, (c) umbralización de color con fusión a través de imagen en imagen.....	70
Figura 3.16 Diagrama de Casos de Uso <i>InVi Fusion</i>	73
Figura 3.17 Diagrama de Clases General	74
Figura 3.18 Diagrama de Clases <i>tabCalibration</i>	74
Figura 3.19 Diagrama de Clases <i>tabAnalysis_v2</i>	75
Figura 3.20 Diagrama de Clases <i>guiReport</i>	75
Figura 4.1 Diagrama de flujo para cálculo de error de proyección. (x,y) y (x',y') son coordenadas medidas.....	77
Figura 4.2 Diagramas de dispersión para error de transferencia en píxeles entre proyección de espectros: (a)De espectro térmico a visible (b)De espectro visible a térmico. Cada color corresponde a un par imagen válido proyectado. La posición de cada punto representa su error de transferencia en píxeles en la dirección x y y.	78
Figura 4.3 Gráficos de error de transferencia simétrico: (a) Diagramas de barras con valor en píxeles de error medio y desviación estándar de imágenes válidas y total. Las barras en color rojo corresponden al error por proyectar del espectro infrarrojo al visible y las de color morado del espectro visible al térmico. (b) Diagrama de barras con valores normalizados del error y desviación estándar de cada par imagen y del sistema completo. Las barras en rojo corresponden al error por cada par imagen válido, la barra en color morado representa el error de todo el sistema.	79
Figura 4.4 Ejemplos de fusión para tres configuraciones de cámaras: Configuración Flir E320 con Sharp: (a) Imagen perro. (b) Fusión térmica 50%IR (c) Termograma perro en paleta <i>Cool</i> . Configuración Flir E320 con webcam Genius: (d) Imagen de caja eléctrica. (e) Fusión térmica 50%IR (f) Termograma de caja eléctrica en paleta <i>Iron</i> . Configuración Flir E320 con Kodak: (g) Imagen de taladro. (h) Fusión térmica 40%IR. (i) Termograma de taladro en paleta <i>Iron</i>	82
Figura 4.5 Diagrama de flujo para calibración manual	84
Figura 4.6 Paletas de colores: (a) EV Color RGB. (b) EV gris (c) IR gris (d) IR <i>Rainbow</i> (e) IR <i>Iron</i> (f) IR <i>Cool</i> (g) IR <i>Hot</i> (h) IR <i>Iron</i> con inversión de color	85
Figura 4.7 Herramientas para procesamiento de imágenes del software <i>InVi Fusion</i> . (a) Histograma de termograma en paleta <i>Iron</i> . (b) Termograma con persona en paleta <i>Rainbow</i> . (c) Termograma de persona con filtro de rango por color. (d) Imagen patrón de calibración. (e) Bordes de patrón de calibración. (f) Imagen original EV de edificio. (g) Imagen EV de edificio con ecualización del histograma. (h) Fusión térmica original de poste de líneas de alta tensión. (i) Fusión térmica de poste de líneas de alta tensión corregida por desplazamiento manual	86
Figura 4.8 Ejemplos de fusión de imágenes realizada con <i>InVi Fusion</i> . (a) Escenario con personas ocultas en EV. (b) Fusión imagen en imagen con selección de área. (c) Escena IR con personas en paleta <i>Rainbow</i> . (d) Bordes de escena con aire acondicionado. (e) Fusión térmica de escena con aire acondicionado. (f) Escena IR de aire acondicionado en paleta <i>Cool</i>	86
Figura 4.9 Ejemplo de Reporte Generado por la Aplicación <i>InVi Fusion</i>	89
Figura 4.10 Interfaz de Usuario <i>InVi Fusion</i> . Pestaña para calibración de cámaras	91
Figura 4.11 Interfaz de usuario <i>InVi Fusion</i> . Pestaña de trabajo para procesamiento de imágenes.....	91

Lista de Tablas

Tabla 2.1 Tabla de emisividades. (Minkina & Dudzik, 2009)	32
Tabla 2.2 Transformaciones 2D (Szeliski, 2010). Las transformaciones preservan la característica indicada en su celda y las características de las celdas inferiores. GdL: Grados de Libertad	49
Tabla 2.3 Estado del Arte en Calibración de Arreglos de Cámaras IR y de EV.....	27
Tabla 2.4 Estado del Arte de Aplicativos de Inspección Termográfica.....	29
Tabla 3.1 Especificaciones de la Cámara FLIR E320.....	54
Tabla 3.2 Especificaciones de la Cámara Sharp YH-7B50	55
Tabla 3.3 Características de las Cámaras <i>Kodak</i> y <i>Genius</i>	55
Tabla 3.4 Librerías y herramienta software usadas.....	55
Tabla 3.5 Características del patrón de Calibración.	57
Tabla 3.6 Comparación de ambientes para captura de imágenes	60
Tabla 3.7 Evolución de la exactitud de las coordenadas de dos esquinas en el proceso iterativo	63
Tabla 3.8 Comparación de Métodos de Cálculo de Homografía.....	64
Tabla 3.9 Técnicas de extracción de puntos característicos y descriptores visuales. (Hernández & Gómez, 2013).....	67
Tabla 3.10 Especificación de Requerimientos.....	71
Tabla 4.1 Formato de impresión de valores de errores dentro de la interfaz en área de <i>log</i>	79
Tabla 4.2 Tabla con resultados de calibración extrínseca para configuración de cámaras IR FLIR E320 con tamaño de imagen 320x240 y la cámara Sharp con 640x480. El error T medio hace referencia al error medio de transferencia, MSE es el error cuadrático medio (<i>Mean Squared Error</i>) normalizado	80
Tabla 4.3 Tabla con resultados de calibración extrínseca para configuración de cámaras IR FLIR E320 con tamaño de imagen 320x240 y la cámara webcam Genius iSlim 640x480. El error T medio hace referencia al error medio de transferencia, MSE es el error cuadrático medio (<i>Mean Squared Error</i>) normalizado.....	80
Tabla 4.4 Tabla con resultados de calibración extrínseca para configuración de cámaras IR FLIR E320 con tamaño de imagen 320x240 y la cámara Kodak 2048x1536. El error T medio hace referencia al error medio de transferencia, MSE es el error cuadrático medio (<i>Mean Squared Error</i>) normalizado.....	80
Tabla 4.5 Tabla comparativa de las tres configuraciones de cámaras del error MSE normalizado con sus valores de desviaciones estándar	81
Tabla 4.6 Comparación de Aplicaciones de Inspección Termográfica.....	90



1 INTRODUCCIÓN

Contenido

1.1 Motivación.....	16
1.2 Descripción del Problema.....	17
1.2.1 Planteamiento del Problema.....	17
1.2.2 Justificación.....	18
1.3 Objetivos.....	19
1.3.1 Objetivo General	19
1.3.2 Objetivos Específicos	19
1.4 Solución propuesta	19
1.5 Metodología del trabajo y estructura del libro.....	20

1.1 MOTIVACIÓN

Gran cantidad de las tareas que los seres humanos realizan se encuentran fuertemente ligadas al sentido de la vista, lo que ha hecho de las cámaras un dispositivo de gran utilidad al permitir a las personas almacenar, compartir y analizar diferentes entornos sin necesidad de estar presentes en el lugar.

Las cámaras de espectro visible son dispositivos con un uso muy difundido en la vida cotidiana de las personas, ya que estas permiten capturar escenas del mundo real de manera similar al funcionamiento del sistema visual humano, permitiendo a las personas reconocer rápidamente los diferentes objetos presentes en la escena. Siendo un instrumento altamente usado en la investigación y entretenimiento.

Por otra parte, el desarrollo del mundo y crecimiento de la civilización ha generado diferentes retos alrededor de la eficiencia energética con el fin de dar un mejor uso a la energía eléctrica como lograr aumentar su cobertura. Al año 2013, según informe del IDC, principal proveedor global de inteligencia de mercado, las ciudades empleaban más de dos tercios de la energía mundial, albergando al 50 por ciento de la población y representando el 70 por ciento de las emisiones globales de dióxido de carbono. Conllevando a ampliar los métodos para mejorar la eficiencia energética, siendo la auditoría de energía fuertemente requerida y el uso de las cámaras termográficas uno de los métodos para auditoría de edificios, estructuras, accesorios o equipos (Moghadam & Vidas, 2014).

Las cámaras termográficas son un dispositivo que permite visualizar la información de temperatura de manera rápida y fácil con imágenes en pseudo-color llamadas termogramas. Convirtiéndose así en una herramienta indispensable en el mantenimiento predictivo y preventivo, al detectar anomalías invisibles al ojo humano, con el objetivo de mejorar procesos existentes y/o prevenir errores y fallos que puedan suponer grandes pérdidas económicas en diferentes campos de la ingeniería.

Según una nota de aplicación publicada por FLIR Systems (2014b), muestra que las cámaras termográficas, al ser un método no invasivo, sin contacto, ni destructivo, son aplicables en el área de mejoramiento en la eficiencia energética de los edificios como también en la localización de filtración de agua, el diseño de paneles solares, diseño de turbinas de viento, análisis del rendimiento térmico de piezas y sustratos semiconductores; de igual manera en la medicina para detección temprana de cáncer de piel, detección de hemorragias y medicina deportiva. La Figura 1.1 presenta dos ejemplos de aplicación.

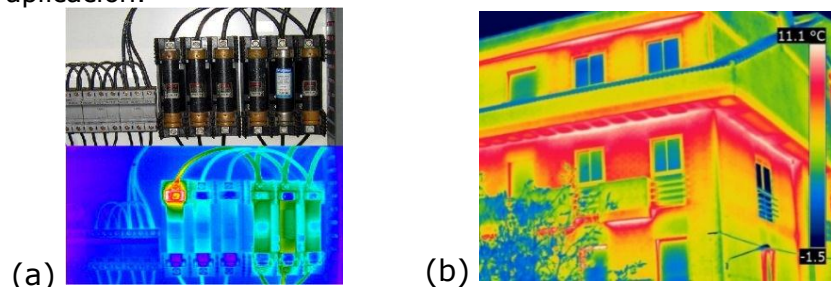


Figura 1.1 Ejemplos de aplicación termográfica: (a) Inspección de conexiones eléctricas, tomada de (Sinais, 2013). (b) Inspección de edificios, tomada de (Arquitectura, 2013)

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

1.2.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Los termogramas representan el espectro térmico de los objetos a través de imágenes en pseudo color y para su correcta interpretación es necesario un entrenamiento previo para lograr un correcto análisis. No obstante, existe un problema en la representación de temperaturas en pseudo-color, que al no ser dada por una función biyectiva absoluta, es decir que no existe un único color por cada valor de temperatura existente, puede conllevar a posibles interpretaciones erróneas durante la inspección térmica, ya que un mismo rango de color puede ser presentado para imágenes con situaciones expuestas de 300-330°C como de 20-50°C. Siendo necesario disponer de más datos para entender el contexto del problema y la escena específica.

Por su parte, las fotografías, en el espectro visible, son una herramienta que permite a las personas poder reconocer de manera más rápida y eficaz los elementos presentes en la escena.

Asociar los termogramas con las fotografías permitiría proyectar información del espectro térmico sobre la imagen en la cámara de espectro visible, o a su vez características de la imagen en el espectro visible, planos, bordes, ángulos, etc., sobre la imagen térmica, facilitando el entendimiento de la escena de estudio como la interpretación de la información térmica. Se busca entonces generar un procedimiento fácil de aplicar y ejecutar para poder calcular la relación geométrica entre dos cámaras, una termográfica y una de espectro visible, sin importar sus características o fabricante, ya que esta es la situación que más comúnmente se presenta. Además, presentar una

herramienta que permita, de manera íntegra, automatizar todo el procedimiento de calibración, para analizar las imágenes y generar el correspondiente reporte.

1.2.2 JUSTIFICACIÓN

Las imágenes en el espectro visible presentan generalmente, una mejor calidad de visualización al ser más nítidas y presentar mayor definición y resolución espacial, que los termogramas. Esto se fundamenta en que los sensores de las cámaras de luz visible incorporan muchos más elementos de detección, pero además porque las imágenes visibles se generan a partir de la radiación reflejada, mientras que los termogramas muestran la temperatura de un cuerpo basándose en la radiación emitida por dicho cuerpo. La radiación reflejada visible puede producir un contraste nítido entre las figuras de la escena con límites definidos y diferencias de intensidad; así, se puede diferenciar una línea delgada blanca junto a otra línea fina negra. Sin embargo, el calor que desprenden los objetos es transferido a los adyacentes, lo que provoca gradientes de temperatura que desdibujan los límites de las figuras en la imagen por infrarrojos (Schmidt, 2007).

Los sistemas híbridos, formados por la combinación de sensores visible y térmicos, han sido ampliamente adoptados en aplicaciones relacionadas al monitoreo e inspección. Ya que la inspección térmica aumenta la confianza en algunos equipos al permitir estimar sus tiempos de vida y posibles fallos (Ursine et al., 2012).

La complejidad para relacionar ambas informaciones recae en la gran diferencia entre los orígenes de cada una de las imágenes, la cual se refleja en la visualización de las imágenes capturadas, su tamaño, y por las diferencias de las características de las cámaras como el campo de visión y la resolución.

El presente proyecto propone una metodología para calcular la relación geométrica entre dos cámaras, una termográfica y una visible, ofreciendo una gran ventaja práctica en la fusión de imágenes al ser independiente de los fabricantes y las características de las cámaras seleccionadas, es decir de su campo de visión o tamaño de imágenes. E integrando lo anterior en una sola herramienta multiplataforma con la posibilidad, además, de calcular y aplicar la calibración intrínseca de cada cámara, realizar un procesamiento de las imágenes capturadas y generar un reporte de la respectiva inspección termográfica.

Diferenciándose así, de otros métodos propuestos como el implementado por Ursine et al. (2012), el cual realiza también una alineación de imágenes sin interfaz de usuario a través de un método más complejo que, basándose en las características comunes en el par de imágenes, incluye una etapa de alineación píxel a píxel: magnificación, posición relativa y campo de visión; seguida de una etapa de análisis metrológico. Se diferencia también de la tecnología IR-Fusion de Fluke que permite capturar imágenes de espectro visible e infrarrojo y hacer su correspondiente fusión, limitándose exclusivamente a las cámaras del mismo fabricante que son provistas de esta tecnología (Schmidt, 2007). Strandemar (2013) por su parte, presenta un método para fusión de termogramas con fotografías a través de las características de la frecuencia alta espacial del espectro visible, resaltando únicamente los bordes de las imágenes del espectro visible en la imagen térmica. Bouguet (2013) presenta una herramienta de software muy completa para calibración intrínseca y extrínseca de cámaras del mismo espectro desarrollada en Matlab®, pero no es provista de una interfaz gráfica de usuario.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GENERAL

Realizar la calibración extrínseca entre una cámara de espectro visible y una cámara térmica para inspección termográfica.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Realizar una revisión y recopilación del estado del arte sobre la calibración de cámaras térmica y de espectro visible.
- Analizar el estado del arte para selección y especificación de los algoritmos más apropiados para la realización de calibración extrínseca entre cámaras térmica y de espectro visible.
- Implementar el algoritmo de calibración seleccionado.
- Diseño e implementación de una interfaz de usuario para la automatización del proceso de calibración y la generación de reportes en tareas de inspección termográfica.
- Establecer y ejecutar un protocolo de validación considerando alguna aplicación de inspección termográfica.

1.4 SOLUCIÓN PROPUESTA

Para poder darle solución a la problemática planteada y cumplimiento a los objetivos, este trabajo propone una herramienta software que facilite las tareas de inspección termográfica fusionando la información de ambos tipos de cámaras en una sola imagen. Para ello se propone un sistema que consta de dos partes, representadas en la Figura 1.2:

- **Hardware:** el cual consta de un patrón de calibración y dos cámaras, una termográfica y una de espectro visible.
- **Software:** se divide en tres módulos: el primero permite realizar la calibración intrínseca de cada una de las cámaras y calcular las matrices de relación o realizar la calibración extrínseca entre las imágenes por estéreo. El segundo módulo permite procesar las imágenes capturadas generando la fusión de imágenes, aplicando los resultados del primer módulo, y realizar procesamiento adicional a través herramientas como ecualización del histograma, detección de bordes o cambio de paleta de colores. Por último, se generan los reportes correspondientes a la inspección termográfica realizada.

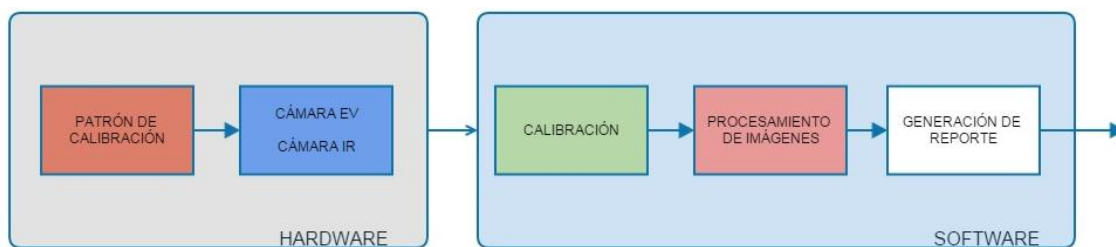


Figura 1.2 Esquema general de solución planteada

1.5 METODOLOGÍA DEL TRABAJO Y ESTRUCTURA DEL LIBRO

Este documento se organiza en 5 capítulos que incluyendo el capítulo presente exponen de forma ordenada y detallada la información necesaria para explicar la problemática y dar a entender la solución planteada, su análisis y conclusiones.

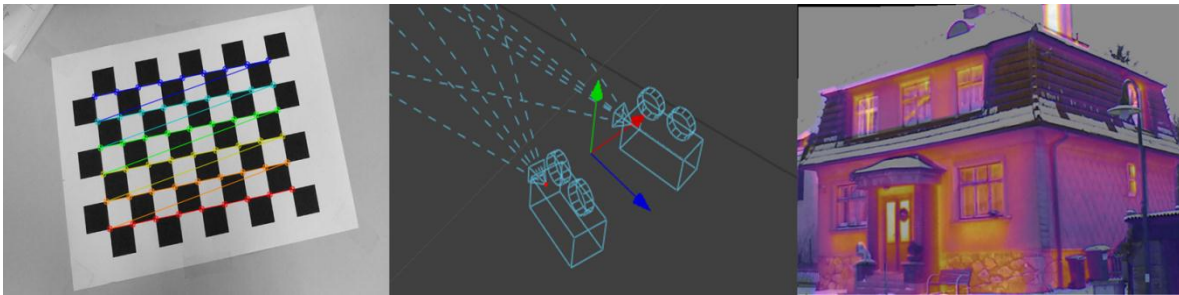
El proyecto se inició con la revisión del estado del arte en documentos referentes a inspección termográfica, calibración de cámaras, fusión de fotografías con termogramas y aplicaciones existentes para las tareas de inspección térmica. La recopilación de dicha información se encuentra en el capítulo 2 y resumida apropiadamente en dos tablas, la Tabla 2.1 que incluye el estado del arte de los artículos de investigación y la Tabla 2.2 sobre el estado del arte de los aplicativos de inspección termográfica.

El capítulo 3 presenta el desarrollo de ingeniería, el cual incluye la ejecución de las decisiones tomadas a partir de la información recopilada para realizar la herramienta de inspección propuesta. En primera medida se definió el mejor patrón de calibración a desarrollar y usar para la captura del conjunto de imágenes para calibración, y los algoritmos con el lenguaje de programación y librerías a usar en la implementación. Se procedió entonces a desarrollar el patrón de calibración, para lo cual se hicieron algunas pruebas previas de los materiales a usar para seleccionar los materiales que ofrecieran mejores resultados.

Se continuó con la implementación de los algoritmos de calibración que se dividió en dos etapas. En la primera, se implementaron los algoritmos referentes a la calibración intrínseca y se hicieron pruebas para validar su efectividad. Durante la segunda etapa, se implementaron varios métodos para la calibración extrínseca y se realizaron y analizaron pruebas para definir la mejor opción acorde a los objetivos específicos planteados. Fue necesario revisar nuevamente la teoría y el estado del arte para encontrar nuevas opciones que mejoraran los resultados, adoptando el cálculo de la homografía como alternativa para relacionar las imágenes-par estéreo.

Paralelamente a la fase anterior, se desarrolló una interfaz de usuario con tres funciones principales: permitir el proceso de calibración y cálculo de homografía, ofrecer herramientas para el procesamiento de las imágenes y permitir generar reportes a la correspondiente inspección termográfica.

El capítulo 4 expone pruebas y análisis de resultados sobre la solución de ingeniería final. El capítulo 5 presenta las conclusiones del presente proyecto e indica algunos trabajos futuros que pretenden dar continuación y mejoras al procedimiento planteado.



2 MARCO TEÓRICO

Contenido

2.1	Introducción	21
2.2	Estado del Arte	22
2.2.1	Técnicas de calibración Extrínseca entre cámaras de espectro visible e Infrarrojo	25
2.2.2	Aplicativos de Inspección Termográfica	28
2.2.3	Observaciones Finales	30
2.3	Revisión de Conceptos de Visión Artificial y Termografía	30
2.3.1	Conceptos generales de Termografía	31
2.3.2	Inspección Termográfica	34
2.3.3	Calibración Monocular de Cámaras	36
2.3.4	Calibración estéreo	45

2.1 INTRODUCCIÓN

El objetivo general de este trabajo es realizar una calibración extrínseca entre una cámara de espectro visible e infrarrojo para inspección termográfica. Con el fin de cumplir a cabalidad este objetivo se ha planteado una revisión y análisis del estado del arte en calibración de cámaras térmica y de espectro visible. Para lograrlo, se realizó una búsqueda en las bases de datos de artículos científicos más reconocidas y se encontraron gran variedad de artículos relacionados con la temática. Debido a la especificidad del tema, no se encuentran gran cantidad de artículos que se enfoquen en el problema de la calibración de cámaras para inspección térmica, sin embargo, se encuentran artículos que a pesar de tener otras aplicaciones, aportan de una u otra forma a la resolución del problema. Teniendo en cuenta estas características se ha reducido la cantidad de artículos analizados a seis, los cuales se reseñan en la siguiente subsección, y se resumen en una tabla comparativa, donde se resaltan sus características más importantes.

Adicionalmente, se hizo una revisión de los conceptos de visión artificial y termografía, que describen las propiedades y alcances del sistema que ha de realizar la calibración de las cámaras. Esto con el objetivo de dejar claras las nociones básicas que deben tenerse en cuenta para entender el desarrollo del proyecto.

2.2 ESTADO DEL ARTE

En esta sección se ha hecho un resumen inicial de los artículos que más han aportado al desarrollo del proyecto. Posteriormente, esta información se ha organizado en una tabla que resalta las características más importantes de los trabajos revisados. Por último se realiza una comparación de las aplicaciones *software* de inspección termográfica, lo que permite observar las características más importantes que debería ofrecer este tipo de programas y compararlo con el desarrollo hecho en este proyecto.

A continuación se escriben los nombres de los artículos mencionados y se citan sus autores, resumiendo la información más relevante para el desarrollo de este trabajo.

- ***Design of a 3-D Infrared Imaging System Using Structured Light*** (Yang & Chen, 2011).

En este trabajo los autores se ocupan en el diseño de un Sistema de termografía 3D usando un proyector, dos cámaras de EV y una cámara IR. La reconstrucción de la escena está basada en luz estructurada, por lo cual es necesario el proyector mencionado. Se hace énfasis en que no es posible calibrar el sistema usando técnicas convencionales puesto que la cámara IR sólo es sensible a información térmica, por lo que no sería capaz de capturar un patrón de calibración convencional. En el artículo se muestra el diseño de tres patrones, cuyo desempeño se evalúa con los resultados obtenidos.

Respecto al patrón de calibración de las cámaras EV, los autores afirman que a pesar de ser impreso en una impresora de alta calidad, existen imperfecciones que disminuyen la exactitud de la calibración. Por lo tanto, utilizan una pantalla LCD para mostrar un patrón de ajedrez y calibrar las cámaras EV. Siguiendo el método de Zhang (2000), se realiza una serie de capturas del patrón y los parámetros de las cámaras son hallados a través de la transformación lineal directa (DLT), sin tener en cuenta distorsiones. Posteriormente se utilizan los parámetros obtenidos como valores iniciales en una optimización no lineal que permite obtener los coeficientes de distorsión. Los autores utilizan el algoritmo de Levenberg-Marquardt para resolver esta optimización.

Para la calibración de la cámara IR se utiliza el mismo método descrito, sin embargo se utiliza un patrón de calibración compuesto por un tablero agujereado, donde se han introducido bombillas miniatura, las cuales emiten luz y calor, lo que hace posible que el patrón pueda ser detectado tanto por una cámara EV como por una IR.

Cabe resaltar también que los autores mencionan la utilización del *toolbox* de calibración para *Matlab* desarrollado por Jean Yves Bouguet (2013), para hallar los parámetros intrínsecos y la posición relativa de las cámaras.

La metodología utilizada en este artículo reporta muy buenos resultados, permitiendo adquirir la distribución de temperatura de la superficie de un objeto, sin embargo, respecto al patrón de calibración IR se afirma que las formas de los puntos de luz y de calor emitidas por las bombillas miniatura, no son idénticas cuando el tablero de calibración se ubica en diferentes posiciones, lo que deja abierta la posibilidad de diseñar un patrón de calibración de mayor precisión.

- **3D Mapping of Surface Temperature using Thermal Stereo** (Prakash, Lee, & Caelli, 2006).

Este artículo presenta una técnica para recuperar mapas de temperatura 3D a partir de un par de cámaras IR previamente calibradas. Esta publicación es relevante para el presente proyecto por cuanto se ocupa de encontrar una forma de calibrar cámaras IR, más no en cuanto a la obtención de mapas 3D. Para lograr calibrar las cámaras se menciona la utilización del *toolbox* de Bouquet (2013) para *Matlab*, y se utiliza un patrón de calibración convencional calentado por un proyector. De acuerdo a los autores, debido a la diferencia de emisividad entre los recuadros blancos y negros del tablero de ajedrez, las cámaras IR pueden detectar la cuadrícula del patrón.

Finalmente después de realizar la calibración de las cámaras y encontrar una forma sencilla de resolver el problema de correspondencia de puntos entre las dos imágenes, los autores concluyen que su técnica es particularmente útil en ambientes oscuros, debido a que permite obtener mapas de temperatura en 3D, utilizando únicamente cámaras IR. Respecto a las imágenes del patrón de calibración obtenidas, se ve que son un poco difusas, es decir que los bordes de los recuadros no están bien definidos. Esto puede afectar negativamente la extracción de las esquinas de estas imágenes. La realización del patrón no presenta mayores dificultades, pero requiere de ser calentado.

- **Infrared and Visible Spectrum Camera Calibration** (Polikovskiy, Kameda, & Ohta, 2011)

Este trabajo se ocupa específicamente de la calibración de una cámara IR y una cámara de EV. Además se centra en la construcción de un patrón de calibración que pueda ser detectado por los dos sensores. Para evaluar sus resultados, los autores realizan el proceso de calibración utilizando el patrón propuesto y un patrón de tablero de ajedrez, de forma que pueden comparar y seleccionar el patrón que mejores resultados ofrece. El patrón que se plantea se compone de tres capas, la primera es un tablero agujereado de color negro. La segunda capa es simplemente una hoja de papel blanco, y como última capa se adiciona una fuente de calor uniforme. De forma que al final, la cámara IR podrá detectar los agujeros que se encuentran a mayor temperatura que el resto del tablero, y la cámara de EV podrá detectarlos porque su color blanco contrasta con el negro del tablero superficial. Los autores mencionan que para el proceso de calibración, utilizaron el ya mencionado *toolbox* de calibración para *Matlab* (Bouquet, 2013).

Los resultados que obtienen, les permiten concluir que la utilización del patrón propuesto, aumenta la precisión de la calibración en comparación con la utilización de un patrón convencional. La desventaja de este patrón, es la dificultad de construcción, y la obtención de una fuente de calor uniforme de forma rectangular.

- **Thermal/Visible Autonomous Stereo Vision System Calibration Methodology for Non-controlled Environments** (Ursine, Calado, Teixeira, & Diniz, 2012)

Este artículo ahonda más en el problema de calibrar dos cámaras de diferente espectro, y para ello presenta una metodología rápida y de bajo costo con alta confiabilidad en ambientes no controlados. Además de proponer un patrón de fácil realización y alta confiabilidad para hallar la posición relativa entre las dos cámaras, los autores parten de la afirmación de que el proceso de calibración estéreo que permite hallar la correspondencia de puntos entre dos perspectivas, y fusionar o unir dos imágenes de diferentes cámaras, no se puede aplicar en el caso de sistemas híbridos. Esto debido a que durante este proceso es necesario hacer una búsqueda para determinar la disparidad

entre las imágenes, lo que no es posible teniendo imágenes de diferente espectro. Adicionalmente, la rectificación de las imágenes infrarrojas también podría afectar la información térmica, si no se realiza correctamente.

La propuesta de los autores respecto al patrón de calibración consiste en utilizar la diferencia de emisividad de dos materiales, en este caso madera y cobre, para construir un patrón de tablero de ajedrez, que no necesita ser calentado y puede ser utilizado tanto en interiores como en exteriores. Su propuesta compara un patrón con fondo de madera pintada de negro y recuadros de cobre y un patrón con fondo de cobre y recuadros de madera pintada de negro. Los mejores resultados se obtienen con el primero, debido a que al tener menos cobre, refleja luz en menor medida, evitando posibles distorsiones de la forma de los recuadros.

Respecto a la técnica de fusión de espectros utilizada, los autores proponen la alineación pixel a pixel, que es una transformación afín, es decir que permite variar la orientación y el tamaño de las líneas en la imagen, más no su paralelismo. Para lograrlo, detectan las esquinas de las imágenes capturadas y hallan la diferencia de tamaños entre los recuadros de cada imagen. Esta diferencia permite hallar una constante de magnificación, de forma que la imagen en la que el patrón se representa en menor cantidad de píxeles, es magnificada hasta reducir la diferencia a cero. El siguiente paso consiste en hallar la posición relativa de los puntos. Ya que el tamaño de los patrones es el mismo en imágenes de diferente espectro, la distancia de la esquina superior izquierda de la imagen hasta la esquina superior izquierda de un patrón de calibración debería ser la misma. En caso de no ser así, la imagen con mayor distancia es recortada para hacer coincidir su campo de visión con el de la otra imagen. Esta distancia no varía, para todas las imágenes, ya que la posición relativa de las cámaras es la misma. Así que es posible hallar una constante para un grupo de imágenes y recortarlas usando el mismo valor. Finalmente, únicamente con los valores de magnificación y posición relativa de puntos es posible realizar la alineación pixel a pixel de imágenes de diferente espectro.

El patrón de calibración y la metodología propuesta por los autores arroja muy buenos resultados, cualitativos y cuantitativos. Los autores concluyen respecto a estos, que el desarrollo del patrón de calibración por diferencia de emisividad es muy prometedor, debido a que se comporta de muy buena manera aún en ambientes no controlados, su construcción no presenta mayores dificultades, y no necesita de fuentes de calor.

- ***Fast and Accurate calibration-based thermal/color sensors registration***
(St-Laurent, Prévost, & Maldague, 2010)

En este trabajo se realiza el registro la imagen de una cámara térmica y una cámara de espectro visible, utilizando un patrón de calibración original optimizado para espectro infrarrojo. La aproximación de los autores consiste en automatizar un proceso de alineamiento de píxeles que consta de cuatro pasos. Inicialmente se determinan los parámetros internos de ambas cámaras. A continuación se realiza el alineamiento de los ejes ópticos. Como tercer paso se determinan el ángulo de inclinación y la razón entre los campos de visión de los sensores. Y por último se generan *look-up tables*.

Para la calibración o determinación de los parámetros internos de cada cámara, los autores utilizan el *toolbox* de calibración de *Matlab*. También citan el modelo propuesto por Heikkila y Silven (1997) en el que se basa la herramienta desarrollada por Bouguet (2013). El proceso es entonces básicamente el mismo descrito anteriormente para calibración de una cámara.

Después de hallar los parámetros de las cámaras, se alinean los ejes ópticos, rotando una de las cámaras de manera que la misma característica localizada a determinada distancia en la escena, sea observada en el punto principal de ambas cámaras. Para este paso se utiliza el patrón de calibración planteado, que consta de un material térmicamente aislante al que se le han realizado agujeros equidistantes con una fuente de calor en su parte posterior.

El tercer paso propone hallar el ángulo de inclinación extrayendo las esquinas del patrón de calibración y comparando su posición angular relativa con la de su respectivo punto principal. El ángulo de inclinación de la cámara IR en relación con la cámara EV se estima por la mediana de las diferencias entre las posiciones angulares de las esquinas correspondientes. La diferencia de los campos de visión puede ser entonces estimada, de forma análoga a como lo hacen Ursine et. al. (2012) en su trabajo anteriormente reseñado.

Por último, la generación de *LUT's*, consiste en guardar los resultados hallados para cierta profundidad, para que puedan ser utilizados en registro de imágenes a diferentes distancias.

La técnica desarrollada por los autores en este trabajo va un paso más allá que en los trabajos anteriormente reseñados, ya que permite modificar la matriz de proyección para diferentes profundidades, lo que la hace versátil para diferentes tipos de aplicaciones, y el patrón de calibración propuesto, a pesar de necesitar una fuente de calor, permite ser detectado muy bien por ambos tipos de sensores.

- ***3D Thermal Mapping of Building Interiors using an RGB-D and Thermal Camera*** (Vidas, Moghadam, & Bosse, 2013).

Por último, el trabajo de Vidas et al. (2013) desarrolla un sistema de mapeo térmico 3D que utiliza una cámara RGB con sensor de profundidad (Kinect) y una cámara térmica de baja resolución para reconstruir escenas con información de temperatura. La calibración intrínseca de cada cámara se realiza de la misma forma ya mencionada utilizando en este caso un patrón de calibración que consta de una máscara térmica de recuadros sostenida al frente de una fuente de calor. Para la determinación de la posición relativa de las cámaras se propone una técnica que utiliza el sensor de profundidad para simplificar la calibración extrínseca hallando al finalizar, una transformación de seis grados de libertad.

A pesar de que estas técnicas no son aplicables al problema que enfrenta el presente proyecto, se resalta este artículo porque sus resultados deben ser evaluados cualitativamente, ponderando las características de ambos espectros y resaltando los detalles que mejoran la apreciación de la escena, lo que también puede ser aplicado a los resultados de la herramienta de calibración que se explica en el siguiente capítulo.

2.2.1 TÉCNICAS DE CALIBRACIÓN EXTRÍNSECA ENTRE CÁMARAS DE ESPECTRO VISIBLE E INFRARROJO

En la Tabla 2.1 se han resumido los trabajos académicos reseñados. Además de los artículos se ha incluido una patente (Strandemar, 2013) que registra el desarrollo de una cámara de sensores opto eléctrico e infrarrojo, y permite realizar fusión de espectros en vivo. Esta patente cobra importancia porque demuestra la utilidad del trabajo en un nivel comercial, y permite comparar las características de sistemas de espectros EV e IR de diferentes fabricantes, con un sistema integrado como el que allí se propone.

La mayoría de estos trabajos, como se ha descrito, involucran el uso de cámaras de ambos espectros, IR y Visible en diversas aplicaciones, como por ejemplo, sistemas de reconstrucción de imagen 3D con información térmica, para inspecciones nocturnas (Prakash et al. 2006; Vidas et al., 2013; Yang & Chen, 2011). O simplemente propuestas de métodos para calibrar sistemas híbridos (Polikovskiy et al., 2011; Ursine et al., 2012).

Las características más importantes de este conjunto de artículos académicos se resumen en dos categorías, los patrones de calibración que utilizan, y el método de calibración que proponen. De acuerdo a Yang y a Chen (2011) la precisión de un resultado de calibración depende principalmente del patrón utilizado. Por esta razón, y porque la utilización de una cámara IR exige un patrón con características especiales, se ha prestado especial atención a esta categoría. En la Tabla 2.1, en la columna Patrón(es) de Calibración, al frente de cada ítem se ha escrito entre paréntesis el espectro del sensor para el que fue construido. Esto permite diferenciar los patrones que no cumplen una función diferente a la de un patrón común.

Entre las propuestas analizadas existen básicamente dos tipos de patrones. Los que utilizan una fuente de calor y los que utilizan la diferencia de emisividad de los materiales para generar contraste en el espectro IR. Dentro de esta última categoría califica el patrón que se construyó para este trabajo, y que se basa en el utilizado por Ursine et al., (2012). Las características que influenciaron la construcción de este patrón sobre los demás fueron su facilidad de implementación y su buen comportamiento en ambientes no controlados.

Por otro lado, en lo que tiene que ver con los diferentes métodos utilizados para calibrar cámaras, vale la pena anotar que todos los trabajos referencian de alguna manera los métodos propuestos por Heikkila y Silven (1997) y/o Zhang y Way (1999), que se resumen muy brevemente, con leves variaciones en algunos casos, en los primeros tres ítems de la calibración propuesta por Yang y Chen (2011). Además, una herramienta software en la que coinciden todos los autores es el *toolbox* de calibración de *Matlab*, desarrollado por Bouguet (2013).

En lo que tiene que ver con el cálculo de las transformaciones entre cámaras, o calibración extrínseca, resaltan los artículos trabajos de St-Laurent et al. (2010), y Ursine et al. (2012). Especialmente el último, en donde se parte de la afirmación de que realizar una transformación de espectro a partir de la Rotación y Traslación de las cámaras no es posible, debido a las diferencias en *FOV*, tamaño y espectro. Por lo tanto, se resuelve hacer una alineación pixel a pixel, compensando la diferencia de tamaño de las imágenes, luego alineándolas y recortando aquella con el mayor *FOV*, para obtener una fusión.

Tabla 2.1 Estado del Arte en Calibración de Arreglos de Cámaras IR y de EV.

Trabajo	Arreglo	Patrón(es) de Calibración	Calibración
(Yang & Chen, 2011)	• 2 Cámaras RGB. • 1 Cámara IR • 1 Proyector LCD para generar luz estructurada	• Patrón de LEDs (IR) • Tablero de Ajedrez en LCD (EV)	(Zhang & Way, 1999): • Captura de varias tomas de un patrón de calibración. • Obtención de Parámetros Intrínsecos y Extrínsecos sin distorsión usando DLT. • Optimización Levenberg-Marquardt del Mínimo Error Cuadrático Medio para hallar coeficientes de distorsión. • Utiliza (Bouguet, 2013)
(Prakash et al., 2006)	• 2 Cámaras IR	• Patrón de Ajedrez común, calentado por un reflector. (IR)	(Heikkila & Silven, 1997; Zhang & Way, 1999) • Utiliza (Bouguet, 2013) • Reconstrucción 3D por geometría epipolar y correspondencia de puntos.
(Polikovsky et al., 2011)	• 1 Cámara RGB. • 1 Cámara LWIR	• Patrón de Ajedrez común. (IR & EV) • Patrón de Hoyos con fuente de calor trasera (IR & EV)	(Heikkila & Silven, 1997; Zhang & Way, 1999) • Utiliza (Bouguet, 2013) • Comparación de error con cada patrón.
(Ursine, Calado, Teixeira, Diniz, et al., 2012)	• 1 Cámara IR • 1 Cámara RGB	• Patrón de Recuadros de Cobre sobre madera pintada de negro. (IR & EV) • Patrón de cobre con recuadros negros (IR & EV)	(Heikkila & Silven, 1997; Zhang & Way, 1999) para calibración monocular. • Utiliza (Bouguet, 2013) Calibración entre cámaras o alineación pixel a pixel: • Magnificación. • Posición Relativa de puntos. • Campo de Visión (FOV).
(St-Laurent et al., 2010)	• 1 Cámara LWIR • 1 Cámara RGB	• Patrón de hoyos con fuente de calor trasera. (IR & EV) • Patrón de Calibración 3D de alta precisión (Requiere solo una captura) (EV)	(Heikkila & Silven, 1997) Calibración monocular. • Utiliza (Bouguet, 2013). • Alineación de los ejes ópticos. • Determinación de Ángulo de Inclinación y Razón de Campos de Visión. • Generación de LUTs para la ubicación de cada pixel.
(Vidas et al., 2013)	• 1 Cámara RGB-D • 1 Cámara IR	• Patrón de Máscara térmica sobre fondo de diferente emisividad. (IR) • Monitor de computador con capacidad de generar características distintivas en forma y temperatura. (IR & EV)	(Zhang & Way, 1999) para calibración monocular. • Hallar la transformación de 6 DoF entre las dos cámaras: • Se halla la correspondencia entre un conjunto de líneas (2D-3D) e intersecciones de planos en ambos espectros. • Se usa un algoritmo iterativo de optimización no lineal para minimizar la distancia entre los pares de líneas 2D-3D y obtener la transformación.
(Strandemar, 2013)	• 1 sensor EV • 1 sensor IR	No implementa	• Iguala resoluciones de ambas imágenes • Extrae en espectro visible altas frecuencias espaciales (bordes y contornos) • Fusiona bordes y contornos de EV con termogramas

2.2.2 APLICATIVOS DE INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA

En la Tabla 2.2 se ha hecho una comparación de las características de las aplicaciones de inspección, análisis y reporte de termografía más importantes o reconocidas. La selección se ha hecho de acuerdo a la importancia o reconocimiento de las empresas que las han desarrollado en el mercado y/o por su avance científico en esta área.

La mayoría de estas aplicaciones se ponen a disposición de aquellos usuarios que adquieren una cámara infrarroja, y por lo tanto, todas tienen características generales bastante parecidas, enfocadas a la generación de reportes donde se aprecien las diferentes características de temperatura de la imagen tomada. De igual forma, se presentan diferentes herramientas para analizar simultáneamente los termogramas y los fotogramas de una escena, consiguiendo observar la información del espectro infrarrojo y del espectro visible. Logrando la interpretación de formas, espacios y elementos que el espectro infrarrojo no permite visualizar correctamente. Por lo tanto es común encontrar opciones para superponer imágenes de espectro visible a las imágenes infrarrojas ("*IC_Report DuoVision*"), y opciones que permiten variar el brillo y contraste de las dos imágenes de modo que se pueda generar una transparencia y se permita apreciar los dos espectros. Sin embargo, este método no siempre entrega un buen resultado debido a la diferencia de tamaños entre las imágenes IR y EV. En otra categoría se pueden agrupar las aplicaciones que verdaderamente ofrecen una transformación proyectiva entre los puntos de vista de las imágenes, permitiendo hallar una verdadera fusión. ("*SmartView 3.5.16.0*", "*FLIR Tools 4.0.13330*", "*Testo IRSOFT Soft. 3.4*"). Con la desventaja que la fusión que ofrecen estas aplicaciones, se realiza entre dos espectros capturados por una misma cámara (no el mismo sensor), o una transformación que funciona sólo para un par de imágenes y no para cualquier par de imágenes tomadas por un arreglo de dos cámaras. Se presenta además, la aplicación *Spectra* desarrollada por Moghadam et al.(2014), la cual, a pesar de no permitir generar reportes, permite hacer reconstrucción en 3D de la escena inspeccionada para un mejor análisis.

En la Tabla 2.2 se incluye también un aplicativo nacional que, aunque no es como los demás, una herramienta de inspección, análisis y reporte termográfico, es la única aplicación colombiana que se encontró, relacionada con el tema de procesamiento digital de imágenes termográficas aplicada a la inspección termográfica ("*TermUV*"). Debido a esto, es en comparación a las demás, la que menos características de análisis infrarrojo tiene. Sin embargo, es la única que implementa gran número de recursos como redes neuronales y transformadas Wavelet y de Fourier para la detección de defectos.

Tabla 2.2 Estado del Arte de Aplicativos de Inspección Termográfica.

Software Prop.	Smart View 3.6. 16.0 Fluke Thermography USA	FLIR Tools 4.0. 13330 FLIR Systems USA	IC-Report DuoVision Trotec GmbH_Co.KG Alemania	Thermal-Cam Monitor COX Co. Ltd Korea	Guide IR Analyzer 1.6 Wuhan Guide InfraRed Technology China	Spectra CSIRO-ICT Australia	Testo IrSoft 3.4 Testo AG Alemania	TermUV PSI, Universidad del Valle, Colombia
Adquisición de imágenes desde una cámara	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Plantillas o editores para Reportes	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗
Soporte para adquisición de VideoIR	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✗
Modificación de parámetros IR (emisividad, etc.)	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Herramientas de análisis de temperatura	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗
Preprocesamiento (Filtros, corrección de img., etc.)	✗	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✗
Fusión IR y EV, asistida o edición imgs ya fusionadas	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✗
Calibración intrínseca y/o extrínseca	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
Detección de defectos y cálculo estadístico	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✓

2.2.3 OBSERVACIONES FINALES

De acuerdo con los diferentes artículos revisados en el Estado del Arte, y a los diferentes Aplicativos de Inspección termográfica evaluados, se hace necesario realizar unas observaciones finales al respecto, donde se resaltan las conclusiones más importantes a las que se llegaron al revisar los trabajos previos.

- Para lograr una calibración de gran exactitud es necesario construir un patrón de calibración que sea detectable por las cámaras, cuyas medidas sean muy precisas y cuya superficie sea totalmente rígida (que se pueda detectar como un plano).
- Los métodos que más facilidad y exactitud ofrecen para calibrar cámaras son aquellos desarrollados por Heikkila y Silven (1997) o Zhang y Way (1999) y que se han implementado en un *toolbox* muy completo como es el de Bouguet (2013).
- De acuerdo a Ursine et al. (2012), el método de calibración estéreo, por el cual es posible determinar la correspondencia entre imágenes y encontrar un mapa de disparidad que relacione los puntos correspondientes en cada imagen, no es aplicable a sistemas híbridos debido a las diferencias de resolución, *FOV* y tamaño de imagen. Por lo tanto se debe encontrar otra forma de calibrar este tipo de sistemas.
- Entre las aplicaciones de inspección termográfica, se resalta "*Testo IR Soft 3.4*" que permite fusionar dos imágenes sin conocer la posición relativa de las cámaras. El método que utiliza es la homografía a partir de cuatro correspondencias, la cual es muy útil en el caso en el que no se ha calibrado el sistema. Sin embargo exige de la identificación de correspondencias por parte del usuario para cada par de imágenes de fusión.

2.3 REVISIÓN DE CONCEPTOS DE VISIÓN ARTIFICIAL Y TERMOGRAFÍA

Según diversos autores, una calibración extrínseca corresponde al proceso de hallar los parámetros extrínsecos de una cámara en relación a un objeto 3D o escena (Szeliski, 2010). Dicho de otro modo, corresponde a estimar la pose de una cámara respecto a una escena. En general, la estimación de pose corresponde a hallar los parámetros de rotación y traslación de la cámara, respecto a un sistema coordenado global o general, (Zisserman & Hartley, 2004). La rotación y traslación, son la información necesaria para realizar un cambio desde el sistema coordenado de la cámara al sistema coordenado global y viceversa (Siebert & Cyganek, 2011).

Con calibración extrínseca entre dos cámaras, este trabajo hace referencia a encontrar la transformación proyectiva u homografía que existe entre los sistemas coordenados de los planos de imagen de cada cámara, esto con el objetivo de mejorar el proceso de inspección termográfica, utilizando dicha transformación para obtener una fusión de ambos espectros. Al final se obtendrá una imagen que a pesar de las diferencias de perspectiva de las cámaras, permite observar la información de espectro infrarrojo y visible de un objeto de interés, como si hubiera sido capturado por una sola cámara.

En la Figura 2.1 se presenta un diagrama conceptual que expone los ejes temáticos de este trabajo.

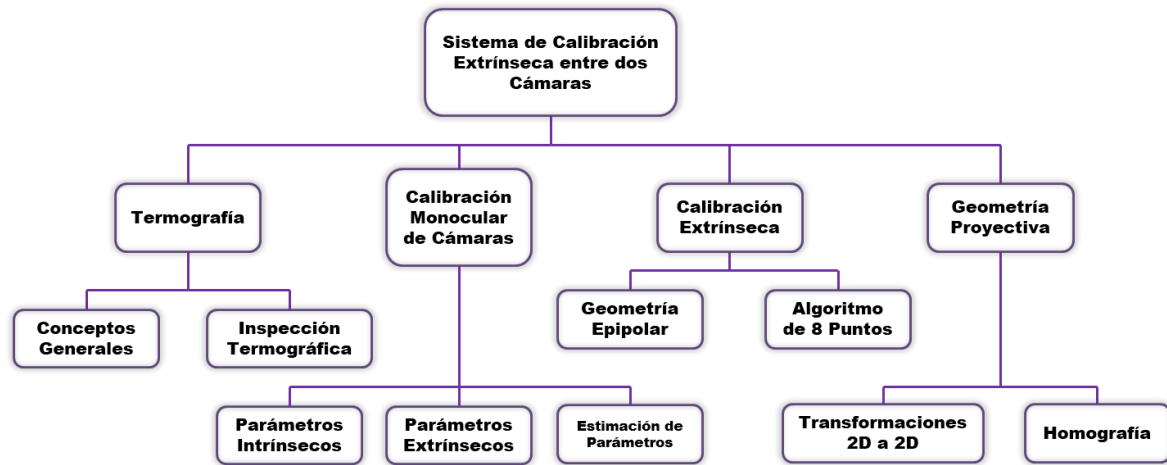


Figura 2.1 Diagrama Conceptual del Marco Teórico.

2.3.1 CONCEPTOS GENERALES DE TERMOGRAFÍA

La termografía es la técnica de producir una imagen a partir de la radiación infrarroja que emiten los cuerpos, radiación que es captada y procesada para obtener información de la temperatura del cuerpo de interés (Minkina & Dudzik, 2009). A continuación se exponen algunas de las características de la radiación térmica:

Ley de Planck: Relaciona, para cuerpos negros, la cantidad de energía de radiación en Cuantos según la frecuencia f de la onda emitida, ecuación (2.1):

$$E = h * f; \quad h = 6.63 * 10^{-34} [J * s] \quad (2.1)$$

Ley de Wien: Permite conocer la máxima longitud de onda, $\lambda_{m\acute{a}x}$, emitida por un cuerpo negro a una temperatura T dada, ecuación (2.2):

$$\lambda_{m\acute{a}x} * T = 2.9 * 10^{-3} [mK] \quad (2.2)$$

Ley de Stefan-Boltzmann: Relaciona, en un cuerpo negro, la energía total radiada por unidad de área y de tiempo, ecuación (2.3):

$$I_{total} = \sigma * T_c^4; \quad \sigma = 5.67 * 10^{-8} \left[\frac{W}{m^2 * K^4} \right] \quad (2.3)$$

Ley de Kirchhoff: La suma de la radiación que sale de un objeto es igual a 1. Ver ecuación (2.4). La Figura 2.2 describe la ley de modo gráfico

$$e + \tau + \rho = 1 \quad (2.4)$$

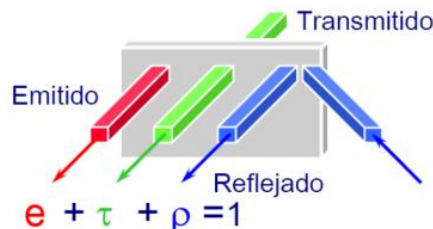


Figura 2.2 Ley de Kirchhoff

Donde e es el factor de emitancia, τ es el factor de transmitancia, y ρ es el factor de reflectancia.

En la radiación infrarroja, la emisividad (ϵ) es el parámetro más importante del objeto

ya que es la cantidad de radiación emitida por un este, comparada con la que emitiría un cuerpo negro. Se entiende así como la eficiencia con la cual el objeto irradia la energía desde su superficie. Es un valor que oscila entre 0 y 1, siendo 0 poca emisividad y 1 alta emisividad. La emisividad varía según el material, la textura de la superficie, el ángulo de visión y la temperatura. Así por ejemplo, el acero puede variar su factor de emisividad según sea brillante u oxidado, siendo 0.18 y 0.85 respectivamente. La Tabla 2.3 presenta los valores de emisividad de algunos elementos.

Teóricamente un objeto que emite el 100% de la radiación recibida, es llamado cuerpo negro. En otras palabras su emitancia es 1, reflectancia 0 y transmitancia 0. La radiación emitida dependerá de la temperatura. Un cuerpo negro no se encuentra de manera natural, sino que se fabrica y se utiliza para la calibración de los sensores térmicos de las cámaras termográficas (Sergio, 2011).

La radiación infrarroja, IR, incluye mayores longitudes de onda que las que el ojo humano es capaz de percibir, estas se agrupan en IR cercano, 0.78-1.5 μ m, IR medio, 1.5-20 μ m, e IR lejano, 20-1000 μ m. Por otra parte, la atmósfera tiene dos bandas para buena transmisión del rango infrarrojo (Minkina & Dudzik, 2009). Estas bandas se definen como la banda de onda corta (SW), 2-5 μ m, y la banda de onda larga (LW), 8-14 μ m. La mayoría de sensores y cámaras térmicas trabajan en estas dos bandas, sin embargo existen dispositivos infrarrojos que trabajan en el IR cercano y en el IR lejano.

Como lo explican Minkina y Dudzik (2009), los sensores térmicos han evolucionado desde sensores puntuales, lineares hasta sensores estructurados en arreglos de plano focal, FPA. Éstos últimos consisten en estructuras matriciales de detectores puntuales los cuales suelen ser microbolómetros, sensores térmicos no refrigerados. Cada detector corresponderá a un píxel de la imagen infrarroja en pseudo-color finalmente generada. La Figura 2.3 presenta la configuración de una cámara infrarroja.

Tabla 2.3 Tabla de emisividades. (Minkina & Dudzik, 2009)

Tipo	Elemento	Estado superficie	Temperatura (°C)	Emisividad
Metal	Aluminio	Pulido	50-100	0.040-0.06
		Hoja anodizada, negra sin brillo	70	0.95
		Puro, polvo		0.16
	Cobre	Negro oxidado	27	0.78
		Pulido	50-100	0.02
	Acero y Hierro	Oxidado	200-600	0.80
		Esmerilado	400-1000	0.14-0.38
No metal	Ladrillo	Magnesita refractario	1000-1300	0.38
		Rojo, rugoso	20	0.88-0.93
	Porcelana	Blanca, brillante		0.70-0.75
		Satinada	20	0.92
	Plástico	PVC, opaco	70	0.93
	Arena		20	0.90
	Tierra		37	0.950
Pinturas	Aluminio		50-100	0.27-0.67
	Amarillo cadmio			0.28-0.33
	Verde cromo			0.65-0.70
	Aceite		17	0.87
		Barniz gris	20	0.96

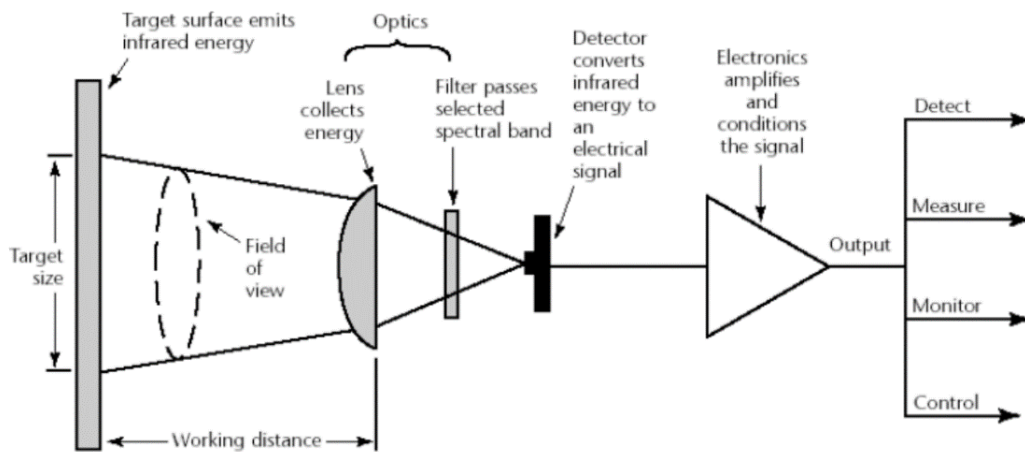


Figura 2.3 Configuración de una cámara infrarroja

A continuación, se definen cuatro características de las cámaras térmicas, (Testo, 2010):

- La resolución define la capacidad del sensor de reproducir ciertos detalles de imagen muy pequeños.
- La sensibilidad térmica, NETD (*Noise Equivalent Temperature Difference* - diferencia de temperatura equivalente a ruido), describe la menor diferencia en temperatura entre dos píxeles que la cámara puede medir. A menor NETD, mayor exactitud en las termografías.
- El campo de visión (FoV) determina el área que puede ser observada por la cámara. Se expresan en ángulos, ej. $24^{\circ} \times 30^{\circ}$.
- El campo de visión instantáneo (IFOV), o campo de visión mínimo, es el campo de visión de un detector individual (píxel) en un arreglo.

En la captura de imágenes térmicas es importante tener en cuenta que la cámara térmica percibe la radiación térmica, que puede ser la combinación de las radiaciones de la energías del objetivo, la que éste refleja y la de cuerpos cercanos, fenómeno denominado temperatura aparente reflejada (RAT), (Sergio, 2011). Ver Figura 2.4 .

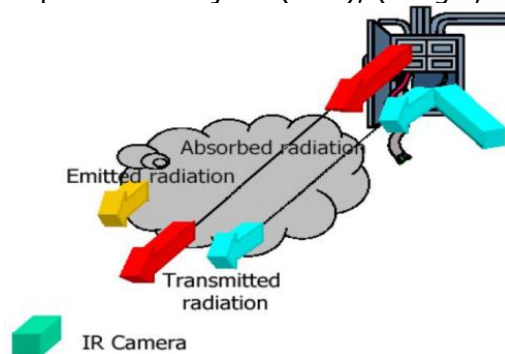


Figura 2.4 Temperatura Aparente Reflejada (RAT)

2.3.1.1 Tipos de Análisis

Existen dos tipos básicos de análisis sobre el mismo termograma en función de los intereses, el grado de exactitud y las necesidades del problema. Se puede realizar un análisis cualitativo o cuantitativo (Sergio, 2011).

El análisis cualitativo la imagen térmica se realiza para identificar anomalías de distinta magnitud, localizarlas y evaluar el nivel de gravedad. La Figura 2.5 muestra una

situación de filtración de aire en la que un análisis cualitativo es suficiente para entender el problema presente.

En el análisis cuantitativo se busca determinar las temperaturas de las partes de la imagen térmica que son de interés. Y a partir de esta información extraer conclusiones sobre las anomalías detectadas y las soluciones a adoptar.

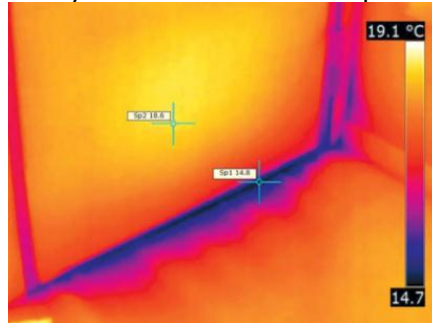


Figura 2.5 Termograma de filtración de aire

2.3.2 INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA

Existen muchas áreas de la ingeniería y la ciencia donde la termografía puede aplicarse. Sin embargo, aquellas tareas para las que ésta ha sido más frecuentemente utilizada, se han estandarizado. Basándose en los estándares existentes, y principalmente en los del organismo de normalización "ASTM International", se han documentado las siguientes tareas de inspección termográfica. (ASTM International, 2010, 2011, 2014)

- **Sistemas de Distribución de Energía**

En instalaciones de sistemas de distribución de energía la termografía se utiliza para encontrar defectos producidos por un aumento constante de la temperatura. Así como también, detección de componentes fríos, cuya temperatura debería ser mayor. Entre otras situaciones, se puede detectar las siguientes: conexiones sueltas o deterioradas, sobrecargas, cargas desbalanceadas, circuitos abiertos, calentamiento inductivo, armónicos, y en general equipo defectuoso. En la Figura 2.6 se presentan algunas de las fallas más comunes a ser detectadas en sistemas de distribución de energía.

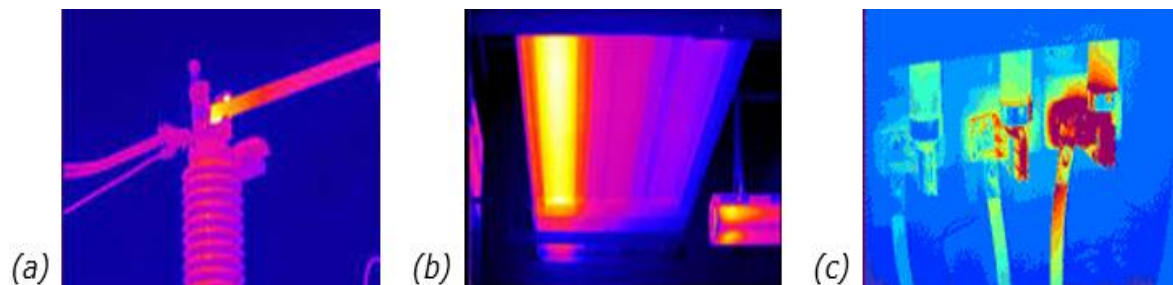


Figura 2.6 (a) Interruptor de Aire incorrectamente conectado (b) Desbalance de carga en ducto de bus (c) Porta fusibles deteriorado (T/IR Systems LLC, 2014)

- **Techos Planos**

Los techos sin inclinaciones son proclives a tener infiltraciones de agua, lo que puede deteriorarlos. La termografía es utilizada en estos ambientes para detectar evidencia de humedad, debido a cambios en la conductividad y/o capacitancia térmicas de los techos. En la Figura 2.7, (a), (b) y (c) se pueden observar algunas de las situaciones que permite identificar la termografía en techos.

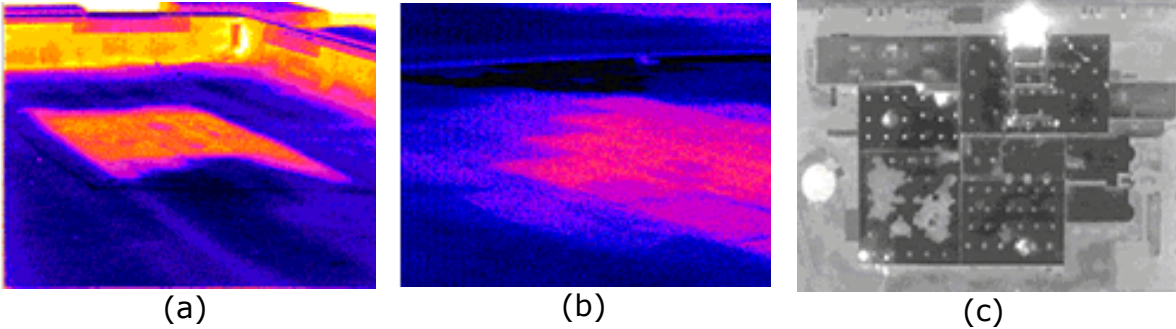


Figura 2.7 (a) (b) Aislamientos húmedos en techos (c) Inspección aérea de techo (T/IR Systems LLC, 2014)

- **Sistemas Mecánicos.**

En sistemas mecánicos se genera calor a medida que los equipos operan. La fricción, el desalineamiento o la tensión inadecuada en correas causan un calentamiento excesivo en los equipos. El trabajo de inspección termográfica permite detectar entre otros: excesiva o escasa lubricación de rodamientos, fricción excesiva, mala alineación y excesiva o escasa tensión en sistemas de correas. En la Figura 2.8 se pueden observar algunas de las detecciones de fallas más comunes usando termografía.

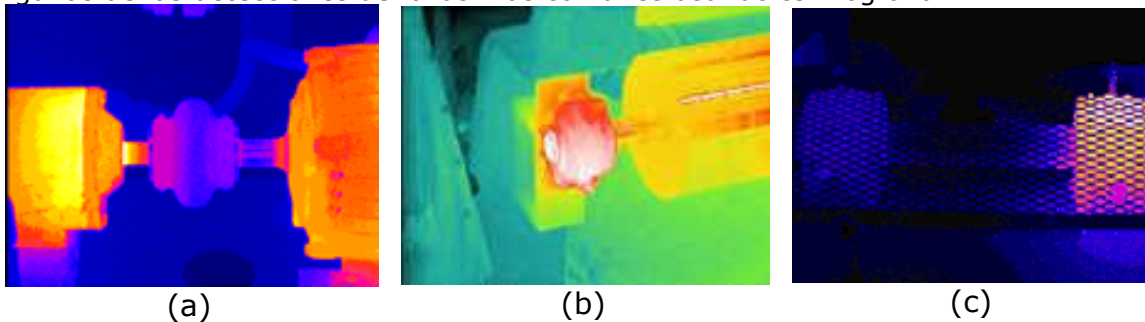


Figura 2.8 (a) Calentamiento desigual, causado por desalineamiento (b) Almohadilla de bloque de rodamiento defectuosa (c) Rodamiento de eje sobrecalentado (T/IR Systems LLC, 2014)

- **Pérdida de Energía en Estructuras**

En sistemas aislados térmicamente la termografía infrarroja permite detectar daños o ausencia de material aislante que permitirían una pérdida de energía excesiva en los puntos defectuosos. Debido a los cambios en la conductividad térmica y/o en la capacitancia térmica que se producen como consecuencia de los defectos físicos en los sistemas con aislamiento térmico, una cámara IR es ideal para detectar este tipo de fallas.

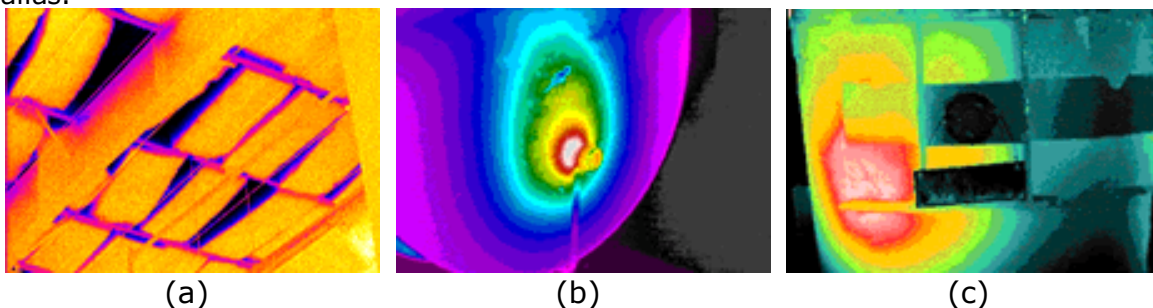


Figura 2.9 (a) Aislamiento faltante edificio (b) Refractario dañado en caldera (c) Refractario comprometido en caldero de acero (T/IR Systems LLC, 2014)

2.3.3 CALIBRACIÓN MONOCULAR DE CÁMARAS

Con el fin de hallar una relación lineal entre un termograma y una fotografía, es necesario calibrar las cámaras con las que estos fueron capturados. El objetivo principal de este proceso es obtener un conjunto de imágenes, cuya captura se pueda aproximar a un modelo lineal, donde las líneas rectas en el mundo resultan en líneas rectas en las imágenes (Szeliski, 2010).

Calibrar una cámara significa básicamente estimar sus parámetros intrínsecos (internos) y extrínsecos (externos). Esta estimación es en gran medida útil para multitud de tareas en visión artificial (Cyganek & Siebert, 2011). En el caso presente se utiliza para estimar la posición y orientación (parámetros extrínsecos) de las cámaras involucradas en la toma de imágenes de inspección termográfica, y para la corrección de las posibles distorsiones en dichas imágenes (parámetros intrínsecos). Como ya se ha mencionado, el principal problema que enfrenta el análisis de termogramas es determinar formas y bordes naturalmente apreciables en el espectro visible. Para hallar una transformación entre los planos de imagen de dos cámaras, se puede partir de la posición y orientación de una respecto a otra (cómo se verá en la sección 2.3.4.4.1), es decir que al determinar la posición y orientación de las cámaras será posible encontrar una homografía entre las imágenes de ambos espectros. Esto es, una matriz de transformación que permita reorganizar la información proveniente de una primera cámara, como si hubiera sido tomada por una segunda cámara, o viceversa. En conclusión, al calcular una matriz de homografía, y transformar una imagen utilizando dicha matriz, será posible distinguir en las imágenes de ambos espectros, los objetivos que se deseaban capturar, al tiempo que su información de temperatura, simplificando así el procedimiento de análisis de un termograma.

Para lograr desarrollar una aplicación que permita automatizar este proceso, es necesario entender los conceptos que involucra. En las subsecciones y secciones siguientes, se hace una explicación de dichos conceptos y de cómo afectan la solución del problema.

2.3.3.1 Modelo Pinhole de la Cámara

El modelo *pinhole* de la cámara consiste en un recinto oscuro, en el cual la luz entra por medio de un pequeño agujero (Cyganek & Siebert, 2011). El agujero es lo suficientemente pequeño para que los rayos pasen a través, sin dispersión. La imagen que se forma al fondo de la caja, se encuentra por lo tanto invertida como se puede ver en la Figura 2.10 . Este modelo es lo suficientemente simple para poder entender la formación de imágenes a través de una proyección perspectiva.

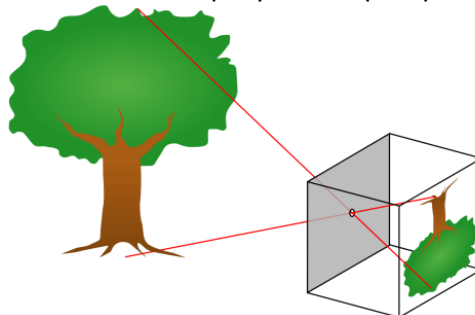


Figura 2.10 Modelo *Pinhole* de la Cámara

A partir de este modelo se desprenden las ecuaciones de la proyección perspectiva simple. Si en lugar de tomar el plano de la imagen atrás del centro de proyección, se toma al frente de éste, se obtiene una imagen como la de la Figura 2.11 .

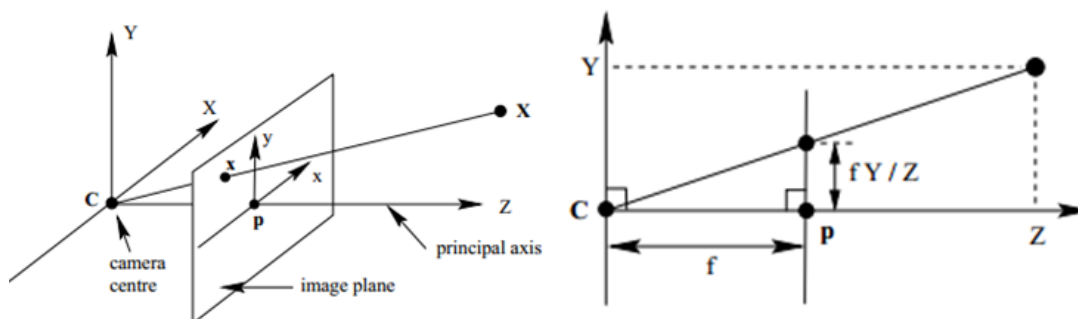


Figura 2.11 Modelo *Pinhole* con el plano de la imagen al frente (Szeliski, 2010)

Resulta evidente que existe una relación entre la distancia focal (f), las coordenadas (X , Y , Z) y las coordenadas (x , y) del plano de la imagen. Esta relación está definida por la semejanza de triángulos. Para entender la utilidad de la distancia focal y qué otros parámetros se pueden obtener de la proyección perspectiva simple, es necesario explicar la relación entre las coordenadas de la imagen (píxeles), y las coordenadas del plano de la imagen.

El sistema coordenado que se presenta en la Figura 2.11 , a la izquierda, corresponde al sistema de coordenadas de la cámara. Es decir, un sistema de coordenadas 3D (X , Y , Z) con unidades en metros y el origen en el centro de proyección. Por convención, el eje Z apunta hacia afuera, a lo largo del eje óptico. El eje X apunta a la derecha y el eje Y apunta hacia arriba.

En contraste, el sistema coordenado del plano de la imagen es un sistema bidimensional (x , y). Sus unidades podrían estar en milímetros y el origen se encuentra en la intersección del eje óptico con el plano de la imagen (es decir el punto p de la Figura 2.11).

Por último, las coordenadas de la imagen corresponden a la representación digital que se obtiene al tomar una fotografía. Esto es, una malla con un número determinado de píxeles (acrónimo de *picture element*, o elemento de la imagen) con un valor que varía de 0 a 255 por pixel, por ejemplo, para una imagen en escala de grises con píxeles de 8 bits. El origen se encuentra en la esquina superior izquierda, las columnas corresponden a un eje x , y las filas a un eje y . El valor de dos de los parámetros intrínsecos que se hallan en una calibración corresponden a las coordenadas (x , y) del centro de esta imagen. Este punto corresponde al origen del plano de la imagen ya mencionado.

La explicación de los diferentes sistemas coordenados que se ha hecho, se justifica porque en la práctica, los datos con los que se cuenta para calibrar una cámara son las coordenadas y valores de los píxeles y no, las distancias en metros y milímetros del sistema coordenado de la cámara y del plano de la imagen respectivamente.

Como se había mencionado, al calibrar una cámara se hallan una serie de parámetros, de los cuales los parámetros intrínsecos son los siguientes:

- Longitud focal (f).
- Tamaño del píxel.
- Coeficientes de distorsión (pueden ser hasta 5).
- Centro óptico. (c_x , c_y).

Inicialmente se hace una estimación asumiendo todos los coeficientes de distorsión iguales a cero, y posteriormente, por medio de una optimización no lineal se halla la distorsión de la imagen.

La longitud focal se presenta claramente en la Figura 2.11 , y relaciona las coordenadas

de un pixel con las coordenadas del punto al que representa dicho pixel en el mundo real. La ecuación (2.5) se obtiene por semejanza de triángulos.

$$\frac{y}{Y} = \frac{f}{Z} \quad (2.5)$$

Donde y es la altura en el plano de la imagen; Y es la altura en el sistema coordenado global; f es la longitud focal y Z es la profundidad a la que se encuentra el punto que se proyecta al plano de la imagen. Resolviendo para y , en la ecuación (2.6),

$$y = f * \frac{Y}{Z} \quad (2.6)$$

Del mismo modo para x en la ecuación (2.7),

$$x = f * \frac{X}{Z} \quad (2.7)$$

En la Figura 2.12 se puede apreciar el punto al que corresponden los parámetros c_x y c_y del centro óptico de la imagen.

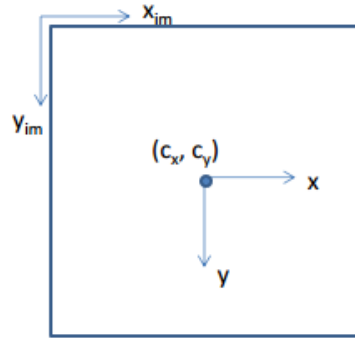


Figura 2.12 Centro Óptico (Hoff, 2014)

Los valores de estos parámetros así como los de la distancia focal, son usualmente hallados en términos de pixeles. El parámetro conocido como tamaño del pixel es un factor de conversión de pixeles (x_{im}, y_{im}) a milímetros, y corresponde al tamaño de cada pixel en el sistema de coordenadas del plano de la imagen (x, y) . Una forma de convertir de coordenadas de la imagen a coordenadas del plano de la imagen involucra el centro óptico y el tamaño del pixel (s_x ó s_y), y viene dada por las expresiones expuestas en las ecuaciones (2.8) y (2.9).

$$x = (x_{im} - c_x) * s_x \leftrightarrow x_{im} = \frac{x}{s_x} + c_x \quad (2.8)$$

$$y = (y_{im} - c_y) * s_y \leftrightarrow y_{im} = \frac{y}{s_y} + c_y \quad (2.9)$$

Donde x_{im} e y_{im} son las coordenadas de la imagen en pixeles. Si se reemplazan los valores de x e y de la segunda forma de las ecuaciones (2.8) y (2.9), por los de las ecuaciones (2.7) y (2.6) respectivamente, se obtienen las expresiones (2.10) y (2.11):

$$x_{im} = \left(\frac{f}{s_x}\right) * \frac{X}{Z} + c_x \quad (2.10)$$

$$y_{im} = \left(\frac{f}{s_y}\right) * \frac{Y}{Z} + c_y \quad (2.11)$$

Se concluye entonces que no es necesario conocer los valores de f , s_x o s_y ; sólo se necesita conocer su relación. Es decir f_x y f_y , como se ve en la ecuación (2.12):

$$f_x = \left(\frac{f}{s_x}\right); f_y = \left(\frac{f}{s_y}\right) \quad (2.12)$$

De la ecuación (2.12) se puede concluir que, si los pixeles son cuadrados f_x y f_y serán iguales.

Otro parámetro intrínseco que no se ha mencionado corresponde al factor de oblicuidad o "skew factor". Este factor corresponde a la oblicuidad entre los ejes del sensor, debida a que éste no se encuentre montado perpendicularmente al eje óptico. Usualmente se representa con una 's' o con la letra alfa.

Los parámetros intrínsecos de la cámara se agrupan en la matriz intrínseca K como se ve en la ecuación (2.13):

$$K = \begin{bmatrix} f_x & s & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

2.3.3.1.1 Modelo de Distorsión

Los parámetros intrínsecos que modelan las posibles distorsiones presentes al capturar una imagen, son los coeficientes de distorsión, y básicamente describen el comportamiento real de los puntos proyectados en una imagen, ya que estos no se pueden representar usando únicamente el modelo *pinhole* de la cámara. A continuación se describirá el origen de estos parámetros, y cómo pueden afectar la toma de las imágenes.

El modelo *pinhole* estudiado asume que las cámaras obedecen a un modelo de proyección lineal, donde las líneas rectas en el mundo son capturadas como líneas rectas en la imagen (Szeliski, 2010). Desafortunadamente muchos lentes tienen una evidente distorsión radial. Esta distorsión tiene como consecuencia la generación de una curvatura visible en la proyección de líneas rectas. Existen dos clases de distorsión radial: los efectos barril y alfiletero (del inglés *barrel* y *pincushion*, respectivamente). El modelo de distorsión radial indica que las coordenadas en las imágenes observadas se encuentran desplazadas hacia afuera (*barrel*) o hacia adentro (*pincushion*) del centro de la imagen. En la Figura 2.13 a la izquierda se puede ver el efecto barril, y a la derecha el efecto alfiletero.



Figura 2.13 Efecto 'barrel' (izq) y 'pincushion' (der) (Szeliski, 2010).

Otro tipo de distorsión que puede ocurrir debido a que el lente no se encuentre

totalmente paralelo al plano de la imagen es la distorsión tangencial. El efecto que genera es el cambio de escala, en la imagen, en una dirección tangente a un círculo alrededor del eje óptico. Siguiendo el modelo usado por Heikkila y Silven (1997) se describen las distorsiones radial y tangencial a continuación:

Modelo de Distorsión radial, ecuación (2.14):

$$\begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} * (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_5 r^6) \quad (2.14)$$

$$r = x^2 + y^2 \quad (2.15)$$

Donde $\begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix}$ es un punto de la imagen que ha sufrido el efecto de la distorsión; $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ es el vector de coordenadas del punto en su posición ideal: k_1 , k_2 , y k_3 son los coeficientes de distorsión radial, y por último, r es la distancia desde el centro de la imagen que se define en la ecuación (2.15). El modelo de distorsión Tangencial se define en la ecuación (2.16). En la Figura 2.14 se presentan los componentes de distorsión.

$$dx = \begin{bmatrix} 2k_3 xy + k_4 * (r^2 + 2x^2) \\ k_3 * (r^2 + 2y^2) + 2k_4 xy \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

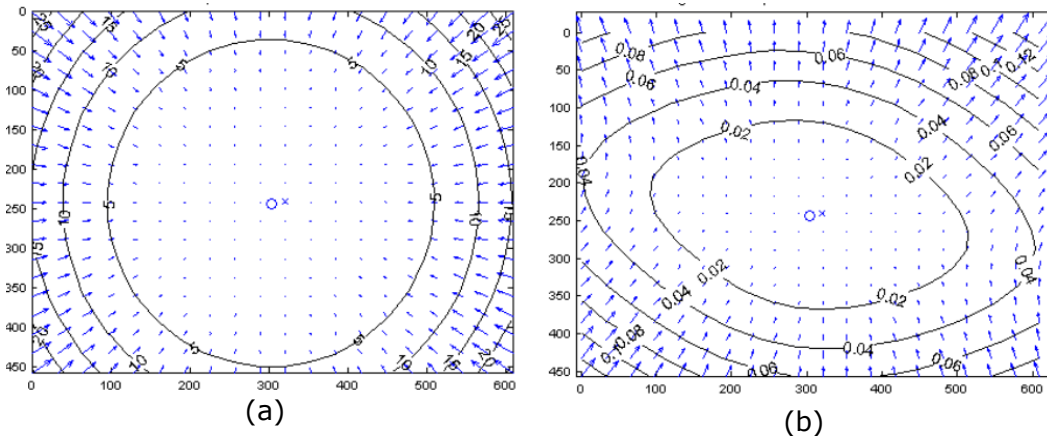


Figura 2.14 Componentes de distorsión: (a) Componente Radial del Modelo de Distorsión (Hoff, 2014) (b) Componente Tangencial del Modelo de Distorsión (Hoff, 2014)

2.3.3.1.2 Modelo de Proyección Completo

Heikkilä y Silven (1997) afirman que un modelo de cámara para una calibración precisa, se puede derivar de la combinación del Modelo *Pinhole* con la corrección para las componentes de distorsión radial y tangencial. Una breve descripción de dicho modelo viene dada por los siguientes pasos:

- Un punto 3D se proyecta al plano de la imagen $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$ usando el Modelo *Pinhole*.
- El punto es distorsionado usando las ecuaciones (2.14) y (2.16)

$$\begin{pmatrix} x_d \\ y_d \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} * (1 + k_1 r^2 + k_2 r^4 + k_5 r^6) + dx \quad (2.17)$$

- La ubicación de un número de píxeles de interés es hallada teniendo en cuenta la expresión (2.18):

$$\begin{pmatrix} x_p \\ y_p \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f_x x_d + c_x \\ f_y y_d + c_y \end{pmatrix} \quad (2.18)$$

De la ecuación (2.18) se pueden hallar las distancias focales y el centro óptico. Típicamente se hace una estimación de estos parámetros, sin tener en cuenta la distorsión. Posteriormente se lleva a cabo una optimización no lineal para encontrar todos los parámetros (incluyendo $k_1 \dots k_5$) y minimizar cualquier error residual de las imágenes.

2.3.3.2 Parámetros Extrínsecos

Estimar los parámetros extrínsecos de una cámara significa estimar su postura (posición y orientación) respecto a un plano que representa el patrón de calibración, o estimar la postura del plano respecto a la cámara (Szeliski, 2010). En otras palabras, los parámetros extrínsecos no son inherentes a las características de la cámara, sino a las características de la escena que se captura. Por lo tanto, al calibrar una cámara con un número determinado de tomas de un patrón de calibración, se hallan tantas matrices de parámetros extrínsecos, como fotografías se hayan tomado del patrón.

Un punto tridimensional, o en otras palabras, un vector que inicia en el origen del sistema coordenado de la cámara y apunta a la dirección del objeto que representa en el mundo real, puede ser transformado al sistema coordenado bidimensional que representa una imagen utilizando una matriz de parámetros intrínseca. Sin embargo, los puntos que representan los objetos de cualquier escena están referenciados a un sistema de coordenadas tridimensional más general, llamado sistema coordenado global. El sistema coordenado 3D de la cámara, y el patrón de calibración se encuentran ambos referenciados a unas coordenadas globales. La transformación de los puntos del patrón de calibración desde el sistema coordenado global hacia el sistema coordenado de la cámara, es una transformación 3D que se compone de una rotación y una traslación, es decir, orientación y posición.

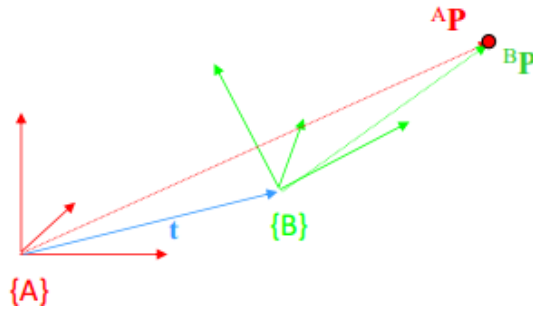


Figura 2.15 Transformación 3D de un punto (Hoff, 2014)

Una transformación tridimensional está descrita por una matriz de rotación y un vector de traslación. La rotación es una matriz cuadrada de nueve elementos que representa tres ángulos. Y el vector de traslación representa simplemente la distancia entre los orígenes de los sistemas coordenados entre los que se está realizando una transformación (como se ve en la Figura 2.15). En la ecuación (2.19) se presenta la transformación que se realiza sobre un punto para ser representado en otro sistema coordenado.

$$P_A = {}^A_B R * P_B + t \quad (2.19)$$

Donde P_A es el punto en el sistema coordenado $\{A\}$; ${}^A_B R$ es la matriz de rotación del sistema $\{B\}$ al sistema $\{A\}$; P_B es el punto en el sistema coordenado $\{B\}$; y t es la distancia desde el origen de $\{B\}$ al origen de $\{A\}$.

Una forma de simplificar esta transformación consiste en utilizar coordenadas homogéneas para representar los puntos. Esto significa añadir la unidad como un elemento extra al vector de tres coordenadas que representa el punto que se desea transformar. La matriz de transformación será entonces, una matriz 4x4 que contenga la matriz de rotación, seguida por el vector de traslación, y una fila extra de cuatro elementos; tres de ellos son cero y el último un uno, como se ve en la ecuación (2.20).

$$H = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} P_A = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix} \quad (2.20)$$

Donde P_A es el vector de coordenadas homogéneas (X, Y, Z) que representa al punto P en el sistema coordenado $\{A\}$; r_{ij} son cada uno de los elementos que componen la matriz de rotación; y t_i son las filas del vector de traslación.

La transformación se simplifica, como se ve en la ecuación (2.22):

$$P_A = H * P_B \quad (2.21)$$

Esto es lo que se conoce como una transformación rígida o Euclidiana, es decir, una transformación en la que se conservan las distancias entre cada par de puntos.

Si los puntos tridimensionales de una escena capturada se encuentran en coordenadas globales, es necesario que sean transformados a coordenadas de la cámara. Para lograrlo es necesario conocer sus parámetros extrínsecos, que como se había mencionado, corresponden a una matriz de rotación y un vector de traslación. Anteriormente se había mostrado la manera de transformar puntos de un sistema coordenado 3D a otro sistema coordenado 3D. Sin embargo, la matriz extrínseca por sí sola (3x4), permite proyectar puntos 3D a un plano 2D con una multiplicación matricial. En la ecuación (2.22) se muestra la matriz extrínseca.

$$M_{ext} = \begin{pmatrix} {}^c_R & t_{Gorg}^c \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{pmatrix} \quad (2.22)$$

Donde, ${}^c_R$ es la rotación del Sistema Coordenado Global al Sistema Coordenado de la Cámara, y t_{Gorg}^c es la traslación del origen del Sistema Coordenado Global en el Sistema Coordenado de la Cámara.

La Proyección Perspectiva Completa es la proyección de un punto 3D en Coordenadas Globales (homogéneas) a un punto en la imagen de píxeles, lo que se puede ver en la ecuación (2.23):

$$\begin{pmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{pmatrix} = K * M_{ext} * \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}^G, \quad x_{im} = \frac{x_1}{x_3}, \quad y_{im} = \frac{x_2}{x_3} \quad (2.23)$$

Donde K es la matriz intrínseca.

2.3.3.3 Estimación de Parámetros

Después de tener claros los parámetros que modelan la geometría de una cámara y una escena, es necesario describir el proceso que se lleva a cabo para estimar dichos parámetros. Se desea obtener una matriz 3x4 de parámetros extrínsecos a partir de un conjunto de puntos. Para lograrlo, existen variedad de técnicas lineales y no lineales. A continuación se describen algunas de ellas.

• Transformación Lineal Directa (DLT)

La transformación lineal directa es un método utilizado para estimar la postura de una cámara, es decir sus parámetros extrínsecos. Para explicarla, se asume que existe una correspondencia entre puntos 3D, y puntos 2D en una imagen. Este método utiliza la matriz intrínseca y relaciona la proyección de un punto 3D en el mundo, con un punto en la imagen de píxeles como se ve en la ecuación (2.23). El propósito del método es solucionar un sistema de ecuaciones lineales para encontrar las 12 incógnitas que supone la matriz extrínseca, ver ecuación (2.22); tratándolas como variables independientes.

Asumiendo que se conoce la matriz intrínseca de la cámara, es posible trabajar con coordenadas normalizadas, es decir, asumir que el origen se encuentra en el centro de la imagen, que la distancia focal efectiva es igual a uno, y que las coordenadas normalizadas están dadas por la ecuación 2.24:

$$x_{norm} = \frac{X}{Z}, y_{norm} = \frac{Y}{Z} \quad (2.24)$$

Donde X, Y y Z son coordenadas del mundo. Para encontrar las coordenadas de píxeles en la imagen basta con multiplicar las coordenadas normalizadas por la matriz intrínseca.

La proyección de un punto 3D en el mundo a un punto de la imagen normalizada se puede ver en la ecuación (2.25):

$$p_n = M_{ext} * P = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & t_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & t_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & t_z \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.25)$$

Multiplicando y dividiendo para hallar x_{norm} e y_{norm} en la ecuación (2.26):

$$x_{norm} = \frac{r_{11}X + r_{12}Y + r_{13}Z + t_x}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + t_z}, y_{norm} = \frac{r_{21}X + r_{22}Y + r_{23}Z + t_y}{r_{31}X + r_{32}Y + r_{33}Z + t_z} \quad (2.26)$$

Multiplicando ambos lados de cada igualdad por el denominador se obtienen dos ecuaciones linealmente independientes con 12 incógnitas. Por lo que es necesario conocer la correspondencia 3D 2D entre al menos 6 puntos para resolver el sistema. Para hallar la solución de este sistema, se representa de la forma $Ah = 0$, donde A corresponde a los coeficientes de las ecuaciones y h es un vector que contiene las incógnitas. Para la ecuación (2.26), el sistema resultante sería igual a la ecuación (2.27):

$$Ah = \begin{pmatrix} X & Y & Z & 0 & 0 & 0 & -xX & -xY & -xZ & 1 & 0 & -x \\ 0 & 0 & 0 & X & Y & Z & -yX & -yY & -yZ & 0 & 1 & -y \end{pmatrix} \quad (2.27)$$

$$= (r_{11}, r_{12}, r_{13}, r_{21}, r_{22}, r_{23}, r_{31}, r_{32}, r_{33}, t_x, t_y, t_z)^T = 0$$

• Algoritmos Iterativos de Estimación no Lineal

Una estrategia comúnmente utilizada al resolver un problema de estimación de parámetros, es hallar un supuesto de solución por medio de *DLT*, y posteriormente optimizar la solución por medio de un algoritmo iterativo. En cada uno de los algoritmos iterativos, se procede con el objetivo de minimizar los errores residuales entre los valores que retorna una función y los puntos originales de los que se sabe su ubicación.

La descripción del problema para la estimación de parámetros extrínsecos es la siguiente: se tiene una imagen de un objeto. Se conoce la geometría de dicho objeto (es decir que se conocen algunos puntos característicos). Se conoce la ubicación de los

puntos característicos en la imagen. Y por último, se desea conocer la posición y orientación del objeto con respecto a la cámara. Para resolverlo se asume que existe una función (f) que retorna la proyección de los puntos en la imagen (y), y que toma como argumento los parámetros extrínsecos que modelan la pose del objeto (x). Como se conocen los puntos originales de la imagen (y_0) se puede tratar de minimizar el error utilizando las expresiones de mínimos cuadrados que se muestran en las ecuaciones (2.28) y (2.29):

$$S = \sum_{i=1}^n r_i^2 \quad (2.28)$$

$$r_i = y_i - f(x_i, \beta) \quad (2.29)$$

Donde, x es la posición observada de los puntos característicos, y es la localización esperada de los puntos característicos, f es la función a la que se intenta ajustar los datos, y $\beta = (\beta_1 \dots \beta_n)$ es el vector de los parámetros del modelo que minimizan a S .

En un sistema no lineal, las derivadas $(\delta r_i)/(\delta \beta_j)$ son ecuaciones gradiente que no tienen una solución cerrada. En lugar de ello, los valores iniciales deben ser elegidos para los parámetros. Entonces, los parámetros se refinan iterativamente, es decir, los valores se obtienen por aproximación sucesiva al hacer uso del parámetro de actualización delta (Δ), como se ve en la ecuación (2.30).

$$\beta_j \approx \beta_j^{[k+1]} = \beta_j^{[k]} + \Delta \beta_j \quad (2.30)$$

Las condiciones para tener éxito en la búsqueda no lineal de los parámetros consisten en tener unos valores iniciales de los parámetros β bastante aproximados a los valores reales, que la función f que relaciona los parámetros con el conjunto de medidas se ajuste lo mejor posible al comportamiento de los mismos, y que además, el conjunto de medidas estén poco o nada contaminadas con ruido (Viala, 2006).

○ Gauss-Newton

Es un algoritmo empleado para solucionar problemas de mínimos cuadrados no lineales, el cual es una modificación al método de optimización de Newton Raphson, (Kaj Madsen, Hans Bruun, 2004), evitando el uso de las segundas derivadas, lo que implica que es computacionalmente más eficiente. Además necesita un número menor de iteraciones para lograr la convergencia y es más robusto ante posibles mínimos locales.

El algoritmo de Gauss Newton soluciona el anterior problema de la siguiente manera (Gratton, Lawless, & Nichols, 2004)

Paso 1: Elegir unos valores iniciales para $\beta(0)$.

Paso 2: Repetir hasta convergencia:

Paso 2.1: Solucionar ec.(2.31). Para hallar Δ

$$J(\beta_t)^T J(\beta_t) \Delta = -J(\beta_t)^T r(\beta_t) \quad (2.31)$$

Paso 2.2: Actualizar valores de β , (2.32)

$$\beta^{[k+1]} = \beta^{[k]} + \Delta \quad (2.32)$$

○ Gradiente Descendente

Método empleado en la búsqueda de mínimos. Se basa en la dirección negativa del gradiente, es decir en la mayor dirección de decrecimiento. La Figura 2.16 ofrece una interpretación gráfica del procedimiento (Bayen, 2013). El algoritmo se describe como:

Paso 1: Iniciar en un punto aleatorio $x^{[k]}$

Paso 2: Determinar la dirección descendiente

$$\Delta = \nabla f(x^{[k]}) = \left(\frac{\delta f}{\delta x}, \frac{\delta f}{\delta \beta_j}, \dots \right) \quad (2.33)$$

Paso 3: Elegir el tamaño del paso $\alpha[k]$

Paso 4: Actualización de valores. Ecuación (2.33)

$$\beta^{[k+1]} = \beta^{[k]} - \alpha^{[k]} \nabla f(x^{[k]}) \quad (2.34)$$

Paso 5: Repetir paso 2 a 4 hasta que se cumpla el criterio de parada. Éste criterio se podría definir como:

$$\|\nabla f\| \leq \varepsilon \quad (2.35)$$

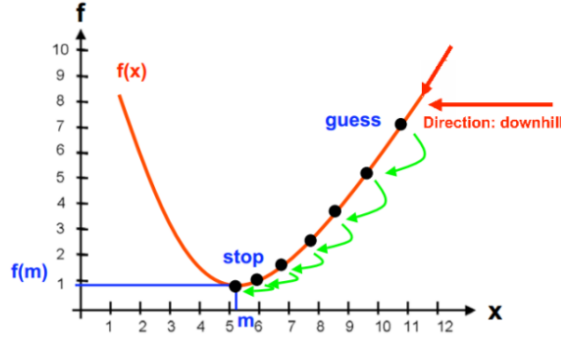


Figura 2.16 Método de Gradiente Descendente

○ Levenberg-Marquardt

Este algoritmo corresponde a una modificación del método de Gauss Newton. Se adiciona un parámetro de atenuación que permite controlar el paso para la convergencia del algoritmo. Se soluciona la ecuación (2.36) para actualizar los valores de los parámetros x en (2.37) (Cisa, 2002):

$$(J^T J + \mu I) \Delta = -g : g = J^T f ; \mu \geq 0 \quad (2.36)$$

$$\beta^{[k+1]} = \beta^{[k]} + \Delta \quad (2.37)$$

Donde $J = J(x)$ y $f = f(x)$. El parámetro de amortiguamiento μ influencia tanto la dirección como el tamaño del paso y tiene los siguientes efectos:

- Para todo $\mu > 0$ el coeficiente de la matriz es positivo, asegurando que Δ se desplaza en una dirección descendente.
- Para valores grandes de μ

$$\Delta \approx \frac{-1}{\mu} g = -\frac{1}{\mu} F'(x) \quad (2.38)$$

Lo cual es de gran ventaja si la iteración actual se encuentra lejos de la solución.

- Si μ es muy pequeño, la solución para Levenberg-Marquardt se aproxima a la solución directa con Gauss Newton. Implicando que conforme el algoritmo se acerca a la solución, los saltos serán más pequeños. Para $F(x) \approx 0$ se puede obtener una convergencia final cuadrática.

2.3.4 CALIBRACIÓN ESTÉREO

Existen varias formas de obtener información tridimensional a partir de una o varias imágenes (información bidimensional). En este trabajo se describen dos situaciones que ocurren durante el proceso de calibración. La primera de ellas ya ha sido estudiada y consiste en determinar la pose de una cámara, con parámetros intrínsecos conocidos, respecto a un objeto del cual se conoce su geometría. La segunda situación consiste en

determinar la posición relativa de una cámara respecto a otra, teniendo en cuenta que se conocen los parámetros intrínsecos de ambas, y que es posible encontrar puntos correspondientes en las imágenes capturadas por dichas cámaras. La geometría epipolar explica muy bien la forma en la que es posible extraer dicha información (Siebert & Cyganek, 2011; Szeliski, 2010).

2.3.4.1 Geometría Epipolar

El problema que le atañe a la geometría epipolar consiste en encontrar la correspondencia de un punto en una imagen, dado que se conoce dicho punto en otra imagen (Siebert & Cyganek, 2011). Es decir, teniendo dos capturas de una escena, tomadas desde diferentes puntos de vista, cuál es la proyección de un mismo punto 3D en ambas imágenes.

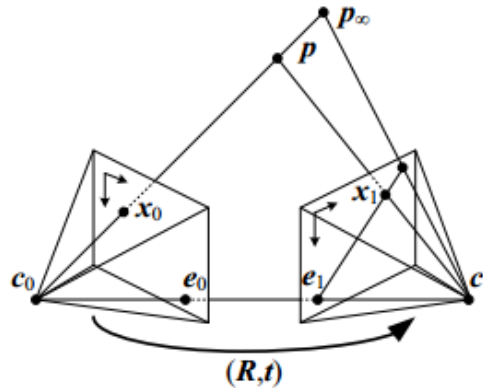


Figura 2.17 Línea Epipolar correspondiente a un Punto 3D (Szeliski, 2010)

A partir de la Figura 2.17 se puede observar un mismo punto P en el mundo a través de dos cámaras, dicho punto se proyecta al punto x_0 en la imagen capturada por la cámara c_0 . Sin embargo es imposible saber si x_0 es la proyección de P o de cualquier otro punto a lo largo del rayo que une a P y al centro focal c_0 . Por lo tanto, todos los posibles puntos que pudieron proyectarse en x_0 forman una línea que se proyecta en la imagen capturada por la cámara c_1 . Esta línea es llamada línea epipolar.

A partir de esta escena se puede obtener un plano epipolar determinado por los centros focales de ambas cámaras y el punto P . La intersección de dicho plano con los planos de ambas imágenes determina las líneas epipolares como se ve en la Figura 2.18 .

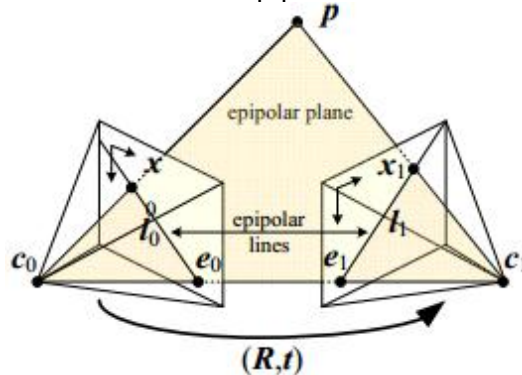


Figura 2.18 Plano Epipolar (Szeliski, 2010)

La restricción epipolar consiste en definir este plano en términos de los segmentos de línea que unen los tres puntos, como se ve en la ecuación (2.39).

$$\overrightarrow{c_0 x_0} \cdot (\overrightarrow{c_0 c_1} \times \overrightarrow{c_1 x_1}) = 0 \quad (2.39)$$

Donde, teniendo en cuenta la Figura 2.18, c_0 es el punto focal de la cámara izquierda; c_1 el punto focal de la cámara derecha; x_0 la proyección del punto P en la imagen izquierda; y x_1 la proyección del punto P en la imagen derecha. Otra forma de escribir los vectores $\overrightarrow{c_0x_0}$ y $\overrightarrow{c_1x_1}$ consiste en definirlos como vectores direccionales, asumiendo que la longitud focal es 1, es decir que se tienen coordenadas de imagen normalizadas, como en la ecuación (2.40):

$$\overrightarrow{c_0x_0} \rightarrow x_0 = (x_0, y_0, 1)^T \quad (2.40)$$

Este vector está definido para el marco coordenado de la cámara 0, y de forma análoga se puede definir el vector direccional x_1 . Si además se tiene en cuenta que el segmento de recta que une los centros focales de las cámaras corresponde a la traslación entre ellas, la restricción epipolar se puede reescribir como en la ecuación (2.41).

$$x_0 \cdot (t \times Rx_1) = 0 \quad (2.41)$$

Donde R es la rotación de la cámara 1 a la cámara 0, que es necesaria para que todos los vectores estén referenciados al marco coordenado de la cámara 1. Y como se puede ver en la Figura 2.18, R y t definen la posición de una cámara respecto a la otra.

La ecuación (2.41) relaciona la imagen de un punto en una cámara, con su imagen en la otra cámara. Al escribir esta ecuación en la forma de una multiplicación de matrices, se obtiene la Matriz Esencial. Para lograr esta representación, se intercambia el producto cruz $t \times Rx_1$ por el producto matricial $[t]_x Rx_1$. Donde $[t]_x$ es la matriz antisimétrica correspondiente a t . A continuación se presentan las ecuaciones (2.42) y (2.43) para la Matriz Esencial y la restricción epipolar en función de esta $[t]_x$:

$$E = [t]_x R \quad (2.42)$$

$$x_0^T E x_1 = 0 \quad (2.43)$$

2.3.4.2 Algoritmo de 8-puntos (8-point algorithm)

Es posible extraer la matriz esencial que describe la posición relativa de un arreglo de cámaras de las cuales se conocen sus parámetros intrínsecos, a partir del reconocimiento de los puntos correspondientes en diferentes imágenes. El proceso que se lleva a cabo para lograrlo es comúnmente llamado el Algoritmo de 8-puntos (Zisserman & Hartley, 2004) y se explica a continuación.

Dado que se tienen dos capturas de una misma escena, desde diferentes puntos de vista; y teniendo en cuenta la ecuación (2.43), es posible generar un sistema de ecuaciones linealmente independientes. Si se tiene en cuenta que E es una matriz 3x3, se desea conocer el valor de 9 incógnitas, sin embargo si se examina la ecuación, el producto sigue siendo igual a cero para cualquier múltiplo de la matriz E . Por lo tanto, se tienen en realidad sólo 8 incógnitas, y consecuentemente se necesitan al menos 8 ecuaciones, que se delinearán de 8 correspondencias entre puntos de dos imágenes.

El algoritmo se puede resumir en tres pasos que se presentan a continuación, sin embargo una explicación más profunda, que se escapa del alcance de este trabajo, puede ser encontrada en la fuente ya citada.

- i. **Normalización:** se transforman las coordenadas de las imágenes de forma que $\hat{x}_1 = Tx_1$ y $\hat{x}_0 = T'x_0'$. Donde T y T' son transformaciones que consisten en una traslación y un escalamiento.
- ii. Se encuentra la matriz Esencial $\hat{E}'$ correspondiente a las correspondencias de los puntos en ambas imágenes:
 - a. **Solución Lineal:** Se determina $\hat{E}$ a partir del vector singular que corresponde al valor singular más pequeño de $\hat{A}$. Donde $\hat{A}$ está compuesto por las correspondencias

de los puntos $\hat{x}_1$ y $\hat{x}_0$.

- b. **Cumplimiento de la Restricción:** Se reemplaza $\hat{E}$ por $\hat{E}'$ tal que $\det \hat{E}' = 0$, usando SVD.
- iii. **Denormalización:** Se establece $E = T'^T \hat{E}' T$. La matriz E es la matriz esencial correspondiente a los datos originales x_1 y x_0 .

El algoritmo de 8 puntos, permite entonces, encontrar de manera eficaz la Matriz Esencial a partir de la correspondencia entre los puntos de dos imágenes. Otra forma de expresar la Matriz Esencial permite aplicarla a coordenadas de imagen no normalizadas, es decir, que no se necesitan conocer los parámetros intrínsecos. Esta forma es la Matriz Fundamental, que se puede hallar a partir de dos puntos de vista de una imagen, de la misma forma que la Matriz Esencial, y se define en la ecuación (2.44):

$$F = K^{-T} E K^{-1} \quad (2.44)$$

Las Matrices Fundamental y Esencial toman importancia en el presente caso de estudio, debido a que se busca encontrar una transformación entre dos imágenes que capturan un mismo objeto. Otras formas de encontrar dicha transformación se explican a continuación.

2.3.4.3 Transformaciones 2D a 2D

Las transformaciones proyectivas del plano modelan la distorsión geométrica a la que se ve sometida una figura plana, al ser capturada como imagen por una cámara perspectiva (Zisserman & Hartley, 2004). En el presente trabajo es necesario entender las diferentes transformaciones a las que se ve sometido un plano, ya que una parte esencial del proceso de calibración es la representación matemática que se le da a una figura geométrica con las características de un plano, es decir un patrón, capturado en múltiples posiciones por una cámara fotográfica. A continuación se explican las transformaciones más importantes que se exponen en la Tabla 2.4.

La transformación rígida o euclidiana es aquella en la que se conservan el tamaño y la forma de los objetos. Se define básicamente por un vector de traslación y un ángulo de rotación, es decir que tiene 3 grados de libertad. Al representar los puntos bidimensionales en coordenadas homogéneas la ecuación de transformación se simplifica a una multiplicación matricial, donde R es una matriz de rotación 2x2 y t un vector de traslación de R^2 . Ver (2.45).

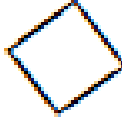
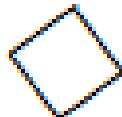
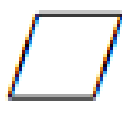
$$\begin{pmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R & t \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} \leftrightarrow \tilde{x}' = H \tilde{x} \quad (2.45)$$

Si se multiplica H por una constante se obtiene lo que se conoce como una Transformación de Similitud, la cual preserva ángulos pero no distancias. Al agregar la constante se le agrega un grado de libertad a la transformación rígida.

La transformación afín es un tipo de transformación más general que aumenta grados de libertad en la matriz H . En este caso, la matriz de Rotación puede estar construida por cuatro valores arbitrarios. Como resultado, la transformación afín no conserva los ángulos de la imagen original, pero sí las líneas paralelas.

La transformación Proyectiva u Homografía, permite cambiar de manera arbitraria todos los valores de la matriz H . Esta es el tipo más general de transformación 2D y permite encontrar la correspondencia entre los puntos de la proyección de un plano y los de la proyección de otro plano. En esta transformación sólo se conservan las líneas rectas de la imagen original. A continuación se muestra una tabla que resume muy bien las transformaciones que se han mencionado y sus propiedades.

Tabla 2.4 Transformaciones 2D (Szeliski, 2010). Las transformaciones preservan la característica indicada en su celda y las características de las celdas inferiores. GdL: Grados de Libertad

Transformación	Matriz	# GdL	Preserva	Imagen
Traslación	$[I t]_{2 \times 3}$	2	Orientación	
Rígida (Euclidiana)	$[R t]_{2 \times 3}$	3	Longitudes	
Similaridad	$[sR t]_{2 \times 3}$	4	Ángulos	
Afín	$[A]_{2 \times 3}$	6	Paralelismo	
Proyectiva	$[\tilde{H}]_{3 \times 3}$	8	Líneas Rectas	

2.3.4.4 Homografías

Como se mencionó previamente una Homografía es la transformación que más grados de libertad permite variar en 2D. Por medio de ella, un punto en una imagen determina un punto en otra, a través de la intersección de un rayo que une los centros focales de las cámaras que las tomaron, con el punto en el mundo. A continuación se explicará la derivación de la homografía a partir de un plano, y algunos conceptos útiles para el caso de estudio.

2.3.4.4.1 Homografía a partir de un plano

Las imágenes de los puntos de un plano se relacionan con sus correspondientes imágenes de puntos de un plano desde otra vista, a través de la homografía inducida a partir de un plano (Zisserman & Hartley, 2004). Se dice que el plano induce una homografía entre las dos vistas. En este trabajo, se tiene la situación en la que dos cámaras capturan la misma escena desde dos puntos de vista distintos. La transformación que induce esta escena (plano), permitirá mapear puntos desde una vista a la otra, tal como si fueran imágenes de los puntos en el plano.

Se supone una situación como la de la Figura 2.19, donde se tienen dos vistas en los planos de imagen de las cámaras C y C' , generados por el plano π .

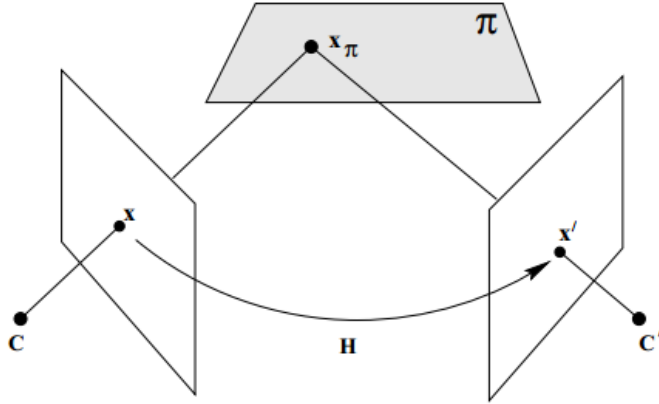


Figura 2.19 Homografía inducida por un plano (Zisserman & Hartley, 2004)

Si se asume el origen de coordenadas globales en la cámara C , las matrices de proyección de las cámaras serán: $P_E = K[I|0]$ y $P_{E'} = K'[R|t]$. Donde R y t determinan a la posición de C' respecto a C . Para calcular H se debe reproyectar el punto x de la primera cámara y determinar el punto de intersección x_π de este rayo con el plano π , definido por $\pi = (n^T, d)^T$. El punto 3D x_π se proyecta posteriormente en la segunda vista, y la matriz que relaciona los dos puntos x y x' , será la homografía inducida por el plano π . Como se ve en la ecuación (2.46):

$$H = K'(R - \frac{tn^T}{d})K^{-1} \quad (2.46)$$

Donde n es el vector normal que define el plano π , y d la distancia desde el plano de la hasta la primera cámara, es decir la profundidad.

2.3.4.4.2 Homografía a partir de 4 correspondencias

Después de que se ha definido la homografía inducida por un plano, es importante revisar cuáles métodos permiten hallar dicha transformación, a partir de la información disponible. Esto es, teniendo en cuenta dos imágenes que capturan la misma escena, el número mínimo de correspondencias necesarias para hallar una transformación proyectiva entre los dos puntos de vista es de cuatro.

Al hallar una homografía a partir de cuatro correspondencias entre dos vistas de una escena, se puede afirmar que esta transformación es compatible con la restricción epipolar (Zisserman & Hartley, 2004). Esto se explica fácilmente, ya que al definir una Homografía a partir de la correspondencia de cuatro puntos (8 incógnitas o grados de libertad para H) que se proyectan desde un plano a dos vistas, estas correspondencias también obedecen la restricción epipolar (ecuación (2.43)). Es claro también, que si los puntos que se escogen para hallar la homografía, son totalmente arbitrarios en ambas imágenes, se obtendrá una homografía, sin embargo esta no cumplirá con la restricción epipolar.

La condición para que se cumpla esta compatibilidad es la siguiente: Una homografía H es compatible con una matriz fundamental F , si y sólo si la matriz $H^T F$ es antisimétrica:

$$H^T F + F^T H = 0 \quad (2.47)$$

2.3.4.4.3 Homografía Infinita

Otra forma de hallar una transformación entre dos vistas de una escena que puede ser relevante para este caso de estudio, es la Homografía Infinita. Este método cobra importancia porque simplifica la expresión de la homografía haciendo despreciable la

variable de profundidad que separa las cámaras de la escena. Al no necesitar conocer a qué distancia se encuentra determinado objeto del arreglo de cámaras, el proceso de hallar la transformación proyectiva entre dos puntos de vista se agiliza. Esta se define como la homografía inducida por el plano en el infinito, y simplifica la expresión para la homografía señalada en la ecuación (2.46). Como se había mencionado anteriormente para esa ecuación, d es la profundidad, o en otras palabras, la distancia ortogonal al plano desde la primera cámara. Si d tiende a infinito, entonces la expresión de homografía se simplifica a la ecuación (2.48)

$$H_{\infty} = K'RK^{-1} \quad (2.48)$$

Esta expresión relaciona puntos de las imágenes a cualquier profundidad, si se tiene una sola cámara rotando sobre su eje. Y de forma análoga a la homografía simple, se puede hallar a partir de la correspondencia de al menos cuatro puntos de fuga correspondientes, o utilizando la matriz fundamental tres puntos de fuga, etc. Esta técnica se puede utilizar en ocasiones donde la distancia de separación entre las cámaras es muy pequeña comparada con la distancia hasta el plano de interés.



3 HERRAMIENTA PARA INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA USANDO LA COMBINACIÓN DE IMÁGENES TÉRMICAS Y DE ESPECTRO VISIBLE

Contenido

3.1	Introducción	52
3.2	Descripción de Equipos y Software	53
3.2.1	Cámaras	53
3.2.2	Herramientas Software	55
3.2.3	Patrón de Calibración	56
3.3	Descripción del Algoritmo de Calibración para fusión de imágenes	57
3.3.1	Condiciones Iniciales	57
3.3.2	Calibración Monocular	61
3.3.3	Calibración Extrínseca entre cámaras y Fusión de imágenes	64
3.4	Descripción de la Aplicación	70
3.4.1	Especificación de Requerimientos	71
3.4.2	Diagramas de Clases	74

3.1 INTRODUCCIÓN

Este capítulo se estructura en tres partes en las que se describe la Herramienta para Inspección Termográfica que utiliza la combinación de imágenes térmicas y de espectro visible.

Inicialmente se hace una descripción de los equipos o *hardware* que compone la Herramienta, así como también del *software* que se utilizó en las diferentes etapas del proyecto y en la realización de la aplicación de calibración. Entre otros elementos se describen las cámaras y el patrón de calibración, el cual es esencial para obtener resultados confiables.

Posteriormente se describe de forma extensiva la serie de pasos, o algoritmos, que se plantearon para poder obtener una conversión satisfactoria entre las imágenes de diferente espectro. En esta segunda sección se inicia revisando las condiciones mínimas que debe cumplir el sistema para realizar una calibración precisa. Más adelante se describen los procesos de calibración monocular y extrínseca, la cual se definió específicamente en el capítulo anterior. Por último se describe el proceso alterno de homografía manual, el cual depende de la intervención directa del usuario.

Para finalizar, la última sección explica el funcionamiento de la aplicación (*InVi Fusion*) desarrollada. Aquí se incluye un listado de requerimientos mínimos que debe cumplir el programa. Además se describe la estructura de clases de la aplicación, siguiendo en ambas partes la metodología *RUP* de diseño de software.

3.2 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS Y SOFTWARE

La Herramienta para Inspección Termográfica está compuesta por un sistema de adquisición de imágenes de espectro visible e infrarrojo, cuya configuración debe ser estable y no presentar cambios durante la toma de datos. Este bloque lo representan las cámaras y el soporte en el que se encuentran ubicadas, además del Patrón de Calibración que es esencial para la ejecución del Algoritmo de Calibración (ver Figura 3.1). Adicionalmente, es necesario capturar las señales provenientes de las cámaras y digitalizarlas en caso de que su salida sea análoga. Este caso es cubierto por un capturador de vídeo análogo que transmite la señal por un puerto USB. En las subsecciones siguientes se hará una descripción de cada uno de los componentes de dicha Herramienta, la cual incluye la descripción del hardware, software y patrón de calibración.



Figura 3.1 Arreglo de cámaras y Patrón de Calibración

3.2.1 CÁMARAS

Para la captura de imágenes térmicas se utilizó la cámara FLIR E320, cuyas especificaciones se pueden ver en la Tabla 3.1

En la Figura 3.2 se pueden observar las salidas y conexión de cable de alimentación para la cámara FLIR E320. La cámara dispone de una salida de datos serial (USB) por un puerto PS/2 para descargar las imágenes con información radiométrica almacenadas en la memoria *flash* interna del dispositivo. En caso de no necesitar la información cuantitativa del espectro IR, también se puede capturar la imagen que presenta el *display LCD* de la cámara, por una salida de vídeo compuesto (CVBS) con conector RCA. En las configuraciones de la cámara se puede elegir entre los estándares de codificación NTSC y PAL. Para el desarrollo de este proyecto no se usaron los datos radiométricos

de las imágenes, para no restringir el uso del *software* a una cámara específica. Por lo tanto para capturar las imágenes térmicas se utilizó la salida de vídeo compuesto.

Tabla 3.1 Especificaciones de la Cámara FLIR E320

Característica	FLIR E320
Tipo de detector	Arreglo Plano Focal (FPA). Microbolómetro sin enfriamiento. 320 x 240
Campo de Visión – FOV (ancho x alto)°	25° x 19° (29.4° x 22.3°)
IFOV	0.08° (0.09°)
Longitud Focal	27.4 [mm]
Rango Espectral	7.5 – 13 [μ m]
Exactitud de temperatura	± 2 [°C] para ± 2 % de lectura
Rango de temperatura para operación	-15–+45 [°C]

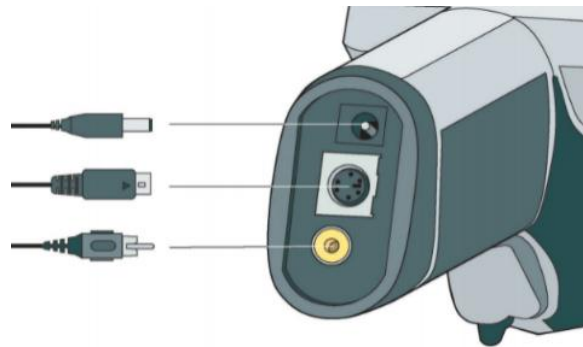


Figura 3.2 Salidas y alimentación FLIR E320 (FLIR Systems, 2006)

Para terminar de describir la cámara FLIR E320, se debe mencionar que es posible efectuar un enfoque manual por medio del anillo de enfoque que rodea el lente. Esta propiedad es importante, porque si bien la longitud focal es una característica de fabricación, esta puede variar con la distancia a la que se capture y enfoque un objetivo. Por lo tanto, una vez se calibre el sistema, la posición de este anillo, y en general, la de las cámaras, no deben cambiar para obtener resultados precisos de fusión.

Por otro lado, para la captura de imágenes de Espectro Visible se utilizó la cámara de vigilancia Sharp YH-7B50, cuyas especificaciones se ven en la Tabla 3.2. Vale la pena aclarar que una vez desarrollada la aplicación, el uso de una cámara u otra es irrelevante, pues permitir este tipo de versatilidad es una de las razones por la que se desarrolló la herramienta. En concordancia con lo anterior, también se utilizaron la cámara digital *Kodak easyshare M532* y la cámara web *Genius iSlim 1300 V2*, cuyas especificaciones se muestran más adelante.

Sobre la cámara Sharp YH-7B50 vale la pena agregar que tiene un control manual para variar el contraste, y que es una cámara con un alto nivel de distorsión radial que no ofrece altas prestaciones de calidad de imagen. Sin embargo, estas características la hacen ideal para probar la robustez del sistema ante imágenes con mayor ruido que las que produciría una cámara digital actual.

Tabla 3.2 Especificaciones de la Cámara Sharp YH-7B50

Característica	SHARP YH-7B50
Número de Píxeles	640 x 480
Campo de Visión (ancho x alto)°	50 x 37°
Longitud Focal	Apróx. 5.6 mm (fija)
Salida	CVBS o Video Compuesto (Conector RCA)
Alimentación	6 VDC

En la Tabla 3.3 se exponen las características más importantes de las cámaras *Kodak M532* y *Genius iSlim* que también fueron utilizadas para la validación de la Herramienta de Calibración.

Tabla 3.3 Características de las Cámaras *Kodak* y *Genius*

Característica	<i>Kodak easyshare M532</i>	<i>WebCam Genius iSlim 1300 V2</i>
Número de Píxeles (máx)	14 MP	8MP
Campo de Visión (ancho x alto)	74.5° x 57° (apróx.)	40°x31° (apróx.)
Longitud Focal	28 – 110 mm	--
Salida	USB 2.0	USB 2.0

Es de resaltar que las tres cámaras capturan imágenes de diferente cantidad de píxeles y FOV, lo que permite obtener capturas más heterogéneas, y probar las limitaciones de la aplicación. Respecto a la transmisión de datos, se debe mencionar que la *Kodak* es una cámara digital sin salida de vídeo, por lo que las imágenes se almacenan en la memoria del dispositivo y son cargadas posteriormente, a la aplicación. En el caso de la *Genius*, la salida de vídeo se transmite directamente por *USB*, por lo que no es necesario utilizar un capturador de vídeo análogo.

3.2.2 HERRAMIENTAS SOFTWARE

La Tabla 3.4 presenta una breve descripción el lenguaje de programación y la librería empleados para el desarrollo del proyecto.

Tabla 3.4 Librerías y herramienta software usadas

Software	Descripción
 Java	Java es un lenguaje de programación de propósito general, concurrente, orientado a objetos y basado en clases. Su intención es permitir a los desarrolladores, compilar su código una vez y ejecutarlo en cualquier dispositivo (conocido en inglés como WORA, o " <i>Write Once, Run Anywhere</i> "), para ello se basa en la máquina virtual de Java (JVM). Además, según LangPop (2013) es uno de los lenguajes de programación más usados a nivel mundial
 OpenCV (Open Computer Vision)	OpenCV es una librería de visión artificial de uso público bajo la licencia BSD, está escrita en lenguaje C/C++ optimizado, permitiendo aprovechar al máximo el procesamiento de multi-núcleo y diseñado con enfoques de eficiencia computacional y de aplicaciones en tiempo real. Tiene interfaces con C++, C, Python y Java con soporte para Windows, Linux, Mac OS, iOS y Android. (OpenCV, 2014a) Para el desarrollo del proyecto se usó la versión 2.4.8 de openCV y el API para Java desarrollado por Christiansen et al. (2013). En caso de Windows la librería dinámica ya viene compilada, para Ubuntu se debe compilar a partir de los archivos fuente

	Entorno de desarrollo integrado (IDE) de código abierto multiplataforma. Versión usada: Eclipse Kepler
	Herramienta para solución de problemas matemáticos, principalmente problemas matriciales. Usada en el presente proyecto solo para pruebas. Versión usada: Matlab 2013b
	Sistema operativo disponible para múltiples arquitecturas de computadores. Versión usada para evaluar la aplicación: Windows 7
	Sistema operativo basado en Linux. Se distribuye como software libre. Versión usada para evaluar la aplicación: Ubuntu 12.04

3.2.3 PATRÓN DE CALIBRACIÓN

El algoritmo utilizado en este trabajo para calibrar cámaras requiere de realizar un mínimo número de capturas a un patrón de calibración. Dicho patrón debe permitir identificar una cantidad de puntos en una imagen, por esta razón se usa comúnmente un patrón de tablero de ajedrez que, por el contraste que producen los cuadros blancos y negros, permite identificar claramente las esquinas.



Figura 3.3 Patrón de Calibración

En el montaje estéreo a realizar, se necesita que las dos cámaras capturen dichos contrastes. Por tal razón, se hace necesario construir un patrón especial, que pueda ser observado en ambos espectros (Ver Figura 3.3). Otra característica con la que debe cumplir todo patrón de calibración es que debe ser construido sobre una superficie rígida, de manera que el software pueda aproximar la nube de puntos detectada a un plano, lo que no se podría lograr con una superficie curva, por ejemplo. Una última condición básica que permite realizar una calibración óptima tiene que ver con la captura de las imágenes. El patrón debe ocupar la mayor parte del campo de visión (FOV) de la cámara como sea posible. Esta condición se puede cumplir adecuadamente para la cámara IR, pero no para la EV. Esto se debe a que la cámara IR tiene un FOV muy reducido en comparación con la cámara EV, por lo tanto el tamaño del patrón determinará el rango de distancia para la que la calibración y el procesamiento de imágenes basado en los resultados de esta, son válidos. A continuación se describe la construcción del patrón de calibración utilizado en la realización de este trabajo.

Como se mencionó, es importante que las dos cámaras puedan "observar" el patrón de calibración. Para lograrlo se construyó un patrón basándose en los resultados obtenidos por Ursine et al. (2012) en su trabajo presentado en la 11va Conferencia Internacional en Termografía Cuantitativa Infrarroja. Este patrón consiste en una base de madera

pintada de negro sobre la que se han pegado recuadros de lámina de cobre. Debido a la diferencia de emisividad entre los dos materiales, la cámara IR será capaz de capturar el contraste entre los cuadros de madera y cobre. En la versión de este trabajo se utilizaron además, recuadros de cartulina negra para cubrir los bordes de las láminas de cobre y obtener cuadrados de un tamaño uniforme. La cámara EV captura, naturalmente, la diferencia entre el color cobre y el color negro de los materiales.

Para la fabricación del patrón se hicieron pruebas con láminas de cobre de tres espesores diferentes: 0.1 mm, 0.3 mm y 3 mm; determinándose que el segundo espesor era el más apropiado, debido a que presentaba el mayor contraste con la cartulina en las imágenes térmicas. Se utilizó, entonces, una lámina de cobre de 30 cm por 1 m, de 0.3 mm de espesor. Por practicidad se decidió recortar la lámina en recuadros de 10x10 cm ya que la realización de un corte de alta precisión no fue posible. Para lograr el tamaño deseado de 8x8 cm se adhirieron recuadros de cartulina negra sobre el cobre. Puesto que la emisividad del papel y la madera no son tan diferentes, esta corrección funciona muy bien. En la Tabla 3.5 se resumen las características del patrón.

Tabla 3.5 Características del patrón de Calibración.

	Dimensiones [cmxcm]	Espesor [mm]	Material
Patrón	94.5 x 76.5	7	Madera contrachapada (Tríplex)
Recuadros de Cobre	8 x 8	0.3	Lámina de Cobre
Recuadros Negros	8 x 8	< 0.1	Papel

3.3 DESCRIPCIÓN DEL ALGORITMO DE CALIBRACIÓN PARA FUSIÓN DE IMÁGENES

En la Figura 3.4 se presenta la forma general del algoritmo de calibración para la aplicación. Cómo se verá a continuación, describe una serie de pasos que se siguen de forma estándar para obtener como resultado último, la fusión entre dos imágenes de diferente espectro. Para obtener buenos resultados se deben tener en cuenta ciertas condiciones iniciales que se describirán en la subsección siguiente. Adicionalmente, se describirán los procesos de calibración intrínseca y cálculo de homografía, para la que se debe tener en cuenta, influirán la distancia al objetivo, y la posición relativa de las cámaras. Aunque no sea necesario calcular la segunda para obtener la transformación proyectiva u homografía.

3.3.1 CONDICIONES INICIALES

El buen resultado de la calibración depende de la precisión con la que las esquinas del patrón sean calculadas a partir de las imágenes, por tanto entre mejor sea la calidad de las imágenes capturadas, mejor será el posterior resultado de matrices y parámetros de calibración de las cámaras, siendo muy importante el ambiente en que se capturan las imágenes.

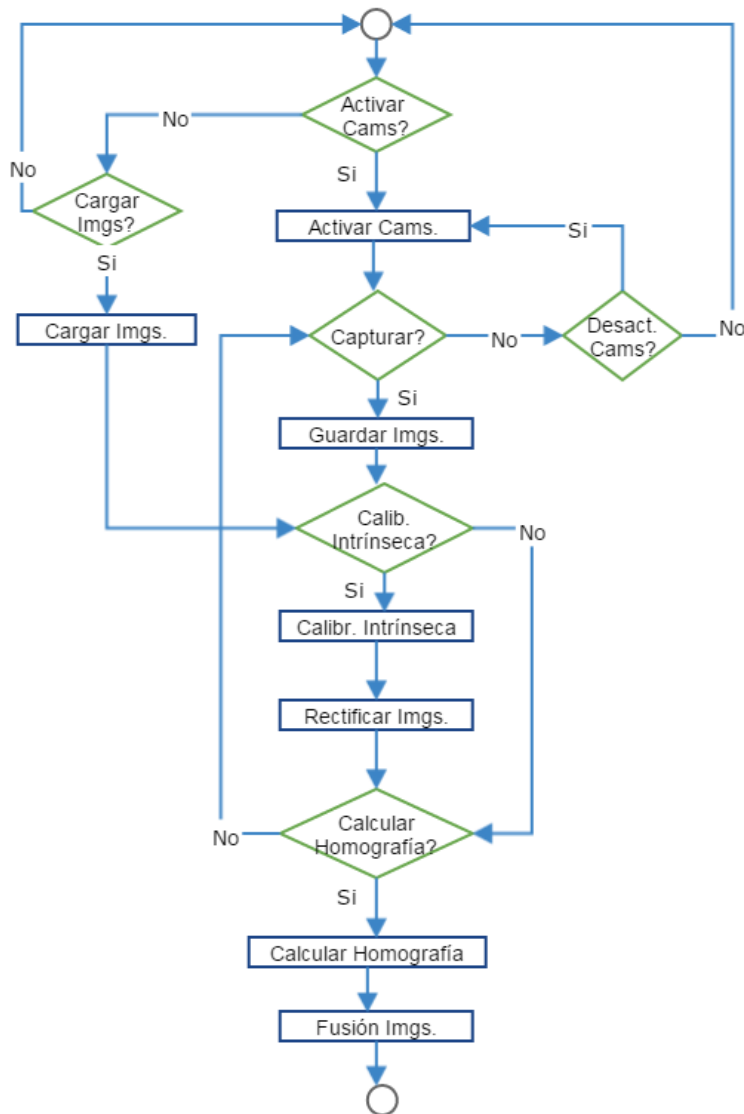


Figura 3.4 Diagrama de Flujo del Algoritmo de Calibración General

Las imágenes de la Figura 3.5a fueron tomadas en un ambiente al aire libre con luz directa, las imágenes de la Figura 3.5b se capturaron en un ambiente bajo sombra pero iluminado con luz natural, la Figura 3.5c corresponde a un ambiente en interior con luz artificial, la Figura 3.5d está en un ambiente interior con luz natural. Visualmente se aprecia que la imagen de mejor calidad en el espectro infrarrojo es con incidencia directa de luz de sol, sin embargo en el espectro visible, los diferentes ángulos de reflexión de los rayos de luz generan una distorsión sobre los bordes de los objetos. Aplicando el algoritmo para detección de esquinas, se obtuvieron los resultados de la Tabla 3.6, concluyendo que el cuarto ambiente es el más apropiado con un éxito de 75% en el espectro visible y 100% en el infrarrojo es decir que se aconseja que la captura de imágenes para el proceso de calibración se realice en un lugar en interior iluminado con luz natural. Se debe notar que en el espectro infrarrojo el porcentaje de éxito es alto indiferente del ambiente de captura demostrando que la elección de materiales para la fabricación del patrón ha sido acertada y resaltando la aplicabilidad de las cámaras termográficas en diferentes ambientes.

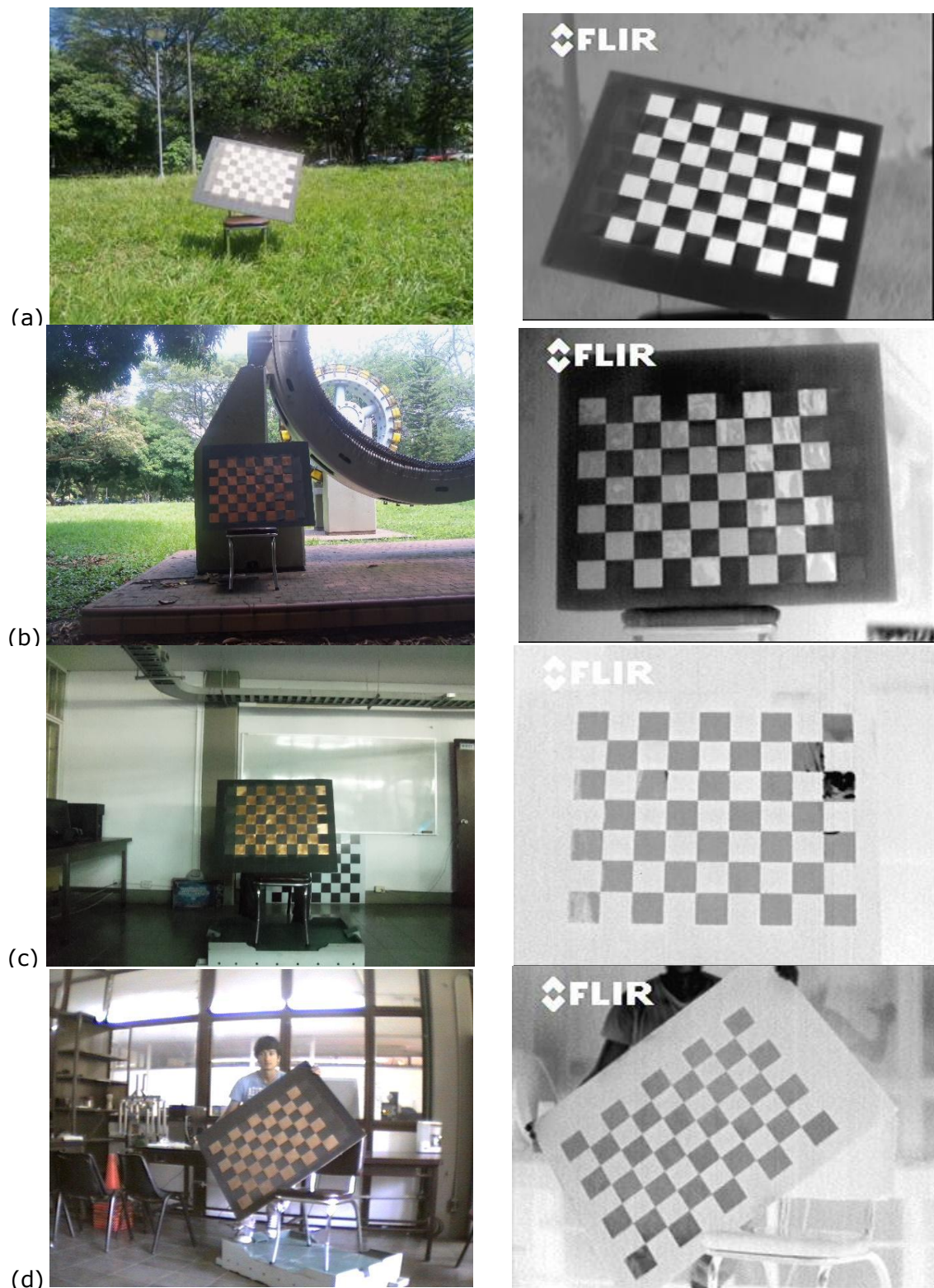


Figura 3.5 Par imágenes en ambientes diferentes: (a) Luz de sol directa. (b) Sombra con luz natural. (c) En interior con luz artificial. (d) En interior con luz natural

Tabla 3.6 Comparación de ambientes para captura de imágenes

Ambiente	Cantidad par imágenes	Espectro	Detección de esquinas	
			Éxito	%Éxito
Sol directo	12	Visible	0	0.0
		Infrarrojo	11	91.7
Sombra con luz natural	11	Visible	2	18.2
		Infrarrojo	10	90.9
Interior con luz artificial	13	Visible	3	23.1
		Infrarrojo	13	100.0
Interior con luz natural	12	Visible	9	75.0
		Infrarrojo	12	100.0

Por otra parte, la distancia entre las cámaras debe ser la menor posible para aumentar el tamaño de la región de superposición entre ambos campos de visión y disminuir la paralaje (*parallax*). La región de superposición de ambos campos de visión corresponde al área efectiva de análisis como lo muestra la Figura 3.6a. La Figura 3.6b presenta la comparación de campos de visión en las configuraciones de cámaras Flir E320 con Sharp y Flir E320 con Kodak. Es de notar que la cámara Kodak al tener un campo de visión mayor tiene una mayor área de superposición.

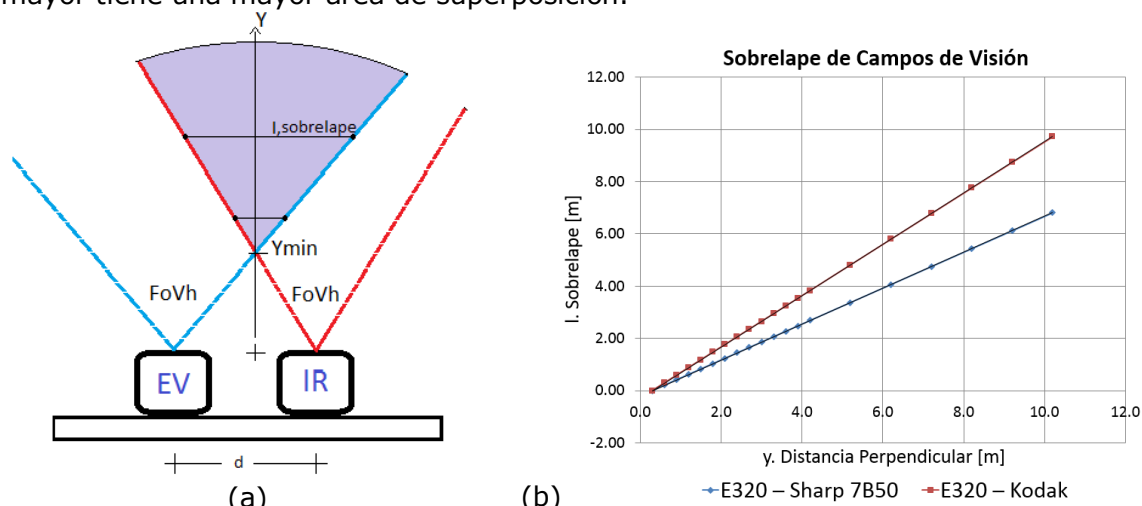


Figura 3.6 Superposición de campos de visión. (a) Configuración cámaras. (b) Comparación de superposición del campo de visión horizontal entre cámaras con distancia $d=22.8$ cm entre los ejes ópticos

Respecto a la elección de cámaras, el sistema no tiene restricción a un tipo específico de cámara termográfica o de espectro visible, pueden ser elegidas según conveniencia a la necesidad de la persona.

La captura de imágenes del espectro infrarrojo debe realizarse en escala de grises. Las cámaras termográficas normalmente tienen paletas de colores para blanco caliente y negro caliente. Esta restricción se da porque al diseñar el software para trabajar con información en escala de grises es fácilmente adaptable, en una versión futura, a trabajar directamente con la información de temperatura, ya que ésta como una imagen en escala de grises es una matriz de una sola capa. Además, los fabricantes de cámaras no permiten el acceso libre a la información de temperatura, a menos que sea a través de su propio software como el SDK ThermoVision de FLIR Systems (2014a) o el SDK de Raytek (2014) para la cámara Pi20, lográndose acceder, de manera libre, únicamente a las imágenes en color. Las imágenes en espectro visible pueden ser capturadas tanto a color como en escala de grises.

3.3.2 CALIBRACIÓN MONOCULAR

La calibración intrínseca junto con los parámetros de distorsión se hace necesaria para mejorar la visualización de las imágenes capturadas corrigiendo posibles distorsiones. La calibración extrínseca permite estimar la posición y orientación del marco coordenado del mundo al de la cámara, creando así una relación entre objetos en el mundo y su correspondiente representación en la imagen. Para calcular dichos parámetros se captura, con la cámara de interés, un conjunto de imágenes del patrón de calibración con geometría y dimensiones conocidas, se procede a detectar los puntos esquinas y tomando como referencia las posiciones ideales de las esquinas en el mundo se procede a calcular la matriz intrínseca con los respectivos parámetros de distorsión y la matriz extrínseca. El algoritmo es basado en los trabajos de Zhang (2000) y Bouquet (2013). La Figura 3.7 representa este esquema general.

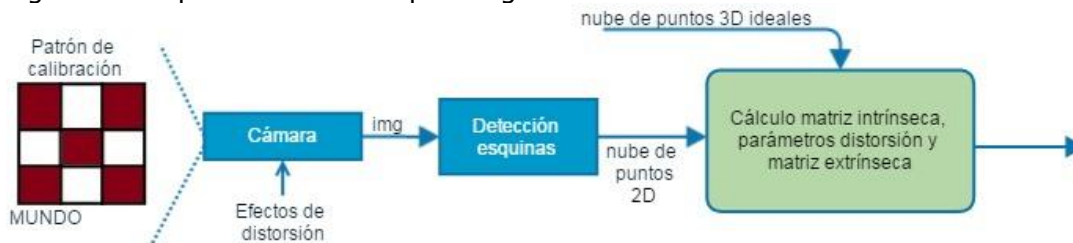


Figura 3.7 Esquema general de calibración monocular

A continuación se presenta el pseudocódigo del algoritmo de calibración monocular. El diagrama de flujos se presenta en la **Figura 3.8a**.

- i. **Capturar conjunto** de imágenes.
- ii. **Preprocesamiento** para mejorar la calidad de las imágenes.
 - a. Ecualizar el histograma para maximizar el contraste de la imagen sin perder su información estructural.
 - b. Umbralizar la imagen para convertirla en blanco y negro usando un umbral adaptativo basado en el brillo promedio de la imagen.
- iii. **Detectar esquinas** en las imágenes para crear nube de puntos 2D. La detección de esquinas se realiza con imágenes en escala de grises ya que disminuye la cantidad de información para analizar en comparación con una imagen a color.
- iv. Generar nube de puntos 3D con valores ideales de posición de las esquinas. Al ser conocida la geometría del patrón de calibración, se sabe la posición ideal de las esquinas. Para un patrón con una cuadrícula 2x2, por ejemplo, las coordenadas (X,Y,Z) esperadas adimensionales serían [(0,0,Z) (0,1,Z) (1,0,Z) (1,1,Z)]. Sin pérdida de generalidad que el patrón en el mundo está en Z=0 del sistema coordenado del mundo (Zhang, 2000).
- v. **Inicializar parámetros** intrínsecos y extrínsecos.
- vi. **Optimización de parámetros**. Iterar hasta conseguir un límite de error aceptable, alcanzar el límite de iteraciones o aumento en el error de la última iteración comparado a la previa.
 - a. Correr el algoritmo de Levenberg-Marquardt con el objetivo de minimizar el error de reproyección, es decir, la suma de las distancias al cuadrado entre las esquinas observadas en la imagen y los puntos proyectados de la nube de puntos ideales 3D usando los parámetros encontrados, (OpenCV, 2014b).

La detección de esquinas en precisión de píxel, a través de la función *findChessboardCorners* de OpenCV, requiere un espacio blanco alrededor del tablero para aumentar la robustez del método en diferentes ambientes, (OpenCV, 2014b), y dependiendo del modo de captura de la imagen, el borde del patrón puede ser de

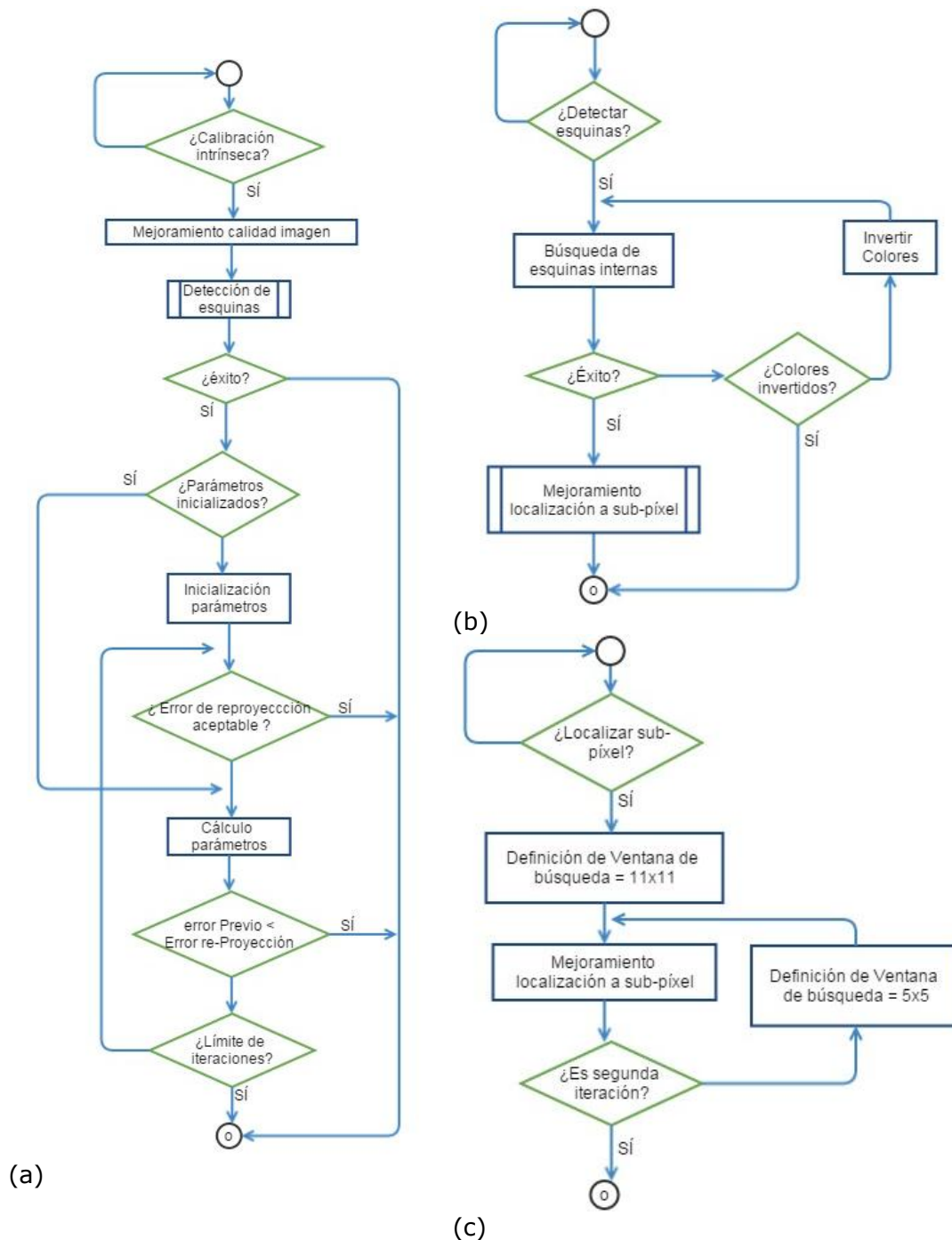


Figura 3.8 Diagramas de flujo: (a) Calibración monocular (b) Detección de esquinas (c) Mejoramiento de localización a nivel de subpíxel

color blanco o negro, por ello en caso de fallar la búsqueda de esquinas se invierten los colores de las imágenes y se reintentan encontrar las esquinas. La **Figura 3.8b** muestra el diagrama de flujo para la detección de esquinas.

Posterior a la detección de esquinas se busca mejorar la exactitud de las coordenadas en nivel de sub-píxel. La función *cornerSubPix* de OpenCV explicada en OpenCV (2014b) se basa en el concepto de punto silla, ver Figura 3.9, es decir que cada vector desde el

centro q al punto P ubicado dentro de la vecindad de q es ortogonal a la imagen del gradiente de P sujeto a la imagen y medidas de ruido. Dada la ecuación (3.1), se busca hallar el valor de q que minimiza el error ϵ_i .

$$\epsilon_i = DI_{P_i}^T * (q - P_i) \quad (3.1)$$

Donde DI_{P_i} es el gradiente de la imagen en el punto P_i . El algoritmo centra la ventana inicialmente en las coordenadas de la esquina previamente encontrada por *findChessboardCorners*, luego actualizará este valor en al nuevo q encontrado hasta que el centro permanece dentro de un umbral.

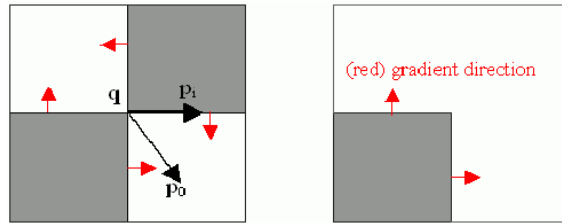


Figura 3.9 Fundamento gráfico de la función *cornerSubPix* de OpenCV

Para mejorar la robustez, esta última etapa se realiza en dos fases: en la primera con una ventana de búsqueda de 11x11 y en la segunda de 5x5. La **Figura 3.8c** presenta el respectivo diagrama de flujo. En la Tabla 3.7 se aprecia la evolución numérica en el proceso iterativo de búsqueda de las coordenadas de dos esquinas, donde el mejoramiento disminuye en cada iteración.

Tabla 3.7 Evolución de la exactitud de las coordenadas de dos esquinas en el proceso iterativo

Nro	Iteración	Coordenadas esquinas (x,y)	Mejora respecto iteración anterior ($\Delta x, \Delta y$)
1	Iteración base	(231.24428 , 211.70132)	- -
	Iteración con ventana 11x11	(230.01036 , 210.8154)	(1.23392 , 0.88592)
	Iteración con ventana 5x5	(230.03555 , 210.24513)	(0.02519 , 0.57027)
2	Iteración base	(267.63068 , 211.81409)	- -
	Iteración con ventana 11x11	(268.40356 , 210.42868)	(0.77288 , 1.38541)
	Iteración con ventana 5x5	(268.19388 , 210.91359)	(0.20968 , 0.48491)

Las imágenes en la Figura 3.10 representan los resultados del proceso de calibración monocular. La Figura 3.10a es una de las imágenes de entrada usadas para la calibración, en la Figura 3.10b se observa la detección de esquinas y la Figura 3.10c presenta la imagen de entrada rectificadas luego de aplicar los parámetros intrínsecos calculados. Visualmente se puede apreciar como los errores de distorsión en la imagen de entrada han sido corregidos luego del proceso de calibración.

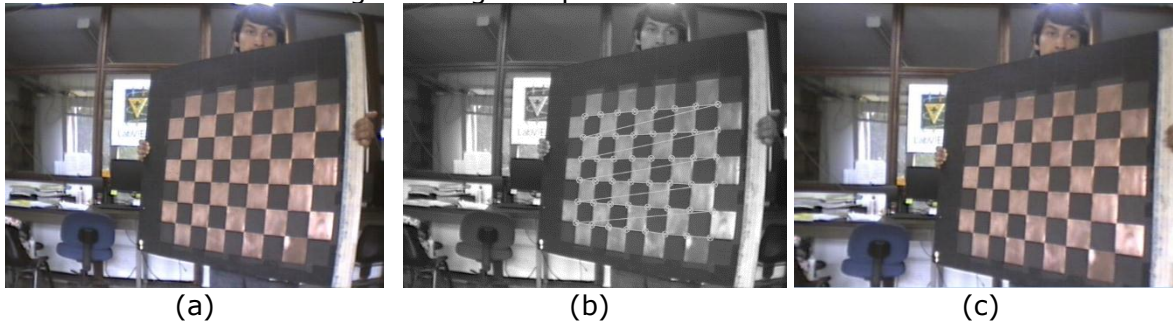


Figura 3.10 Resultado de proceso calibración monocular. (a) Imagen de entrada. (b) Detección de esquinas. (c) Imagen rectificadas

3.3.3 CALIBRACIÓN EXTRÍNSECA ENTRE CÁMARAS Y FUSIÓN DE IMÁGENES

Una de las conclusiones más importantes a las que se llegó a partir de la revisión del estado del arte, fue que realizar una calibración estéreo para hallar la rotación y traslación entre las cámaras no es suficiente para casos en los que se tienen configuraciones híbridas (Ursine et al., 2012), como el que se presenta con imágenes de diferente espectro. A partir de este resultado se hizo una evaluación de los métodos para obtener la transformación proyectiva u homografía, calculando el error en píxeles para cada caso, con el objetivo de elegir el método más preciso. Este error corresponde al promedio de todas las distancias euclidianas entre el punto proyectado y su valor esperado. Para realizar esta comparación se utilizó el *software* Matlab y el *toolbox* de calibración de Bouguet (2013), principalmente para detectar las esquinas del patrón de calibración. El procedimiento general que se llevó a cabo fue tomar un conjunto de 12 imágenes de calibración (capturas del patrón de calibración en diferentes posiciones) provenientes del arreglo de cámaras IR y EV, y extraer las esquinas para cada imagen. A partir de las esquinas se desarrollaron alguno de los procedimientos resumidos en la Tabla 3.8.

Tabla 3.8 Comparación de Métodos de Cálculo de Homografía

Método	Máx Error [pix]	Mín Error [pix]	Error Promedio [pix]	Procedimiento
Pixel Alignment (PA)	6,7612	1,5748	3,947	• Extraer Esquinas • Hallar Cte de Magn. • Magnificar • Extraer Esquinas en imgs • Hallar Cte de Alineac. • Recortar • Extraer Esquinas N-img • Hallar Error
Homografía entre 2 Planos	6,2305	0,7895	3,7008	• Extraer Esquinas • <i>Cp2Tform</i> • <i>ImTransform</i> • Extraer Esquinas Nimg • Hallar Cte de Alineac. • Recortar • Extraer Esquinas N-img • Hallar Error
PA + Homografía entre 2 Planos	6,2253	0,8536	3,7766	• <i>Pix_Alignment</i> • Extraer Esquinas • <i>Cp2Tform</i> • <i>imTransform</i> • Extraer Esquinas N-img • Hallar Error
Homografía Infinita + PA	6,3086	1,5682	3,8130	• Hallar Kder, Kizq, R • $Hinf = Kder * R * (Kizq)^{-1}$ • <i>Projective2d</i> (Hinf) • <i>Imwarp</i>, corrección orig. • Hallar esquinas • Alinear Recortar • Hallar Esquinas N-img • Hallar Error

Homografía a partir de R y t	>10	>10	>10	• Hallar F.conv. mm->pix • Transformar Zaprox->pix • Trasladar Img. Homog. • Hallar Esquinas • Error
Homografía para cada Imagen	2,7146	1,7809	3,7766	• Calib stereo Bouguet • Obtener H_der, H_izq • <i>imTransf</i> • Escalar la Nimg • Extraer Esquinas a N-img • Hallar error

Al respecto de cada método vale la pena mencionar algunos detalles:

- *Pixel Alignment* (PA), o alineamiento por píxeles, es el método propuesto en el trabajo de Ursine et al. (2012). Consiste básicamente en igualar el tamaño de las imágenes, y alinearlas de acuerdo a la diferencia de distancia que hay de la esquina de cada imagen a cada punto detectado como esquina del patrón.
- Homografía entre dos planos, es la expresión vista en la sección 2.3.4.4.1 Homografía a partir de un plano, y que se halla por el método de mínimo cuatro correspondencias. En el procedimiento se mencionan las funciones *cp2tform* e *imtransform*, que son las funciones en Matlab para obtener la Homografía entre pares de puntos y transformar una imagen a partir de una matriz de homografía, respectivamente.
- PA + Homografía entre dos planos, es la realización de los métodos 1 y 2 de forma consecutiva.
- Homografía infinita + PA, es el procedimiento que resulta de transformar una imagen a partir de la homografía infinita y alinearla píxel a píxel. La homografía infinita se revisó en la sección 2.3.4.4.3, y es una simplificación que permite hallar una transformación proyectiva a partir de la Rotación entre las dos cámaras y las matrices intrínsecas de las cámaras. Para este caso se hallaron los valores a partir del *toolbox* de calibración de Bouguet (2013). Posteriormente, se utilizó la ecuación de homografía infinita (2.48) y la función *projective2d* para hallar una homografía a partir de los valores obtenidos. Finalmente, se alinearon las imágenes utilizando *Pixel Alignment*, pues debido a la traslación que no se tuvo en cuenta se encuentran desalineadas.
- Homografía a partir de la Rotación y Traslación entre las cámaras, es el método que utiliza la expresión de homografía definida en la ecuación (2.46). Los valores de la Rotación, Traslación, y matrices intrínsecas, son hallados utilizando Bouguet (2013). La profundidad o distancia d se halla en términos de píxeles a partir de un factor de conversión de mm a píxeles, encontrado utilizando las dimensiones del patrón y una imagen, y la distancia promedio a la cual se capturaron las imágenes. Y el vector normal al plano, se define utilizando la red de puntos hallada.
- Homografía para cada imagen, se calcula a partir de las matrices H (de homografía) que entrega Bouguet al utilizar la herramienta *stereo calibration*.

Los resultados obtenidos en la Tabla 3.8, permiten concluir que el mejor método para encontrar una transformación general para un grupo de imágenes, es la Homografía entre dos planos, pues como se ve, es el método que menores errores produce. Esta afirmación se hace teniendo en cuenta que el método de Homografía para cada imagen no se puede utilizar como una transformación general, ya que se calcula para cada par

de imágenes, al igual que la Homografía a partir de R y t. Este último se incluyó en la tabla, para demostrar que el método de transformación que utiliza los valores de Calibración Extrínseca, no es suficiente para encontrar una transformación general en este caso. Por otro lado la Homografía por cada imagen, se incluyó para comparar los valores de los errores de cada método, con el método que de antemano se supone debe producir el menor error, pues no es una generalización, sino que se calcula para cada imagen.

A continuación se explica el algoritmo que se lleva a cabo para hallar la Homografía, que se utilizó en el desarrollo de la Herramienta para Inspección Termográfica

La Figura 3.11a presenta el esquema general de la solución propuesta. El algoritmo se presenta en el diagrama de flujo de la Figura 3.14a y procede como sigue:

- i. **Capturar conjuntos de pares imágenes**, un par imagen se obtiene al capturar, en ambas cámaras, el objeto de interés en el mismo instante.
- ii. **Pre-procesamiento de imágenes**. Ecuilización del histograma y umbralización.
- iii. **Detectar esquinas** en las imágenes para crear nube de puntos 2D.
- iv. **Emparejar par imágenes válidas**. Un par imagen es válido si y solo si la detección de esquinas fue exitosa en las imágenes en ambos espectros, en caso contrario, el par imagen debe ser eliminado del set.
- v. **Calcular matriz de homografía**. Siendo A y B cualquiera de los espectros térmico o visible, si se toma el set del espectro A como referencia y el set del espectro B como destino, la matriz de homografía H servirá para la proyección de A hacia B y la inversa de H para la proyección de B hacia A.
- vi. **Optimizar parámetros**. Se usa el algoritmo de Levenberg-Marquardt para minimizar el error de reproyección de la ecuación (3.2).

$$\sum_i \left(x'_i - \frac{h_{11}x_i + h_{12}y_i + h_{13}}{h_{31}x_i + h_{32}y_i + h_{33}} \right)^2 + \left(y'_i - \frac{h_{21}x_i + h_{22}y_i + h_{23}}{h_{31}x_i + h_{32}y_i + h_{33}} \right)^2 \quad (3.2)$$

- vii. **Calcular errores**. Se obtienen los errores de transferencia simétrico usando la matriz calculada.

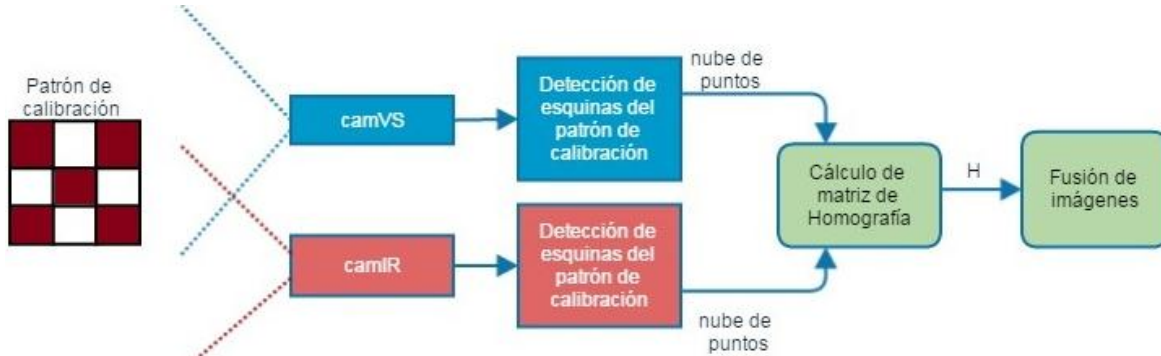


Figura 3.11 Esquema general para el cálculo de la matriz de homografía

El cálculo de la homografía y su optimización se realiza con la función *findHomography* de OpenCV la cual, como se explica en la documentación (2014b), calcula la matriz H que relaciona los puntos fuente con los destino, ecuación (3.3).

$$s_i(x'_i, y'_i, 1)^T \approx H(x_i, y_i, 1)^T \quad (3.3)$$

Donde (x_i, y_i) son las coordenadas de origen, (x'_i, y'_i) son las coordenadas de destino y s_i el factor de escala. Para este cálculo se ha elegido el método LMS (*Least Median of*

Squares) ya que como lo explican Zisserman y Hartley (2004) este método a diferencia de RANSAC (*R*andom *S*ample *C*onsensus) no necesita, para su ejecución, ajustar el umbral de decisión de datos válidos o de conocimiento *a priori* de la varianza del error. Aunque como se indica también en la documentación de OpenCV (2014b), la elección de este método es correcta si la cantidad de puntos correctos son más del 50% del total de los datos. Para nuestro caso, el cálculo de la homografía se realiza si la detección de esquinas es exitosa, por tanto es claro que se tiene porcentaje mayor al 50% de puntos válidos.

Los puntos que se han decidido para el cálculo de la homografía han sido las esquinas halladas del patrón de calibración. Sin embargo en la técnica *stitching* de imágenes, es decir en la combinación de múltiples imágenes que superponen sus campos de visión, se hace uso de extractores de características, descriptores y algoritmos de emparejamiento o *matching*, (Szeliski, 2010), como SURF, SIFT y FREAK. En la Tabla 3.9 se presenta una breve descripción de estas técnicas, las cuales se implementaron en cuatro metodologías como lo muestra la Figura 3.12. Siendo el orden de búsqueda de características, descripción y *matching*, la implementación se realizó así: SURF-SURF-FLANN, SIFT-SURF-FLANN, SIFT-SIFT-FLANN, SIFT-FREAK-Fuerza Bruta.

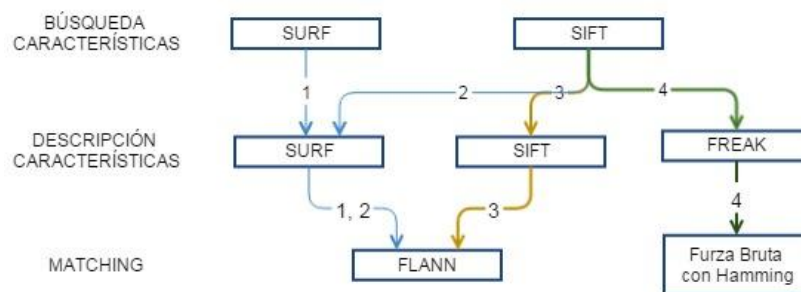


Figura 3.12 Implementaciones realizadas para aplicación de descriptores

Tabla 3.9 Técnicas de extracción de puntos característicos y descriptores visuales. (Hernández & Gómez, 2013)

Trabajos	Detección de puntos clave	Cálculo de descriptores	Tipo de descriptor	Invariante ante escala	Invariante ante rotación
SURF	Determinante de la matriz Hessiana	Contenido de intensidad alrededor del punto clave	Flotante	Sí	Sí
SIFT	Diferencia de gaussianas	Histogramas de gradientes alrededor del punto clave	Flotante	Sí	Sí
FREAK	---	Test binarios alrededor del punto clave, en un patrón basado en la retina humana	Binario	Sí	Sí

Para poner a prueba estas técnicas, se decidió trabajar con el cuarto *set* de la Tabla 3.6, capturas en un ambiente interior con luz natural, ya que éste presenta el mayor porcentaje de éxito en la detección de esquinas. La Figura 3.13 presenta visualmente los resultados de la implementación de los métodos mencionados. Los puntos en gris corresponden a las características detectadas. Las líneas rojas que van de una imagen a la otra, representan la correspondencia de los 20 puntos con mayor similitud entre las imágenes. La Figura 3.13a muestra un caso ideal en el que las imágenes son idénticas. Para la Figura 3.13b se implementó SURF para búsqueda y descripción de características. La Figura 3.13c, la Figura 3.13d y la Figura 3.13e presentan los resultados de usar la técnica SIFT para la búsqueda de características y los descriptores SURF, SIFT y FREAK, respectivamente, para la descripción. En todos los casos se usó FLANN como algoritmo de correspondencia de puntos, excepto para los descriptores FREAK con los cuales se usó Fuerza Bruta.

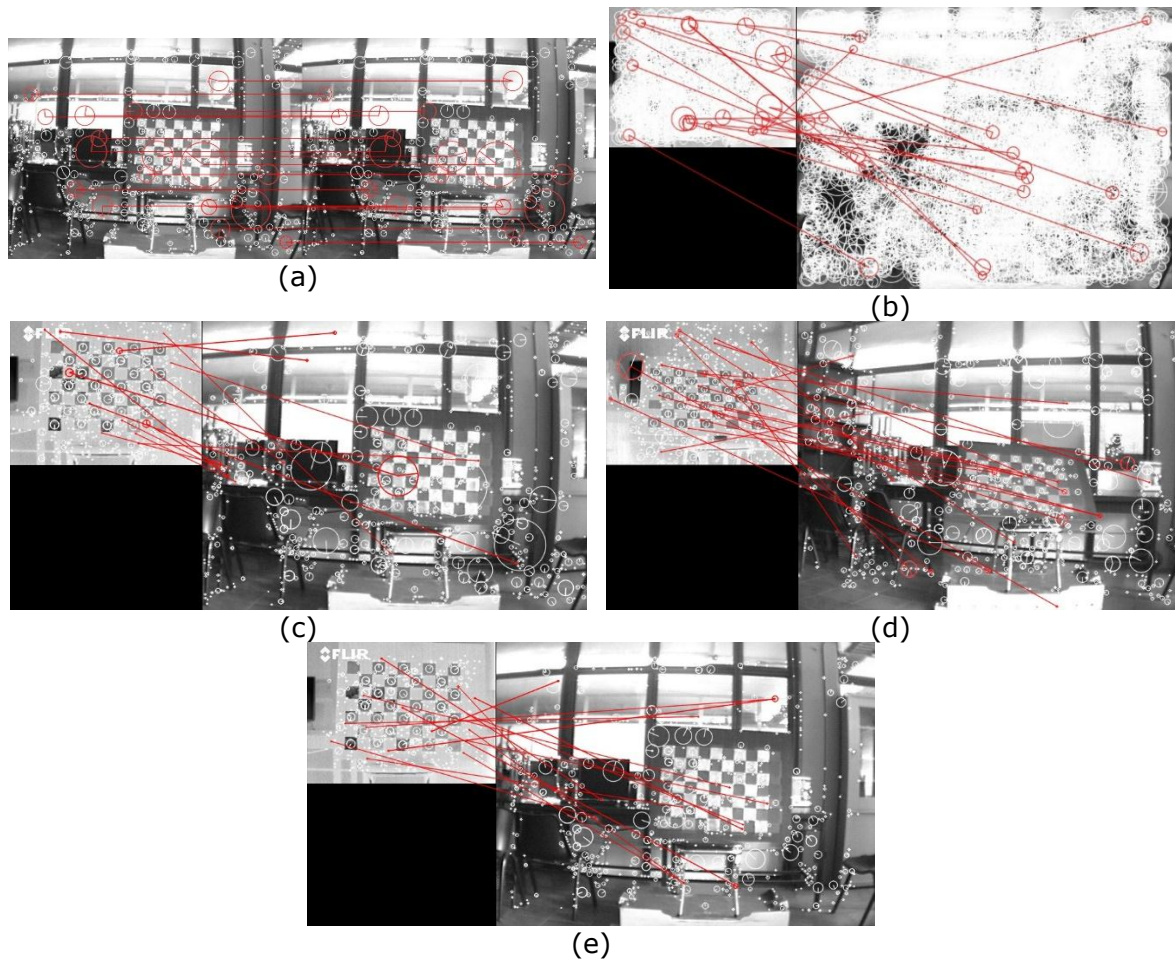


Figura 3.13 Imágenes resultantes de la implementación de 4 metodologías para emparejamiento entre dos imágenes de la misma escena pero de espectro diferente, exceptuando (a) que presenta la relación entre dos imágenes idénticas. Tomando el orden de: búsqueda de características, descripción y matching, se tiene que: (a) SIFT-SIFT-FLANN. (b) SURF-SURF-FLANN. (c) SIFT-SURF-FLANN. (d) SIFT-SIFT-FLANN. (e) SIFT-FREAK-Fuerza Bruta.

Analizando visualmente los resultados de La Figura 3.13 se observa que, tomando como referencia el primer caso en que la correspondencia de puntos es ideal, las correspondencias para las cuatro metodologías presentadas es completamente errónea, ya que los puntos en una imagen no corresponden con sus equivalentes en la segunda imagen. Estos resultados se deben a que los descriptores de características en imágenes de diferente espectro difícilmente pueden corresponder, pues su adquisición se fundamenta en las intensidades de las imágenes. Se concluye que el proceso de búsqueda de patrones, descripción y *matching*, haciendo uso de las técnicas SIFT, SURF, FREAK, FLANN y Fuerza Bruta no es apropiado para el escenario que se presenta: campos de visión superpuestos con información de origen diferente, espectro térmico y visible; permitiendo corroborar que la elección de esquinas del patrón de calibración como puntos característicos para el cálculo de la homografía ha sido apropiada.

Obtenida la matriz de homografía se realiza la fusión de imágenes, la cual se explica en Figura 3.14b y se realiza como sigue:

- i. **Decidir espectro de origen** y espectro de destino, lo cual implica decidir si se usa la matriz de homografía H o su inversa.
- ii. **Aplicar matriz de homografía** correspondiente.
 - a. Se crea una imagen, inicializada en ceros, del mismo tamaño que la imagen destino.
 - b. Se aplica la matriz de homografía y se llena la nueva imagen con los valores de píxeles proyectados.
- iii. **Evaluar si la proyección tiene correspondencia** en área de destino. Dependiendo de la superposición de los campos de visión de las cámaras, es posible que existan zonas en las imágenes sin correspondencia entre ellas. Se evalúa si las coordenadas extremas del área proyectada tienen correspondencia dentro de la imagen destino.
- iv. **Fusionar imágenes.** Finalmente se ejecutará la fusión de imágenes ya sea con el método de fusión térmica o de imagen en imagen.

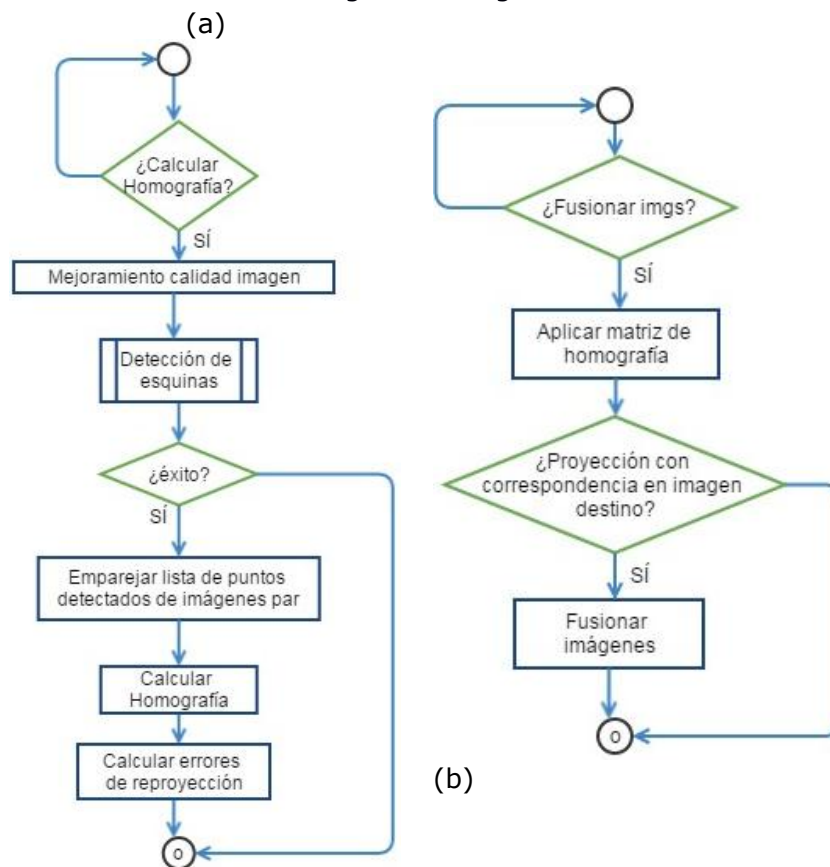


Figura 3.14 Diagramas de flujos: (a) cálculo de homografía, (b) fusión de imágenes

La fusión de imágenes es posible del espectro térmico al visible y viceversa. Se realiza a través de tres métodos:

- **Imagen en imagen:** como se muestra en la Figura 3.15a, el área proyectada con información térmica reemplaza por completo los píxeles correspondiente en la imagen destino.
- **Fusión térmica:** las imágenes a fusionar presentan un porcentaje de transparencia del espectro visible y térmico, que juntos suman el 100%. Se usa la técnica de mezcla por alfa cuya implementación se presenta en la ecuación (3.4), (Bican et al.,

2002). La Figura 3.15b muestra una fusión con relación de transparencia del 60% de información visible y 40% de información térmica.

$$F(x, y) = \alpha * EV(x, y) + (1 - \alpha) * IR(x, y) \quad (3.4)$$

Donde $F(x, y)$ es la fusión de imágenes, $EV(x, y)$ la capa del espectro visible e $IR(x, y)$ la información del termograma. α es el factor de mezcla para los espectros.

- **Umbralización de color:** aplicada sobre el espectro térmico permite limitar los colores a visualizar en el termograma, y ya que los colores van relacionados directamente con la temperatura, permite resaltar regiones que cumplen criterios de temperaturas. La umbralización de color tiene en cuenta un límite superior y un límite inferior y se puede aplicar tanto al método imagen en imagen, como al método de fusión térmica. La ecuación (3.5) presenta la umbralización de color con fusión imagen en imagen y la Figura 3.15c muestra un ejemplo, donde el área proyectada ha sido filtrada por rango de colores permitiendo resaltar las temperaturas de interés dentro del contexto del espectro visual.

$$F(x, y) = \begin{cases} IR(x, y) & \text{si } Umbral_1 < IR(x, y) < Umbral_2 \\ EV(x, y) & \text{cualquier otro caso} \end{cases} \quad (3.5)$$

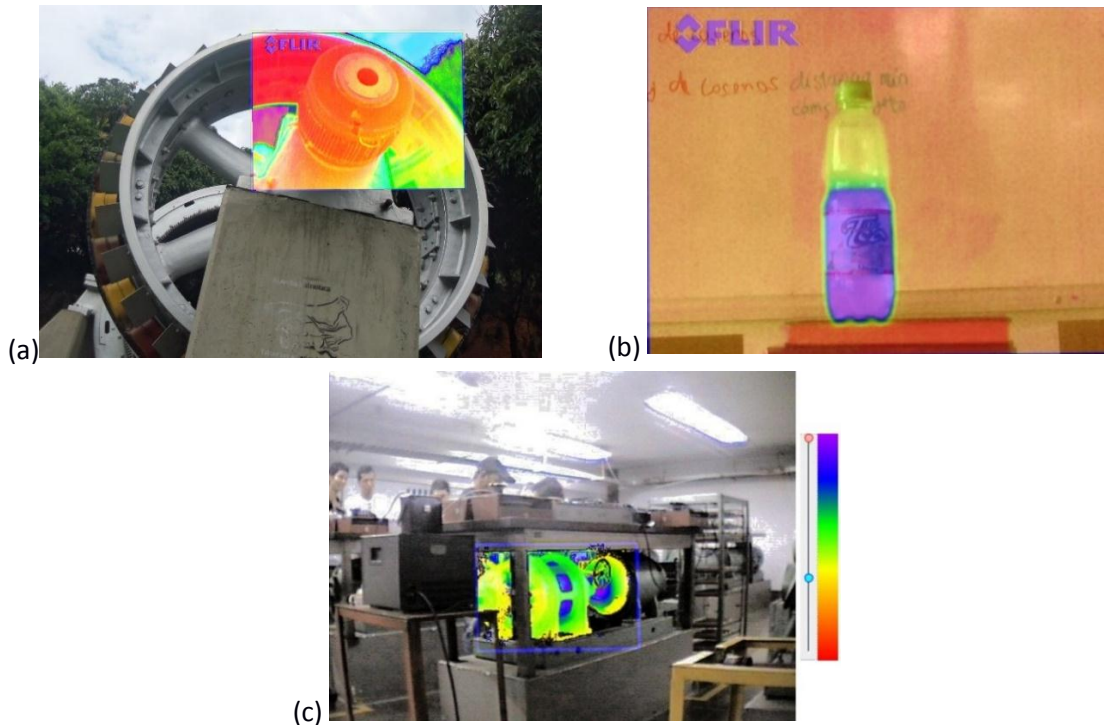


Figura 3.15 Métodos para fusión de imágenes con proyección de espectro térmico a visible: (a) imagen en imagen, (b) fusión térmica, 60%visible-40%térmico, (c) umbralización de color con fusión a través de imagen en imagen

3.4 DESCRIPCIÓN DE LA APLICACIÓN

A lo largo de este capítulo se han descrito las partes de la Herramienta de Inspección Termográfica que permiten adquirir un conjunto de imágenes y los pasos necesarios para utilizar estas imágenes en un algoritmo de calibración. A continuación se describirá el programa que lleva a cabo el proceso de hallar los valores de Calibración y Matrices de Transformación necesarias para transformar imágenes de espectro Visible a espectro Infrarrojo y viceversa. Este caso es cubierto por la Aplicación para Inspección

Termográfica “*InVi Fusion*”.

InVi Fusion es una aplicación software que debe permitir automatizar el proceso de calibración intrínseca y extrínseca para un arreglo de una cámara de espectro visible (EV) y una cámara de espectro infrarrojo (IR). El arreglo de las cámaras ha sido claramente especificado anteriormente, de tal forma que un usuario tiene la posibilidad de implementar su propio arreglo y obtener los resultados deseados, independientemente de las características de las cámaras siempre y cuando se tenga una cámara IR y una EV.

El objetivo es generar una imagen, resultado de fusionar las características más importantes de cada espectro, para obtener imágenes donde se puedan apreciar características como límites y bordes que ofrece el espectro visible y las diferencias de temperatura que ofrece un termograma. Esta aplicación ofrece una mejora respecto a las ya disponibles en el mercado, en lo referente a las funciones de fusión de imágenes, ya que, como se revisó en el estado del arte de aplicativos de inspección termográfica, la mayoría de aplicaciones que ofrecen esta función dependen de configuraciones específicas a la cámara infrarroja que se esté usando, y también de la disponibilidad de la función en la cámara. Por su parte, *InVi Fusion* es independiente al tipo de cámara IR que se utilice.

A partir de la imagen (o imágenes) allí obtenidas debe ser posible generar un reporte, de forma que el software pueda ser utilizado en un proceso de inspección termográfica real. Por lo tanto en esta sección se presenta la Especificación de Requerimientos, el Diagrama de Casos de Uso y el Diagrama de Clases general de la Aplicación, siguiendo la metodología RUP (*Rational Unified Process*) de diseño de software (Kruchten, 2004).

3.4.1 ESPECIFICACIÓN DE REQUERIMIENTOS

En la Tabla 3.10 se listan el conjunto de requerimientos de la aplicación desarrollada. Éstos han sido clasificados en cuatro grupos: Requerimientos de Interfaz Gráfica, de Calibración, de Análisis de Imágenes y de Reporte.

Tabla 3.10 Especificación de Requerimientos

 Universidad del Valle	Universidad del Valle <i>InVi Fusion</i>		Rev.: 002
Título: ESPECIFICACIÓN DE REQUERIMIENTOS FUNCIONALES		Documento: ERF-001	Página: 1 de 2
REVISIÓN HISTÓRICA			
Rev.	Descripción del Cambio	Autores	Fecha
001	Construcción del documento	Sergio Cardona Melo Rafael Ospina Caicedo	2014-03-11
002	Correcciones	Sergio Cardona Melo Rafael Ospina Caicedo	2014-09-29
Ref.	Funciones		Categoría
1.0	Interfaz Gráfica		
1.1	Permitir cargar imágenes desde Disco a un espacio de trabajo donde se visualicen como miniaturas.		E
1.2	Permitir cargar Archivos de Parámetros desde Disco		E
1.3	Permitir guardar Imágenes seleccionadas o parámetros actuales al disco.		E
1.4	Permitir limpiar imágenes Seleccionadas en el espacio de trabajo		E

1.5	Permitir modificar configuraciones generales de la aplicación	E
1.6	Permitir ver la Versión de la Aplicación	E
1.7	Permitir ver el Manual de la Aplicación	E
1.8	Permitir ver mensajes de información durante la ejecución de procesos en la aplicación	E
2.0	Calibración	
2.1	Permitir capturar y guardar imágenes a partir de una entrada de vídeo.	E
2.2	Permitir llevar a cabo el proceso de calibración monocular a partir de imágenes cargadas desde archivo o capturadas a partir de una entrada de vídeo.	E
2.3	Permitir hacer la corrección de efectos de distorsión en cualquier imagen capturada por una cámara previamente calibrada.	E
2.4	Permitir llevar a cabo el proceso de cálculo de matriz de homografía a partir del conjunto de pares de imágenes de diferente espectro.	E
2.5	Permitir llevar a cabo el proceso de homografía manual para dos imágenes de diferente espectro.	E
3.0	Análisis de Imágenes	
3.1	Permitir visualizar una imagen de Espectro Visible y Espectro Infrarrojo simultáneamente para realizar procesamiento sobre ellas.	E
3.2	Permitir transformar una imagen desde la perspectiva de una cámara de Espectro Visible, a la perspectiva de una cámara de Espectro Infrarrojo y viceversa usando los resultados de la calibración extrínseca.	E
3.3	Permitir visualizar en tiempo real la fusión de dos entradas de vídeo utilizando los resultados del cálculo de homografía.	E
3.4	Permitir variar el grado de transparencia en la Imagen resultante de la fusión de una imagen de Espectro Visible y una Imagen de Espectro Infrarrojo.	E
3.5	Permitir transformar sólo una porción del área de una imagen de un espectro a otro.	E
3.6	Permitir extraer Bordes de una imagen de Espectro Visible.	E
3.7	Permitir visualizar la distribución de píxeles de una imagen Infrarroja en un histograma.	E
3.8	Permitir ecualizar el histograma de una imagen de Espectro Visible.	E
3.9	Permitir resaltar píxeles comprendidos en un rango de intensidad de una imagen de Espectro Infrarrojo.	E
3.10	Permitir desplazar la transformación de una imagen sobre otra.	E
3.11	Permitir restablecer una imagen a su estado inicial, desechando los cambios o transformaciones que hayan sido realizados sobre ella.	
3.12	Permitir reducir o ampliar el tamaño de una imagen conservando todas las características que hayan sido modificadas.	E
3.13	Permitir seleccionar la visualización de una imagen de Espectro Visible en escala de grises o en su forma original.	E
3.14	Permitir variar la paleta de color de una imagen de Espectro Infrarrojo	E
4.0	Reporte	
4.1	Permitir generar un reporte en formato de documento pdf, con campos de información predefinidos y modificables por el usuario.	E
4.2	Permitir agregar, o modificar la cantidad de imágenes agregadas al reporte en dos presentaciones: dos imágenes por tabla, o una imagen por tabla.	E
4.3	Permitir modificar la información de los campos de una tabla de imagen	E

4.4	Permitir seleccionar una imagen para ser agregada como logotipo de la empresa en el reporte	E
4.5	Permitir visualizar una vista previa de la forma final del reporte en visor pdf	E
4.6	Permitir guardar el resultado final de un reporte en una ubicación especificada por el usuario.	E

Para entender cómo se relaciona cada requerimiento con otros y con las acciones del usuario, se ha construido un diagrama de casos de uso que se puede ver en la Figura 3.16. Los casos de uso definen la serie de acciones por parte de los usuarios y las respuestas del sistema para cada requerimiento especificado.

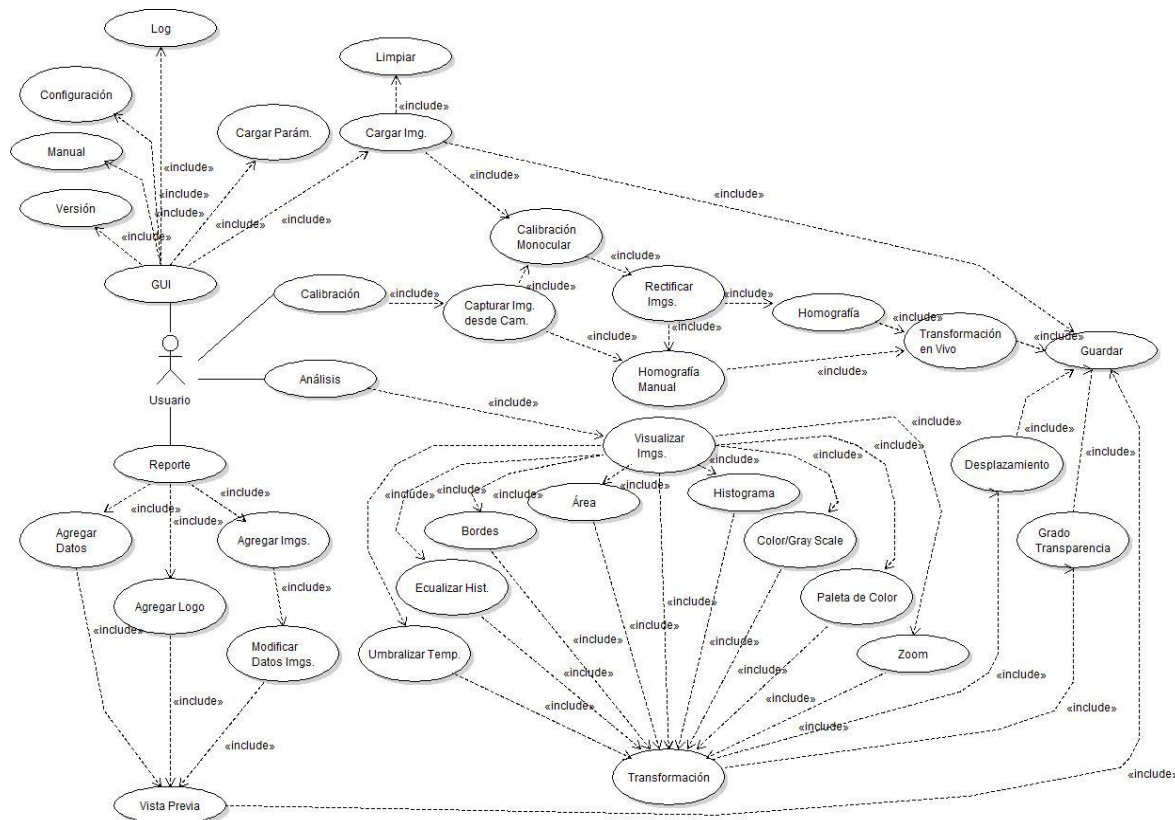


Figura 3.16 Diagrama de Casos de Uso *InVi Fusion*.

Como se ve en el diagrama, los casos de uso están distribuidos en cuatro partes que corresponden a Interfaz Gráfica (GUI), Calibración, Análisis y Reporte. La forma en la que se ha organizado cada función corresponde con el orden en el que se debe ejecutar, o en el que se hará disponible al usuario. De esta forma, para que la función de Calibración Monocular se pueda ejecutar, se debe haber ejecutado: Cargar Img., o Capturar Img. desde Cam. Sin embargo, este orden no siempre corresponde con la forma obligatoria de ejecución de la aplicación. Por ejemplo, en la sección de Reporte, el diagrama muestra que para ejecutar una Vista Previa se deben haber ejecutado los procesos Agregar Datos, Agregar Logo y Modificar Datos Imgs. No obstante, es posible realizar una vista previa del documento sin haber realizado la ejecución de las tareas anteriores. En este caso, se muestra simplemente el orden lógico de ejecución de procesos para obtener el mejor resultado.

En el caso de la sección GUI se debe aclarar que estas funciones están disponibles al

usuario en cualquier momento. Al contrario de las otras secciones, que se encuentran separadas por la Interfaz General (*Front End*) de la aplicación que está organizada en una disposición (*Layout*) de pestañas. Cada pestaña corresponde a una de las tres funciones generales de la aplicación, y están organizadas así: Calibración, Análisis de Imágenes y Reporte. Pues es el orden lógico que se propone para realizar un reporte a partir de una inspección termográfica.

3.4.2 DIAGRAMAS DE CLASES

En la Figura 3.17 se presenta el Diagrama de Clases General de la aplicación. El diagrama relaciona las principales clases y muestra la forma en que se compone la jerarquía de clases. A grandes rasgos, la aplicación se divide en tres clases, dentro de las cuáles se encuentran la gran mayoría de las funciones. Estas son: *tabAnalysis*, *tabCalibration* y *guiReport*, que corresponden a los requerimientos de Análisis de Imágenes, Calibración y Reporte (Tabla 3.10), respectivamente. Las funciones que corresponden a la Interfaz Gráfica están implementadas en los métodos de la clase principal o *FrontEnd*, y hacen uso de la clase *workspacePanel* para desplegar los diferentes archivos de imágenes que se generan o cargan a la aplicación. Por último, se creó una clase auxiliar para permitir relacionar variables y métodos entre las clases principales, esta se denominó *objectsStore*.

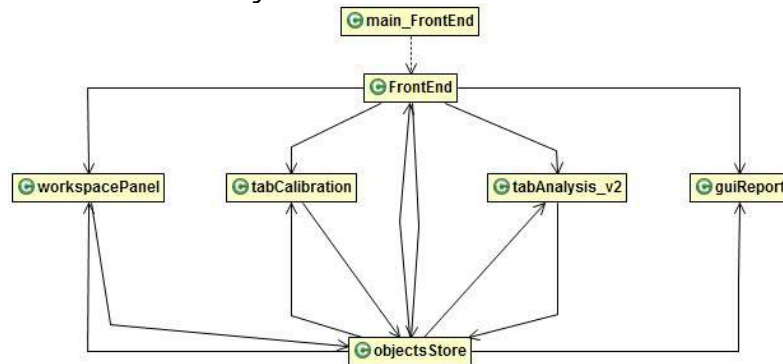


Figura 3.17 Diagrama de Clases General

En la Figura 3.18 se expone el diagrama de clases extendido de la clase *tabCalibration*, donde se pueden ver las otras clases que intervienen con las principales funciones de esta.

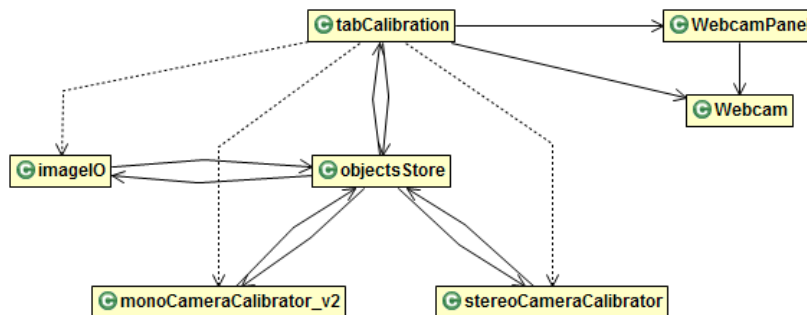


Figura 3.18 Diagrama de Clases *tabCalibration*

La clase *tabCalibration* realiza todas las funciones que tienen que ver con la calibración del sistema de cámaras. Para ello llama a dos clases auxiliares a través de *objectsStore*. La clase *monoCameraCalibrator_v2* se encarga de obtener la matriz de proyección de las cámaras, los parámetros de distorsión y la rectificación de las imágenes. La clase *stereoCameraCalibrator* obtiene la matriz de transformación u homografía, a partir de los conjuntos de imágenes de dos cámaras. La clase *imageIO* se encarga de todas las operaciones de entrada y salida de datos de imágenes y las clases *WebcamPanel* y

Webcam permiten agregar y activar cámaras que hayan sido conectadas al equipo donde se ejecuta la aplicación.

En la Figura 3.19 se muestra el diagrama de clases extendido de la clase *tabAnalysis_v2*. En él se ven las clases que permiten realizar todo el procesamiento y transformación de las imágenes. La clase *tabAnalysis* se encarga de poner a disponibilidad del usuario una variedad de funciones para modificar las imágenes, de forma que puedan ser añadidas a un reporte de inspección termográfica. Entre otras, su función más importante es obtener la fusión de las imágenes EV e IR, a partir de los resultados obtenidos en *tabCalibration*. Todas estas funciones se encuentran en los métodos de la clase *imageProcessing*. Las funciones de entrada y salida de imágenes, son almacenadas, como ya se había mencionado, en la clase *imageIO*. Y adicionalmente, se muestran dos clases auxiliares llamadas *RangeSlider* y *RangeSliderPanel*, que permiten desplegar una función de interfaz gráfica, para que el usuario pueda variar los rangos de temperatura que desea que se vean en las imágenes térmicas.

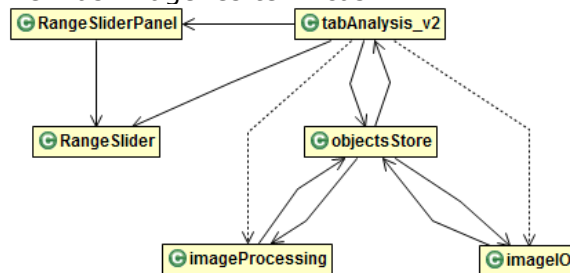


Figura 3.19 Diagrama de Clases *tabAnalysis_v2*

En la Figura 3.20 se muestra el diagrama de clases extendido de la clase *guiReport*. En esta clase se almacenan los métodos que cumplen los requerimientos de Reporte. Básicamente, esta clase se muestra al usuario como un gran formulario con datos para ser completados. En cualquier momento el usuario puede generar una vista previa del documento en formato *pdf*. Esto se hace a través de la clase *PDFViewer*, la cual es una aplicación de *Sun Microsystems* distribuida como *software* libre, a través de la licencia Pública General GNU; que permite visualizar un documento *pdf*. Al finalizar el usuario puede guardar el resultado de su trabajo en la ubicación del sistema de archivos que desee, nuevamente a través de la clase *imageIO*.

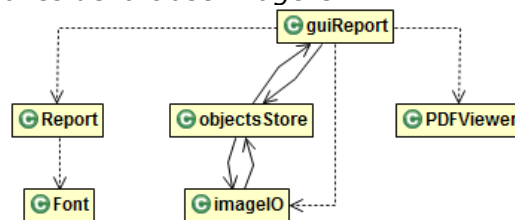
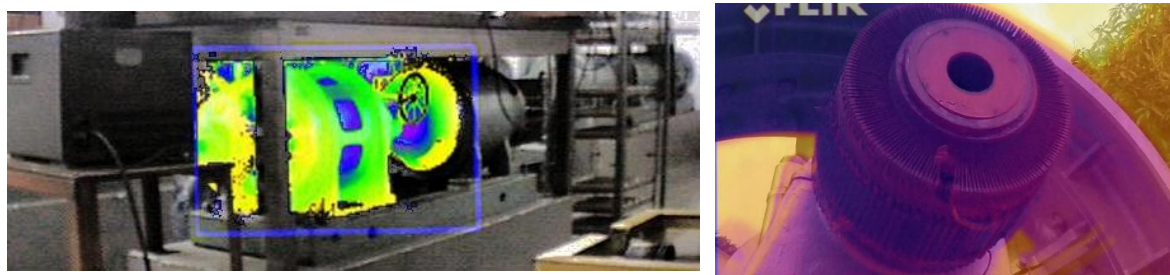


Figura 3.20 Diagrama de Clases *guiReport*

El código fuente se encuentra organizado en tres paquetes, cada uno de ellos con una función específica: *gui* incluye todas las clases y métodos necesarios para la realización y funcionamiento de la interfaz de usuario; *backProcessing* incluye todas las clases y métodos necesarios para realizar cálculos de calibración, procesamiento de imágenes, y los métodos necesarios para interactuar entre ellos y la interfaz de usuario; *PDFViewer* incluye clases y métodos necesarios para la generación del reporte de inspección. La anterior organización descrita permite al programa ser fácilmente escalable para corregir los módulos ya existentes, como para integrar nuevos módulos que permitan dar una mayor utilidad al programa.



4 PRUEBAS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

Contenido

4.1	Introducción	76
4.2	Medición del error en el cálculo de la homografía.....	76
4.3	Procesamiento de imágenes.....	84
4.4	Protocolo de validación y reporte de inspección termográfica	87
4.4.1	Protocolo de Inspección	87
4.4.2	Reporte de Inspección Termográfica	88
4.5	Herramienta de software	89

4.1 INTRODUCCIÓN

El siguiente capítulo recoge los resultados de las pruebas hechas a la Herramienta de Inspección desarrollada. Inicialmente se explica el procedimiento realizado para calcular el error de transferencia simétrico, y se muestran los resultados que se obtuvieron a partir de tres conjuntos de imágenes provenientes de tres configuraciones de cámaras. Estos resultados son: los valores numéricos que permite analizar qué tan bien se comporta el método elegido, además de las imágenes que permiten hacer un valoración cualitativa de la herramienta de fusión de espectros.

Posteriormente se exponen los resultados de las herramientas de procesamiento de imágenes implementadas en la aplicación *InVi Fusion*; cuya función consiste en realizar una serie de transformaciones en las imágenes, que facilitan el análisis y la creación de reportes más comprensibles. En la siguiente sección, se realiza una descripción del protocolo de validación de inspección termográfica establecido. De igual forma se describe el producto final de la aplicación, el cual consiste de un reporte de inspección térmica que cumple con las características más importantes, definidas en la Guía Estándar para inspección en Instalaciones Eléctricas y Mecánicas del organismo de normalización *ASTM International* (2014).

Por último, se hace un análisis comparativo de las características más importantes de una aplicación de inspección térmica, en donde se incluyen las aplicaciones más importantes revisadas en el segundo capítulo y se confrontan con la herramienta desarrollada en este trabajo.

4.2 MEDICIÓN DEL ERROR EN EL CÁLCULO DE LA HOMOGRAFÍA

Para cuantificar la calidad en la fusión de imágenes, se debe analizar el error del cálculo de la matriz de homografía. Para ello se observa el error medio de transferencia y el

error mínimo cuadrático de transferencia simétrico. El error de transferencia se define como la distancia euclidiana en una primera imagen entre el punto x' medido en ella y el punto proyectado Hx desde una segunda imagen. El error de transferencia simétrico se explica más adelante.

Siendo A y B cualquiera de los espectros térmico o visible, el cálculo del error se muestra en el diagrama de la Figura 4.1 y se explica a continuación:

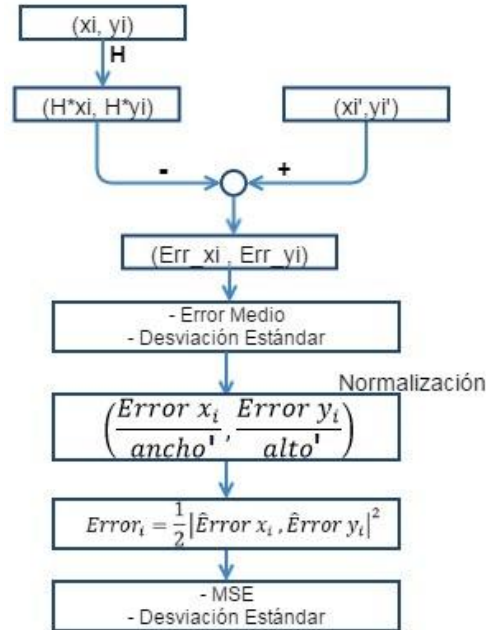


Figura 4.1 Diagrama de flujo para cálculo de error de proyección. (x,y) y (x',y') son coordenadas medidas.

- i. **Proyectar puntos** con la matriz de homografía desde A hacia B.
- ii. **Estimar error de transferencia** entre los puntos proyectados desde A y los valores esperados en B. Corresponde a la distancia euclidiana entre la proyección del punto x y su valor esperado x' (Zisserman & Hartley, 2004).
- iii. **Calcular error por cada imagen** incluyendo las distancias de todos los puntos proyectados, ecuación (4.1), para obtener el error promedio y su desviación estándar.

$$Error_j = \sum_i d(x'_i, Hx_i) \quad (4.1)$$

Donde i hace referencia a los puntos proyectados y j a la imagen analizada

- iv. **Normalizar datos.** Ya que las imágenes no necesariamente tendrán el mismo tamaño, un error con valor en píxeles del espectro A no será comparable con su valor homólogo en el espectro B. Para ello se normalizan los datos dividiendo entre el ancho y alto de la imagen destino como lo muestra la ecuación (4.2).

$$\hat{d}(x, y) = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(\frac{d_x(x'_i, Hx_i)}{\text{ancho}'}, \frac{d_y(x'_i, Hx_i)}{\text{alto}'} \right) \quad (4.2)$$

Donde d_x y d_y son las magnitudes de la distancia del error en el eje x y y respectivamente. El factor $\sqrt{2}$ se da porque en el caso en que los puntos estén desplazados en (ancho, alto) píxeles, el error normalizado será (1,1) y su magnitud $\sqrt{2}$. Así, un error normalizado con magnitud 0 significará completa alineación, 1

desalineación correspondiente al tamaño de la imagen y mayor a 1 querrá decir que las imágenes tienen en absoluto zona de superposición.

- v. Repetir pasos i-iv tomando espectro B como referencia y A como destino.
- vi. **Hallar error por cada par imagen y total.** Una vez normalizados los datos es posible calcular el error por cada par imagen y el error total del sistema. Para ello se usa el error de transferencia simétrico descrito en Zisserman & Hartley (2004). Ver ecuación (4.3).

$$\sum_i \hat{d}(x'_i, Hx_i)^2 + \hat{d}(x_i, H^{-1}x'_i)^2 \quad (4.3)$$

El primer término en la suma es el error de transferencia en la primera imagen, y el segundo término es el error de transferencia en la segunda imagen. Tomando todos los errores de los par imagen se calcula el error cuadrático medio y la desviación estándar de todo el sistema.

La Figura 4.2 y la Figura 4.3 incluyen los cuatro gráficos de error que la aplicación entrega luego de calcular la matriz de homografía. La Figura 4.2a y la Figura 4.2b presenta en un diagrama de dispersión, como es sugerido por Bouguet (2013), el error de transferencia con valores en píxeles entre espectros: del infrarrojo al visible y del visible al infrarrojo respectivamente. La Figura 4.3a presenta en diagrama de barras, como lo sugiere Matlab (2014), el error medio de transferencia simétrico, con valores en píxeles, entre espectros para cada par imagen válido y su valor total; se incluye el valor de la desviación estándar para ayudar a una mejor interpretación de los resultados.

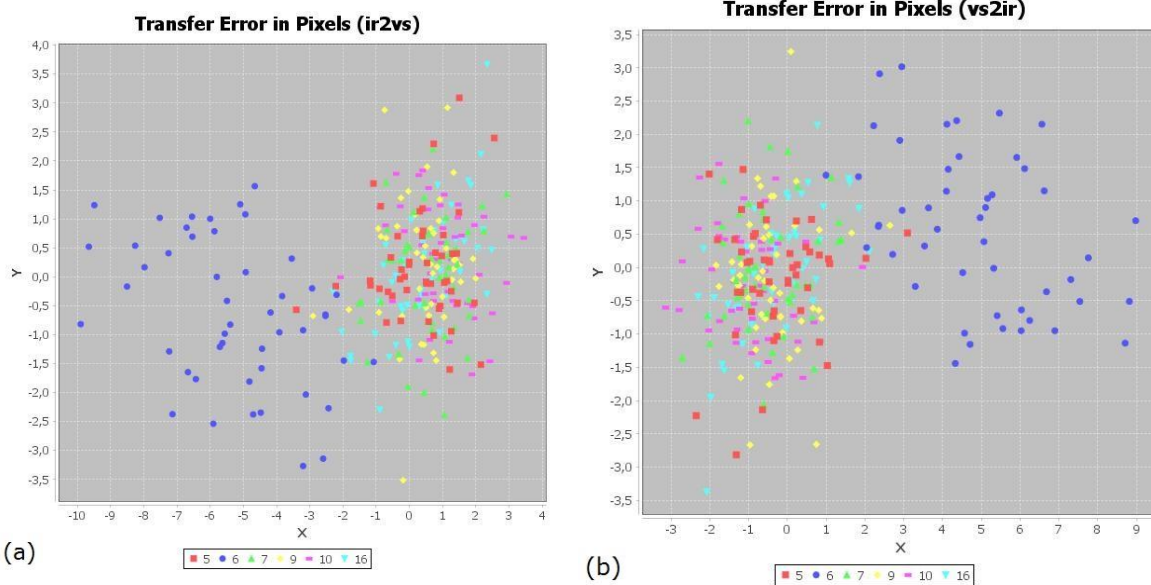


Figura 4.2 Diagramas de dispersión para error de transferencia en píxeles entre proyección de espectros: (a) De espectro térmico a visible. (b) De espectro visible a térmico. Cada color corresponde a un par imagen válido proyectado. La posición de cada punto representa su error simétrico de transferencia en píxeles en la dirección x y y .

La Figura 4.3b presenta, en diagrama de barras, el valor del error normalizado con su desviación estándar para cada par imagen válido y para el sistema completo. Los valores numéricos se imprimen de manera organizada en la ventana *log* de la interfaz de usuario con el formato presentado en la Tabla 4.1

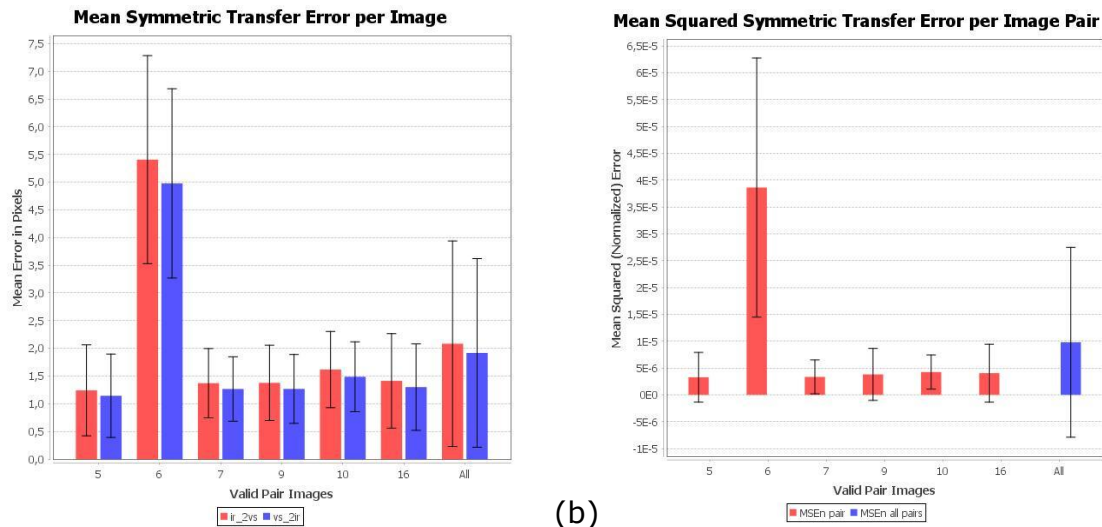


Figura 4.3 Gráficos de error de transferencia simétrica: (a) Diagramas de barras con valor en píxeles de error medio y desviación estándar de imágenes válidas y total. Las barras en color rojo corresponden al error por proyectar del espectro infrarrojo al visible y las de color morado del espectro visible al térmico. (b) Diagrama de barras con valores normalizados del error y desviación estándar de cada par imagen y del sistema completo. Las barras en rojo corresponden al error por cada par imagen válido, la barra en color morado representa el error de todo el sistema.

Tabla 4.1 Formato de impresión de valores de errores dentro de la interfaz en área de *log*.

Transfer Error in PIXELS and MSE for Symmetric NORMALIZED Transfer Error values						
Pair	IR 2vs IN PIXELS		VS 2ir IN PIXELS		BOTH-NORMALIZED	
	Mean	StdDev	Mean	StdDev	Mean	StdDev
5	1.242040966	0.821010048	1.1441124	0.75272589	3.28E-06	4.63E-06
6	5.406647568	1.877598744	4.9776528	1.70851431	3.86E-05	2.41E-05
7	1.371101616	0.625419712	1.26642119	0.58150281	3.35E-06	3.15E-06
9	1.377255345	0.678469391	1.26777429	0.62147814	3.81E-06	4.83E-06
10	1.616961565	0.687498552	1.4869073	0.63103298	4.25E-06	3.18E-06
16	1.412654083	0.852854227	1.30056777	0.7805859	4.04E-06	5.40E-06
ALL	2.082884205	1.85584903	1.91735383	1.7025666	9.79E-06	1.77E-05

El análisis cuantitativo del sistema se realizó con tres grupos de pares imágenes provenientes de tres configuraciones distintas de cámaras IR y EV, siendo cada par imagen una captura del patrón de calibración. Basándose en el algoritmo de la Figura 4.1 se realizaron dos procedimientos: en el primer procedimiento se calculó la homografía trabajando directamente sobre las imágenes sin calibración intrínseca, mientras en el segundo procedimiento se ejecutó y aplicó la calibración intrínseca sobre las imágenes de espectro visible. Los resultados estadísticos del error de calibración extrínseco se organizaron en tres tablas, una por cada configuración de cámaras. La cámara térmica fue configurada para todos los casos con tamaño de imagen de 320x240 píxeles. Las cámaras visibles se configuraron así: Sharp con tamaño de imagen de 640x480 píxeles en la Tabla 4.2, webcam Genius con tamaño de 640x480 en la Tabla 4.3 y la cámara Kodak con tamaño de 2048x1536 en la Tabla 4.4. Los parámetros a analizar fueron: las correspondencias, que son la cantidad de *inliers*, es decir los puntos exitosamente correspondidos entre imágenes; el error medio de transferencia y su desviación estándar para las proyecciones de espectro visible a térmico y de térmico a visible; y finalmente se observa el error cuadrático normalizado de transferencia simétrico, el cual implica el error total del sistema al incluir en su cálculo la proyección desde y hacia ambos espectros.

Tabla 4.2 Tabla con resultados de calibración extrínseca para configuración de cámaras IR FLIR E320 con tamaño de imagen 320x240 y la cámara Sharp con 640x480. El error T medio hace referencia al error medio de transferencia, MSE es el error cuadrático medio (*Mean Squared Error*) normalizado

Sharp EV:640x480; FLIR E320:320x240			
Proyección de Espectro	Parámetro	Homografía directa	C. Intrínseca. + Homografía
	Pares Imgs. Válidos	14/15	15/15
	Correspondencias	672/672=100.0%	718/720=99.72%
EV2ir	Error T medio (pix)	2.073	1.995
	Desv Est (pix)	1.140	1.161
IR2ev	Error T medio (pix)	1.958	1.907
	Desv Est (pix)	1.076	1.110
Ambas	MSE norm. Total	9.285E-06	8.998E-06
	Desv Est.	1.145E-05	1.174E-05

Tabla 4.3 Tabla con resultados de calibración extrínseca para configuración de cámaras IR FLIR E320 con tamaño de imagen 320x240 y la cámara webcam Genius iSlim 640x480. El error T medio hace referencia al error medio de transferencia, MSE es el error cuadrático medio (*Mean Squared Error*) normalizado

Webcam Genius iSlim EV:640x480; FLIR E320:320x340			
Proyección de Espectro	Parámetro	Homografía directa	C. Intrínseca. + Homografía
	Pares Imgs. Válidos	5/16	6/16
	Correspondencias	212/240 = 88.33%	270/288 = 93.75%
EV2ir	Error T medio (pix)	2.018	1.917
	Desv Est (pix)	1.897	1.703
IR2ev	Error T medio (pix)	2.197	2.083
	Desv Est (pix)	2.076	1.856
Ambas	MSE norm. Total	1.132E-05	9.791E-06
	Desv Est.	2.055E-05	1.768E-05

Tabla 4.4 Tabla con resultados de calibración extrínseca para configuración de cámaras IR FLIR E320 con tamaño de imagen 320x240 y la cámara Kodak 2048x1536. El error T medio hace referencia al error medio de transferencia, MSE es el error cuadrático medio (*Mean Squared Error*) normalizado

Kodak EV:2048x1536; FLIR E320: 320x240			
Proyección de Espectro	Parámetro	Homografía directa	C. Intrínseca. + Homografía
	Pares Imgs. Válidos	3/13	7/13
	Correspondencias	144/144=100.0%	333/336=99.11%
EV2ir	Error T medio (pix)	3.081	2.777
	Desv Est (pix)	1.187	1.461
IR2ev	Error T medio (pix)	6.360	5.773
	Desv Est (pix)	2.456	3.046
Ambas	MSE norm. Total	5.246E-06	4.492E-06
	Desv Est.	5.498E-06	5.699E-06

Se observa que las correspondencias son, como se esperaba, mayores al 50%, factor necesario para el buen funcionamiento del algoritmo LMS usado para el cálculo de la matriz de homografía. El mayor error medio de transferencia se obtiene para la tercera configuración, en el cálculo de homografía directa, con un valor de 6.360 píxeles en la proyección de infrarrojo a visible y de 3.081 píxeles en la proyección de visible a infrarrojo. Sin embargo, al comparar el error normalizado, el cual toma en cuenta el tamaño de las imágenes, se observa que estos valores son menores que los

correspondientes en las demás configuraciones. Siendo el peor caso, la segunda configuración con la cámara webcam Genius al tener un valor de error normalizado de $1.132\text{E-}05$ con desviación estándar de $2.055\text{E-}05$.

Al realizar una comparación, entre las dos metodologías empleadas: cálculo de homografía directa y cálculo de homografía con previa calibración intrínseca, de los valores del error medio de transferencia en píxeles y el error normalizado obtenidos, se infiere que para los tres arreglos de cámaras, es conveniente realizar y aplicar la calibración intrínseca a las imágenes en espectro visible antes de calcular la matriz de la homografía. Así para las tres configuraciones, el error de transferencia del espectro visible al térmico disminuye en 0.078, 0.101 y 0.304 píxeles respectivamente; y del espectro térmico al visible, disminuye en 0.051, 0.114 y 0.586 píxeles. El error normalizado para las proyecciones desde y hacia ambos espectros, también disminuye en las tres configuraciones así: $2.87\text{E-}07$, $1.53\text{E-}06$ y $7.54\text{E-}07$ unidades. Ello es debido a que la transformación proyectiva, como lo muestra la Tabla 2.4, preserva las líneas rectas, las cuales, debido a los fenómenos de distorsión de las cámaras, se ven alteradas, siendo la calibración intrínseca el proceso encargado de corregir esta alteración. Se concluye, entonces, por los resultados obtenidos que el sistema presentado funciona adecuadamente para configuraciones de cámaras de diferentes fabricantes, diferentes campos de visión y diferentes resoluciones. Puesto que sin importar la metodología empleada: cálculo de homografía directa o cálculo de homografía con previa calibración intrínseca, el error total del sistema será minúsculo. Es así que, para la primera metodología se obtiene un error de transferencia máximo de 6.360 píxeles con desviación estándar de 2.456, correspondiente al arreglo de cámaras que incluye la Kodak; y un error máximo normalizado de $1.132\text{E-}05$ con desviación estándar de $2.055\text{E-}05$ para la configuración con la cámara Genius. Para el segundo método, se obtiene un error de transferencia máximo de 5.773 píxeles con desviación estándar de 3.046 correspondiente a la configuración con la cámara Kodak; y un error máximo normalizado de $9.791\text{E-}06$ con desviación estándar de $1.768\text{E-}05$ para el arreglo con la cámara webcam Genius.

Se debe notar que los valores de la desviación estándar de los errores MSE para las configuraciones 1 y 3 indican que la dispersión de los datos es mayor al incluir el cálculo de la calibración intrínseca, sin embargo como se observa en la Tabla 4.5 al adicionar la desviación estándar al valor del error normalizado, se encuentra que el límite máximo del error es inferior o igual en el cálculo de homografía con calibración intrínseca que el cálculo directo de la homografía, corroborando la conveniencia de aplicar previamente los parámetros intrínsecos a las imágenes. El límite inferior en todos los casos tiene valores negativos, sin embargo por el origen del error normalizado, los valores negativos no tienen significado directo, solo dan un indicio de la manera como los datos pueden estar distribuidos.

Tabla 4.5 Tabla comparativa de las tres configuraciones de cámaras del error MSE normalizado con sus valores de desviaciones estándar

Cámara EV	Homografía directa			Calibración Intrínseca. + Homografía		
	MSEn - Desv Est	MSE norm. Total	MSEn + Desv Est	MSEn - Desv Est	MSE norm. Total	MSEn + Desv Est
Sharp	-2.166E-06	9.285E-06	2.074E-05	-2.747E-06	8.998E-06	2.074E-05
Genius	-9.231E-06	1.132E-05	3.186E-05	-7.891E-06	9.791E-06	2.747E-05
Kodak	-2.526E-07	5.246E-06	1.074E-05	-1.207E-06	4.492E-06	1.019E-05

Por otra parte, al analizar cualitativamente las fusiones, es decir visualmente, se observa que el sistema presenta muy buenos resultados. La Figura 4.4 presenta tres

ejemplos de fusión, uno correspondiente a cada configuración de cámaras. Para la primera configuración, Flir E320 con Sharp, se observa un escenario con un perro, Figura 4.4a, y su respectivo termograma, Figura 4.4c. La fusión térmica en la Figura 4.4b permite comprender en una sola imagen la información del espectro térmico y la del visible, identificando la esquina de la puerta y las marcas del suelo. En el escenario de la Figura 4.4d a la Figura 4.4f para las cámaras FlirE320 con Genius, se presenta una caja eléctrica. La Figura 4.4e presenta la fusión térmica en la cual se puede apreciar el cable que tiene la mayor temperatura. Observando únicamente la imagen térmica habría sido dispendioso identificar exactamente este cable, pero la fusión permite de manera sencilla llegar a su ubicación. El tercer escenario presenta un taladro para la configuración de cámaras Flir E320 con Kodak. El espectro visible (Figura 4.4d) permite ver su ubicación específica en el entorno, mientras el térmico (Figura 4.4e) indica que el taladro está en funcionamiento. La fusión (Figura 4.4f) con 40%IR permite identificar claramente las partes del taladro y relacionarlas directamente con su espectro térmico, así como se pueden identificar características del espectro visible como el tablero y el texto en él.



Figura 4.4 Ejemplos de fusión para tres configuraciones de cámaras: Configuración Flir E320 con Sharp: (a) Imagen perro. (b) Fusión térmica 50%IR (c) Termograma perro en paleta *Cool*. Configuración Flir E320 con webcam Genius: (d) Imagen de caja eléctrica. (e) Fusión térmica 50%IR (f) Termograma de caja eléctrica en paleta *Iron*. Configuración Flir E320 con Kodak: (g) Imagen de taladro. (h) Fusión térmica 40%IR. (i) Termograma de taladro en paleta *Iron*

La fusión presentada se basa en el cálculo de la homografía entre dos planos, lo que implica que su cálculo será óptimo para fusión de imágenes en profundidad similar a la utilizada para la captura del conjunto de imágenes de calibración. Ello, implicaría que la persona que realice la inspección térmica debería conocer la profundidad usada en la calibración, para tenerla en cuenta al momento de capturar los pares imágenes en los escenarios requeridos. Para evitar esto, se presenta la opción de realizar la fusión térmica en tiempo real, con combinación 50%IR-50%EV, permitiendo a la persona observar, durante la etapa de inspección térmica, la calidad de la fusión que obtendrá al final del proceso. Por tanto podrá corregir, de ser posible, su ubicación para una mejor captura del par imagen. En caso de no ser posible podrá hacer uso de la calibración manual.

La calibración manual es una herramienta que permite trabajar con cualquier tipo de par imágenes, es decir que no se limita a las imágenes del patrón de calibración, pero la selección de puntos que relacionan las imágenes la hará manualmente la persona. El diagrama de flujo para la calibración manual se presenta en la Figura 4.5 y se explica a continuación:

i. Preprocesamiento de las imágenes. Incluye ecualización del histograma para aumentar el contraste, un filtro pasa bajos para eliminación de ruido, y realce de bordes.

ii. Selección manual de pares de puntos. El usuario elegirá sobre las imágenes una cantidad de puntos, no menor a 4, correspondientes entre ellas. Se recomienda seleccionar esquinas sobre el objeto de interés, incluidas todas en un plano.

iii. Mejoramiento de ubicación de puntos seleccionados. Se basa en la etapa de mejoramiento ubicación en subpíxel descrita en la Figura 3.11c

iv. Calcular matriz de homografía.

En cualquier momento el usuario podrá abortar la ejecución del proceso de calibración manual.

La opción de calibración manual permite al usuario poder calcular la matriz de homografía sobre una estructura específica para realizar la fusión de imágenes, sin necesidad de recalibrar las cámaras usando el patrón de calibración. Aumentando, entonces, la versatilidad de la herramienta diseñada.

El método de fusión que se utiliza en la aplicación desarrollada es comparable con el utilizado por Ursine et al. (2012). En éste, los autores eliminan la diferencia de tamaño con el que cada cámara representa el mundo real, utilizando un patrón de calibración. Luego, valiéndose de la ubicación del mismo en ambas imágenes, las alinean y logran una fusión de espectros visible e infrarrojo. Analizando las transformaciones que sufren las imágenes hasta lograr ser alineadas, se puede decir que se utiliza una transformación rígida o Euclidiana. En este trabajo como se ha mencionado, se calcula la matriz de transformación proyectiva u homografía, lo que tiene en cuenta no sólo cualquier cambio de tamaño u orientación, sino que también alguna modificación en el paralelismo o los ángulos de las formas en las imágenes. Por lo tanto se logra una fusión más completa y que representa mejor los cambios de perspectiva de las cámaras.

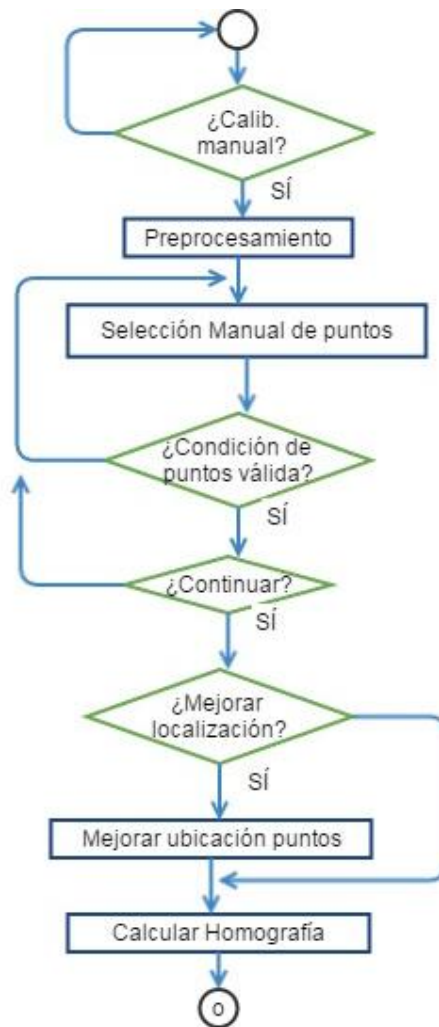


Figura 4.5 Diagrama de flujo para calibración manual

4.3 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

Un paso importante a realizar en la tarea de inspección termográfica es procesar las imágenes previamente a la generación de reportes. Esto con la finalidad de generar imágenes que realcen algunas características de las escenas de análisis y ayuden a identificar, de existir, los problemas.

La Figura 4.6 presenta los modos de visualización de las imágenes para ambos espectros. Las imágenes en espectro visible pueden ser vistas en el modelo de color RGB (Figura 4.6a) o en escala de grises (Figura 4.6b). Los termogramas se pueden apreciar en 6 paletas de colores: escala de grises (Figura 4.6c), *rainbow* (Figura 4.6d), *iron* (Figura 4.6e), *cool* (Figura 4.6f) y *hot* (Figura 4.6g). Además se puede invertir la paleta de colores tanto para las fotografías como para los termogramas. En la Figura 4.6h se presenta la inversión de color para la paleta *iron*.

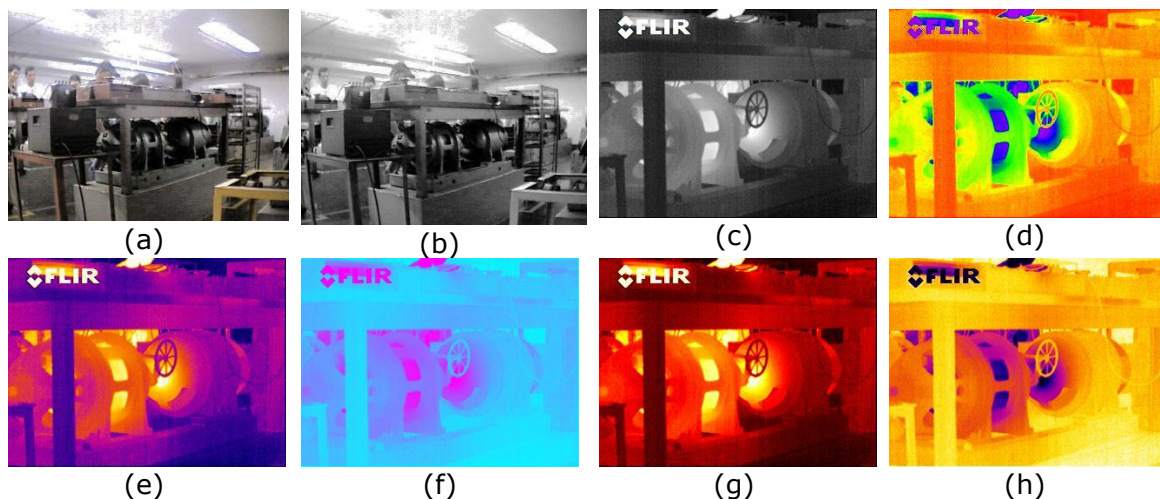
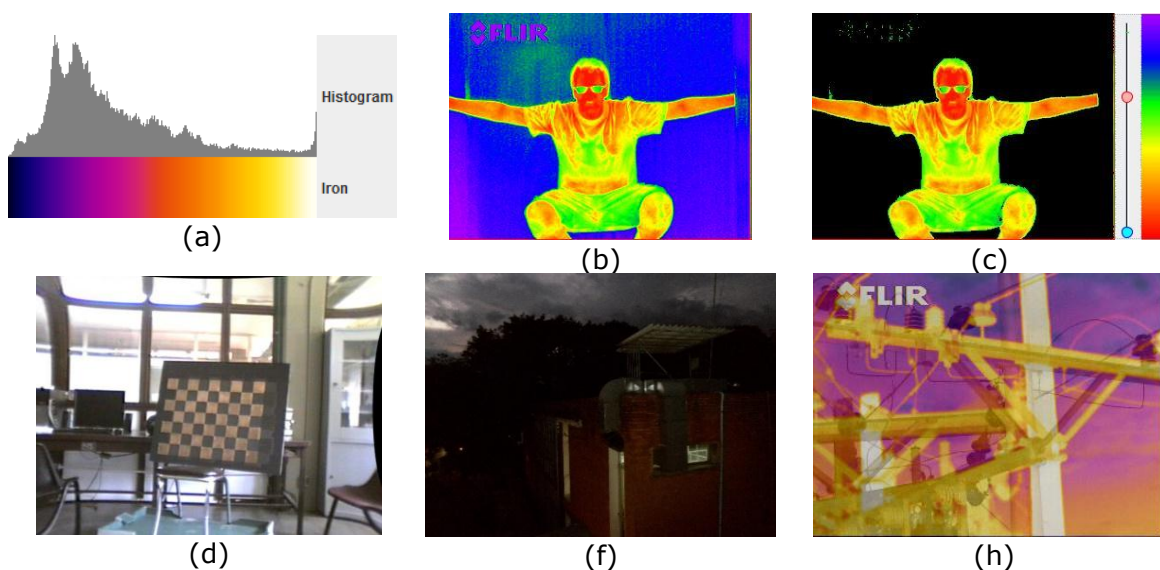


Figura 4.6 Paletas de colores: (a) EV Color RGB. (b) EV gris (c) IR gris (d) IR *Rainbow* (e) IR *Iron* (f) IR *Cool* (g) IR *Hot* (h) IR *Iron* con inversión de color

En la Figura 4.7 se presentan cinco herramientas para el procesamiento de las imágenes. La Figura 4.7a presenta la opción de visualización del histograma del termograma. La Figura 4.7b y Figura 4.7c presenta el termograma de una persona y el termograma con umbralización por nivel de color, la cual tiene una relación lineal con los valores de temperatura. La Figura 4.7d y Figura 4.7e presentan la fotografía del patrón de calibración original y su detección de bordes. La Figura 4.7f y Figura 4.7g muestra la opción de ecualización del histograma, la cual permite aumentar el contraste de la imagen. Para esta ecualización se transforma la imagen del espacio de color RGB al espacio HSV, se ecualiza el plano V, ya que este contiene la información de iluminación de la escena, y se regresa nuevamente al espacio RGB. Finalmente, la Figura 4.7h presenta la fusión térmica de un poste de líneas de alta tensión, la cual ha quedado desplazada y su correspondiente corrección a través de la opción manual de desplazamiento de imágenes en la Figura 4.7i.



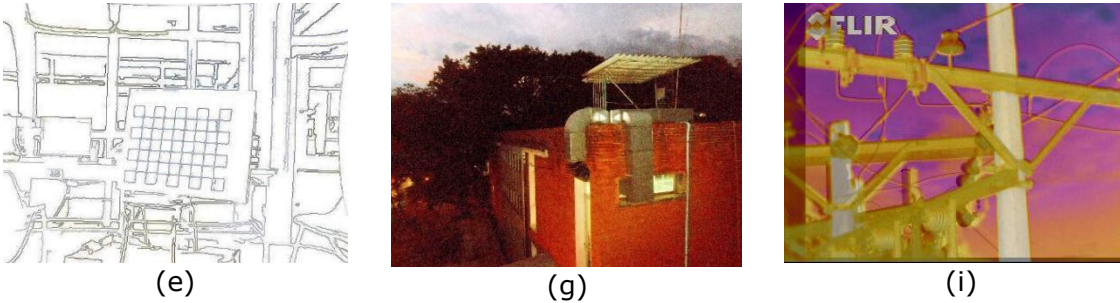


Figura 4.7 Herramientas para procesamiento de imágenes del software *InVi Fusion*. (a) Histograma de termograma en paleta *Iron*. (b) Termograma con persona en paleta *Rainbow*. (c) Termograma de persona con filtro de rango por color. (d) Imagen patrón de calibración. (e) Bordes de patrón de calibración. (f) Imagen original EV de edificio. (g) Imagen EV de edificio con ecualización del histograma. (h) Fusión térmica original de poste de líneas de alta tensión. (i) Fusión térmica de poste de líneas de alta tensión corregida por desplazamiento manual

En la Figura 4.8 se presenta dos ejemplos de fusión luego de aplicar algunas herramientas. La Figura 4.8a a la Figura 4.8c presenta el escenario con personas, en el espectro visible aparentan estar ocultas, en el espectro térmico las personas son fácilmente identificables, la Figura 4.8b presenta la fusión de imagen en imagen de una sección recortada del termograma. La Figura 4.8d muestra los bordes de un escenario de un aire acondicionado, la Figura 4.8f su respectivo termograma y Figura 4.8e la fusión térmica de estas imágenes.

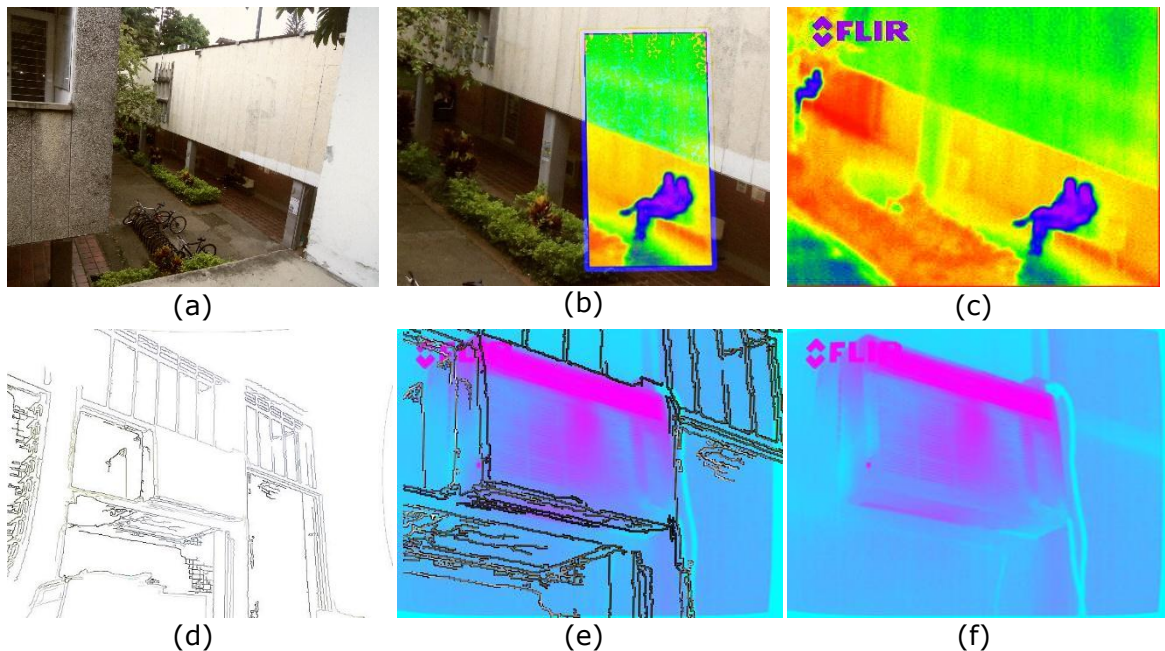


Figura 4.8 Ejemplos de fusión de imágenes realizada con *InVi Fusion*. (a) Escenario con personas ocultas en EV. (b) Fusión imagen en imagen con selección de área. (c) Escena IR con personas en paleta *Rainbow*. (d) Bordes de escena con aire acondicionado. (e) Fusión térmica de escena con aire acondicionado. (f) Escena IR de aire acondicionado en paleta *Cool*.

Los tres métodos de fusión de imágenes presentados en este proyecto han sido explicados en la sección 3.3.3. Se resalta que: la fusión a través de imagen en imagen permite detallar completamente la información térmica con la visualización del contexto visible; la fusión térmica permite en una sola imagen visualizar detalles del espectro térmico como del visible, siendo posible poder asociar el comportamiento de la temperatura a los objetos e identificar rápidamente elementos puntuales como texto,

marquillas en los equipos, bordes delineados de figuras como puertas, motores y pisos, entre otros; y el método de fusión con umbralización de color permite limitar los colores del espectro térmico, los cuales tienen una relación directa y lineal con los valores de temperatura, ayudando a resaltar zonas que cumplen un criterio de rango de temperaturas.

Moghadam et al. (2014) presentan también los métodos de fusión térmica y umbralización de color, con la diferencia que para la umbralización de color ellos solo toman en cuenta un límite inferior y no un rango. Además ellos presentan reconstrucción en 3D de los objetos analizados durante la inspección termográfica.

4.4 PROTOCOLO DE VALIDACIÓN Y REPORTE DE INSPECCIÓN TERMOCRÁFICA

Para cumplir con el objetivo de ejecución de un protocolo de validación que considere una aplicación de inspección termográfica, se hizo una búsqueda de los documentos que podría utilizar una empresa de inspección térmica para certificar sus procesos en calidad. Dentro de estos documentos se encuentran los estándares del organismo de normalización "ASTM International". Debido a la facilidad para encontrar equipamiento eléctrico y mecánico en los edificios de la Escuela de Ingeniería Eléctrica y Electrónica de la Universidad del Valle, se eligió la guía que estandariza este tipo de inspección (ASTM International, 2014).

En la "Guía Estándar para el Examen de Equipamiento Eléctrico y Mecánico con Termografía Infrarroja" (*Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography*) se definen entre otros, dos puntos importantes. Estos son un procedimiento para realizar una inspección térmica y una serie de características que debe tener un reporte de inspección. A continuación se escribe el protocolo que se estableció para realizar las capturas de inspección térmica que permitieron validar la herramienta desarrollada. Este protocolo como cabe suponer, se basa en la guía estándar mencionada y adhiere una serie de pasos necesarios para una correcta calibración. Posteriormente se hace una descripción del reporte generado por la aplicación *InVi Fusion* y las características que se adicionaron siguiendo el estándar.

4.4.1 PROTOCOLO DE INSPECCIÓN

En la Guía Estándar se enumeran una serie de responsabilidades de un usuario final (la persona que solicita la inspección) y un termógrafo al analizar sistemas eléctricos y mecánicos. Debido a que el objetivo de este trabajo no es realizar una inspección certificada, sino un procedimiento que emule las condiciones de una inspección térmica; se han definido una serie de responsabilidades para dos actores basadas en las descritas en la Guía Estándar, que toman los pasos más relevantes de dicho procedimiento.

A continuación se cita lo que dice la "Guía Estándar para el Examen de Equipamiento Eléctrico y Mecánico con Termografía Infrarroja" (2014) al respecto del propósito de una inspección:

El propósito final de una inspección infrarroja es identificar y documentar excepciones en los sistemas eléctricos o mecánicos del usuario final.

En equipos eléctricos, las excepciones calientes son usualmente creadas por un incremento en la resistencia causada por conexiones flojas o deterioradas, cortos circuitos, sobrecargas, desbalance de cargas, componentes no coincidentes o mal instalados. Las excepciones frías son usualmente causadas por fallas en los componentes.

En equipos mecánicos, las excepciones calientes se crean usualmente por la fricción causada por lubricación deficiente, desalineación, componentes gastados o anomalías en la carga mecánica. Las excepciones frías son usualmente causadas por fallas en los componentes

Las excepciones en sistemas de aislamiento son usualmente causadas por materiales faltantes o deteriorados, instalación inadecuada o cantidad insuficiente de material.

Teniendo en cuenta este propósito, se define el protocolo de inspección así:

1. Previamente a la inspección se debe realizar un número de mínimo 10 capturas a un patrón de calibración (detectable en ambos espectros) con un arreglo de cámaras térmica y visible.
2. El arreglo de cámaras no debe ser modificado en ningún momento después de haber realizado las capturas de calibración y hasta que se haya finalizado la inspección.
3. Durante la inspección debe haber un asistente con conocimientos de la operación e historia del equipo a ser examinado y una persona encargada de realizar las capturas o técnico en termografía.
4. Las dos personas encargadas de la inspección evaluarán el lugar a ser examinado definiendo una ruta lógica, eficiente y segura a través de la instalación.
5. El asistente se encargará de preparar el equipo a ser examinado permitiendo que se produzcan patrones térmicos estables antes de cada captura.
6. El técnico en termografía documentará de cualquier excepción encontrada en un análisis cualitativo, lo siguiente:
 - a. La hora en la que la excepción fue documentada.
 - b. Copias de los termogramas y las correspondientes imágenes de espectro visible (En este caso puede ser una fusión de los dos espectros).
 - c. El campo de visión o multiplicador de magnificación del lente del sistema de imagen infrarrojo, y cualquier configuración de imágenes que puedan afectar la precisión, confiabilidad o repetibilidad de los datos de inspección.
 - d. Notación de cualquier medio de atenuación, como ventanas, filtros y atmósferas u ópticas externas.
 - e. Cualquier otra información o condición especial que pueda afectar los resultados, repetibilidad o interpretación de la excepción.
7. El técnico en termografía preparará un reporte que contenga además de la información descrita en el punto 6, los numerales descritos en la subsección 4.4.2 (Reporte de Inspección Termográfica). Para el usuario final.

4.4.2 REPORTE DE INSPECCIÓN TERMOGRÁFICA

Para el Reporte se definieron los siguientes ítems siguiendo la Guía Estándar (ASTM International, 2014).

1. Los datos de contacto del técnico que realizó la inspección
2. El nombre y dirección del usuario final (empresa o persona que haya solicitado

la inspección).

3. El fabricante, modelo y número serial del sistema infrarrojo utilizado.
4. Las fechas de inspección y del día en el que se preparó el reporte.
5. Los ítems mencionados en el punto sexto del protocolo de inspección.

En la Figura 4.9 se expone la imagen de un reporte de inspección generado por *InVi Fusion* con los elementos más importantes enumerados en esta sección.

Reporte de Inspección Térmica de Laboratorio de Máquinas Eléctricas					
Empresa	S Termografía Cll 22 # 2 - 23 Buena Vista	Cliente	Compañía ABC Cra 4 # 12 - 75 La Jungla		
Examinador	Guillermo Herschel				
Instrumento	FLIR E320	No. Serie:	24301907	Objetivo:	27.4 mm
Pedido	Realizar una inspección térmica cualitativa en la ubicación del Laboratorio Eléctrico				
					
Datos de imagen:	Fecha:	15/11/2014	Grado de emisividad:	0.85	
	Hora:	10:43:14 a.m.	Temp. refl. [°C]:	-	
	Archivo:	vs_02.12-- 21.26.44.jpg			
Se debe continuar con el monitoreo de la tendencia de temperatura para buscar si existe cualquier anomalía.					
Conclusión:	En general, la instalación inspeccionada que se incorpora a este reporte se comenta en Condiciones Normales.				
02/12/2014, _____ Guillermo Herschel					

Figura 4.9 Ejemplo de Reporte Generado por la Aplicación *InVi Fusion*.

4.5 HERRAMIENTA DE SOFTWARE

En la Tabla 4.6 se hace una comparación entre las aplicaciones de inspección termográfica más relevantes, vistas en el capítulo 2 y la aplicación *InVi Fusion* desarrollada en este trabajo. Como se puede ver, se comparan las aplicaciones en cuanto a las funciones que aportan a la fácil generación de un reporte de inspección térmica comprensible y en el que sea fácil localizar una posible excepción térmica. Si bien las aplicaciones *software* de empresas como FLIR, Fluke o Testo, ofrecen una gran variedad de herramientas para producir reportes, no son tan versátiles en lo relacionado con la libertad del usuario para elegir entre cualquier cámara. Y son precisamente estas características en las que se centra la Tabla 4.6. Se incluye también el software *Spectra* desarrollado por Moghadam et al.(2014) ya que este, a pesar de no ofrecer la opción

de generar un reporte de inspección, permite generar reconstrucción en 3D de las escenas analizadas, lo cual sobresale en comparación a la visualización en 2D de los demás softwares.

Actualmente la termografía apunta cada vez más a ofrecer sistemas que integren inmediatamente las características de los espectros infrarrojo y térmico en un solo dispositivo. Sin embargo, la adquisición de un sistema de imagen infrarroja requiere de una inversión considerable, y los usuarios que ya tienen una cámara térmica que no ofrece estas ventajas pueden hacer uso de una herramienta como la propuesta en este proyecto, que encuentra fácilmente la relación geométrica entre dos capturas y realiza una fusión satisfactoria sin verse restringida por el diseño de las cámaras. La Figura 4.10 presenta la pestaña de trabajo para calibración de cámaras y la Figura 4.11 presenta la pestaña para procesamiento de imágenes en la interfaz de usuario.

Tabla 4.6 Comparación de Aplicaciones de Inspección Termográfica.

Sistema para fusión	FLIR Tools. FLIR Systems	Smart View. Fluke	Spectra. CSIRO ICT	Testo IrSoft. Testo AG	InVi Fusion. Universidad del Valle
Calibración Intrínseca	✗	✗	✗	✗	✓
Calibración Extrínseca	✗	✗	✗	✗	✓
Gráficos de error de calibración	✗	✗	✗	✗	✓
Funciones no limitadas a formato de imágenes específico	✗	✗	✓	✗	✓
Funciones no limitadas a <i>hardware</i> específico	✗	✗	✓	✓	✓
Homografía Manual	✗	✗	✗	✓	✓
Fusión de imágenes	✓	✓	✓	✓	✓
Fusión de Vídeo en tiempo real	✗	✗	✓	✗	✓
Fusión en 3D	✗	✗	✓	✗	✗
Herramientas de Procesamiento de Imágenes	✓	✓	✓	✓	✓
Procesamiento de valores de temperatura	✓	✓	✓	✓	✗
Generación de Reporte de Inspección	✓	✓	✗	✓	✓

Vale la pena mencionar que con el ánimo de lograr libertad en cuanto a sistemas operativos, la aplicación *InVi Fusion* es compatible con los sistemas Windows 7 y Ubuntu 12.04, en los que ha sido probada y ha mostrado resultados positivos, tanto para versiones de Java de 32 como de 64 bits.

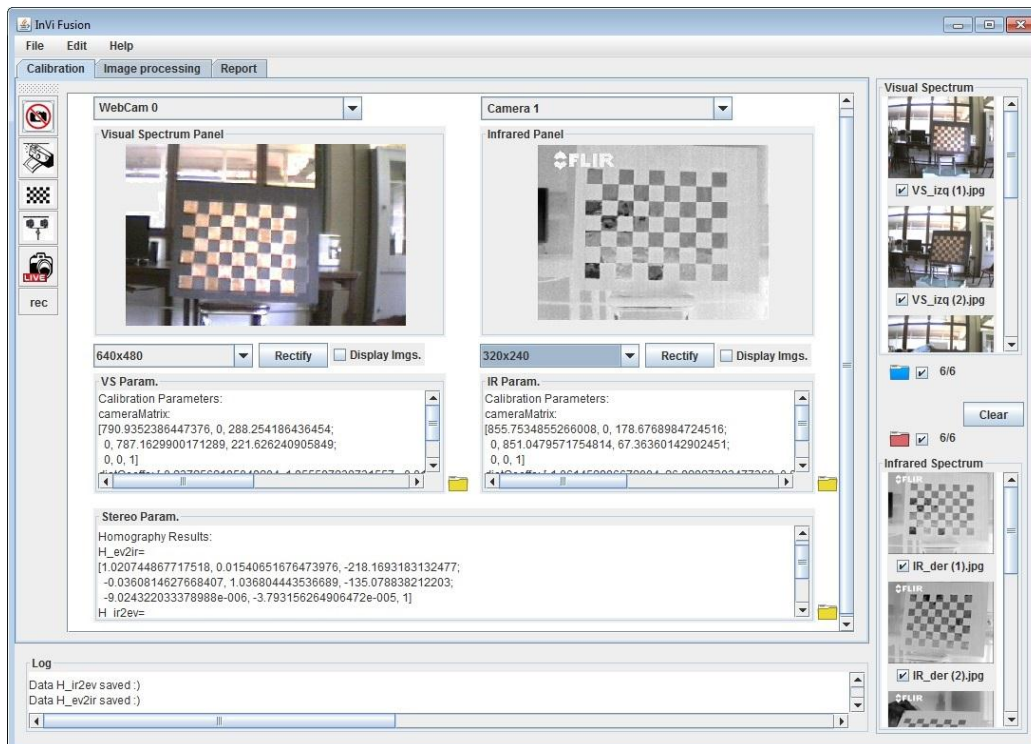


Figura 4.10 Interfaz de Usuario *InVi Fusion*. Pestaña de trabajo para calibración de cámaras

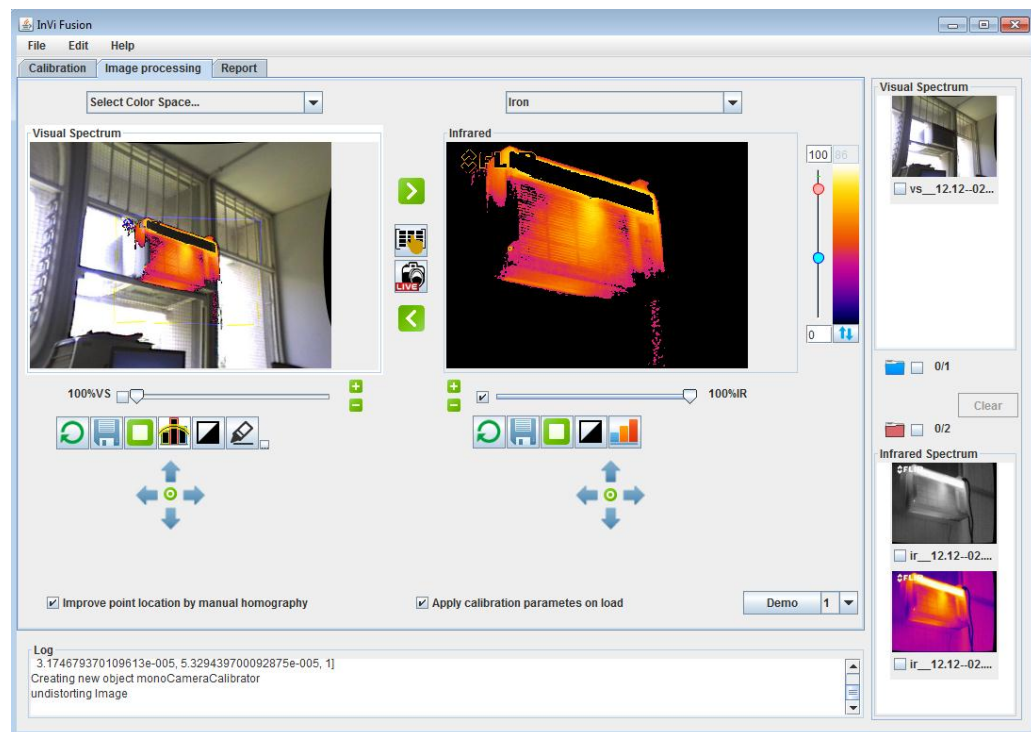


Figura 4.11 Interfaz de usuario *InVi Fusion*. Pestaña de trabajo para procesamiento de imágenes

5 CONCLUSIONES

Se presentó una metodología para calibración de cámaras de diferente espectro, que permite fusionar las imágenes de los espectros térmico y visible con libertad en la elección de cámaras ya sea por fabricante como por las características de campo de visión o resolución espacial. Los resultados en forma de imágenes o reporte permiten afirmar que el método propuesto genera muy buenos resultados en lo que respecta al análisis cualitativo de termogramas.

Se diseñó una interfaz de usuario que condensa los procedimientos de calibración intrínseca y extrínseca, además de ofrecer herramientas para el procesamiento de las imágenes térmicas y visibles, y la posibilidad de generar reportes para tareas de inspección termográfica. Presentando gran versatilidad en comparación con aplicaciones comerciales como FLIR Tools de FLIR Systems o Smart View de Fluke, ya que estas últimas, no solo no son compatibles con cámaras de distintos fabricantes sino que tampoco presentan al usuario la posibilidad de realizar la calibración de las cámaras.

Se realizó una revisión de los trabajos académicos más importantes en el área de la calibración de cámaras térmicas y de espectro visible, de los que se extrajo la información necesaria para resolver el problema. De acuerdo a estos fue posible entender que el método de calibración estéreo que permite determinar la correspondencia entre imágenes, y encontrar un mapa de disparidad que relaciona los puntos correspondientes en cada imagen, no es aplicable a sistemas híbridos debido a las diferencias de resolución, campo de visión y tamaño de imagen. Dicha afirmación fue comprobada también en la práctica y condujo a optar por una forma diferente de encontrar la transformación espacial de una cámara a otra, tomando como alternativa la transformación proyectiva u homografía.

De acuerdo a la revisión de trabajos académicos realizada, se puede afirmar que la aproximación que se hace en este trabajo para obtener una transformación de carácter general entre una cámara de espectro visible y una infrarroja asistida por un *software* de inspección térmica, es la primera de su tipo realizada en Colombia y Latinoamérica.

Analizando las técnicas de fusión de imágenes revisadas en el estado del arte, se concluyó que la transformación proyectiva a través de la homografía entre dos planos, es la metodología que ofrece mejores resultados para la fusión de imágenes de diferentes espectros. Sobresaliendo ante métodos como el de *Pixel Alignment* u Homografía Infinita, entre otros, y consiguiendo el menor error, correspondiente al promedio de todas las distancias euclidianas entre la proyección de los puntos desde una imagen y los valores esperados en la segunda, con valor de 3,70 píxeles ante 3,95 y 3,81 píxeles, respectivamente.

Se concluyó que el proceso de búsqueda de patrones, descripción y *matching*, haciendo uso de las técnicas SIFT, SURF, FREAK, FLANN y Fuerza Bruta no es apropiado para el escenario que se presenta: campos de visión superpuestos con información de origen diferente, espectro térmico y visible; ya que como se demostró visualmente, la correspondencia exitosa de puntos en un par de imágenes es muy baja. Estos resultados se deben a que los descriptores de características sobre imágenes de diferente espectro difícilmente pueden corresponder, pues su adquisición se fundamenta en las intensidades de las imágenes, las cuales varían mucho de la fotografía al termograma. Permitiendo corroborar que la elección de esquinas del patrón de calibración como puntos característicos para el cálculo de la homografía ha sido apropiada.

Se validó el método propuesto para la fusión de imágenes con tres configuraciones de cámaras, para todos los casos las imágenes de la cámara térmica Flir E320 tenían un tamaño de 320x240 píxeles. Las cámaras de espectro visible se configuraron así:

Sharp con tamaño de imagen de 640x480 píxeles, webcam Genius con tamaño de 640x480 y la cámara Kodak con tamaño de 2048x1536. El desempeño logrado fue alto al obtener para el cálculo de la homografía, con previa calibración intrínseca, un error de transferencia simétrico máximo de 5.773 píxeles para la configuración con la cámara Kodak, y un error máximo normalizado de $9.8E-06$ para la configuración con cámara webcam Genius.

Se comprobó en la práctica que se obtiene una mejora en los resultados al rectificar las imágenes utilizando los resultados de la calibración intrínseca previamente al cálculo de la matriz de homografía, ya que esta matriz al ser calculada y comparada con imágenes sin calibración intrínseca, presentó mejoras en los resultados obtenidos al aplicar los parámetros intrínsecos. Así para los tres arreglos de cámaras, el error de transferencia del espectro visible al térmico disminuye en 0.078, 0.101 y 0.304 píxeles respectivamente; y del espectro térmico al visible, disminuye en 0.051, 0.114 y 0.586 píxeles. El error normalizado para las proyecciones desde y hacia ambos espectros, también disminuye en las tres configuraciones así: $2.87E-07$, $1.53E-06$ y $7.54E-07$ unidades

Se obtuvo un proceso ágil para la calibración extrínseca de cámaras de diferente espectro, pues el usuario solo debe intervenir en el proceso de captura de las imágenes del patrón de calibración. Adicionalmente, se presentó la opción de realizar la fusión térmica en tiempo real, con combinación 50%IR-50%EV, ofreciendo al usuario la posibilidad de observar, durante la inspección térmica, la calidad de la fusión que obtendrá al final del proceso. Ello debido a que la fusión al fundamentarse en el cálculo de la homografía entre dos planos será óptima para capturas de imágenes con profundidad similar a la empleada en la captura del conjunto de imágenes de calibración, es decir que la persona que realice la inspección térmica debería conocer dicha profundidad, y tenerla en cuenta al momento de capturar los pares de imágenes en los escenarios requeridos. Por lo tanto el usuario podrá corregir, de ser posible, su ubicación para una mejor captura del par imagen. En caso de no ser posible podrá hacer uso de la herramienta de calibración manual o la corrección de fusión por desplazamiento manual.

Se presentaron tres métodos para fusión de imágenes: imagen en imagen, fusión térmica y umbralización por color; los cuales partiendo de una fotografía y un termograma, permiten generar una tercera imagen, la cual presenta la información térmica de la escena junto con características del espectro visible, permitiendo realzar las figuras, los bordes, las marquillas de los objetos o el texto, para tener un entendimiento más intuitivo del objeto u objetos a analizar.

Se estableció un protocolo de validación de inspección termográfica teniendo en cuenta la Guía Estándar para inspección térmica en instalaciones eléctricas o mecánicas, publicada por la organización de normalización ASTM International (2014). Siguiendo este protocolo se definió un reporte de inspección y se realizó la captura de un conjunto de imágenes, generando reportes de ejemplo, que cumplen con las características definidas por el protocolo. Esto permitió validar la aplicación como un *software* de inspección térmica.

De acuerdo al *software* y a los trabajos académicos revisados, es posible afirmar que no existe hasta ahora una aplicación de inspección térmica que ofrezca la función para realizar la calibración extrínseca entre dos cámaras de diferente espectro y fabricante. Todas estas funciones se pueden encontrar por separado y sin una interfaz de usuario que permita un fácil acceso a las herramientas que ofrecen. Como ocurre con el *toolbox* para calibración de Bouguet (2013) y las aplicaciones de inspección reseñadas.

5.1 TRABAJOS FUTUROS

Se propone expandir la metodología presentada, calculando la homografía entre planos para las cámaras EV e IR a diferentes profundidades, y desarrollar un método que permita al programa elegir automáticamente la matriz más apropiada para la fusión, según el objeto y la escena a analizar. Para ello, se podría hacer uso de hardware adicional como sensores de profundidad.

Buscar nuevas maneras o mejorar las existentes para detección y correspondencia de características en ambos espectro. Bilodeau et al. (2011) presentan como alternativa, extraer características de los bordes y del esqueleto de la silueta de la región de interés. Además proponen incluir un refinamiento iterativo adicionando datos métricos como la superposición de las siluetas de las regiones de interés.

El presente proyecto se centra en imágenes en dos dimensiones, sin embargo, la reconstrucción en tres dimensiones es un proceso que en los últimos años ha tomado fuerza al permitir representar la información capturada de una manera más próxima a la realidad. Se plantea como proyecto generar reconstrucción en 3D, de los objetos de interés, incluyendo la información térmica. Moghadam et al. (2014) hacen uso de una cámara estereoscópica de espectro visible para calcular la profundidad del objeto de interés y permitir así obtener una reconstrucción en 3D con información térmica y visible. Por su parte, Prakash et al. (2006) presentan una técnica para generar un mapa de temperaturas en 3D haciendo uso de un arreglo de dos cámaras termográficas.

Se propone mejorar la precisión de la fusión de imágenes adicionando una etapa de post-procesamiento adicional, luego de aplicar la proyección de imágenes. El hecho de trabajar sobre las imágenes proyectadas permite tener un área para búsqueda y correspondencia más pequeña y precisa para cada característica, las cuales serán específicas a cada escena, permitiendo disminuir las distancias entre los puntos proyectados y su ubicación esperada.

Ampliar las técnicas de visualización en la fusión de imágenes, que favorezcan a una identificación más intuitiva de los objetos presentes en una escena. Moghadam et al. (2014) presentan técnicas como Mapeo de la Intensidad y el Matiz, para resaltar la textura e información escrita como etiquetas, o la Umbralización del Histograma Térmico para resaltar las áreas más relevantes.

Adicionar un módulo que permita obtener la información radiométrica de las cámaras térmicas para poder trabajar directamente con los valores de temperatura.

El protocolo para realizar tareas de inspección termográfica incluye el trazo de una ruta definida en el escenario a analizar. Ruta, que al poder ser repetida tiempo después, puede permitir observar la evolución de los cambios de temperatura, anticipando algún posible fallo. Se propone el desarrollo de un sistema que permita evidenciar los cambios de temperatura en el tiempo, de algún objeto de interés, alertando al haber un cambio considerable. Vidas & Moghadam (2013) enfatizan, en que la detección de cambios en 2D no es ideal debido a la dificultad de obtener dos capturas de la misma escena desde el mismo punto de vista, causando que una comparación cuantitativa, entre imágenes, con alta precisión no pueda ser realizada. Presentan, entonces, una metodología para detectar cambios temporales de temperatura basados en la generación y comparación de modelos en 3D.

Ofrecerle al usuario de la aplicación una herramienta que permita tener más libertad en la elaboración de reportes, como un editor de texto, en donde se añadan diferentes tipos de plantilla de reporte que cumplan con las características definidas en el protocolo pero que puedan ser modificadas. Y en un trabajo que se enfoque más aún en el reporte, permitir al usuario modificar las imágenes con las herramientas de análisis,

directamente sobre el editor de texto.

Debido al crecimiento de la población y al cambio climático, se ha hecho necesario aumentar los métodos para mejorar la eficiencia energética, siendo la auditoría de energía fuertemente requerida. Por otra parte, el desarrollo de las comunicaciones y con ellas la influencia de los dispositivos móviles en la vidas de los seres humanos, conlleva a que la portabilidad de la información sea un aspecto muy importante. Por eso se propone unificar este sistema con aplicaciones móviles que ayude a simplificar el uso del sistema. Así, por ejemplo, para la fusión en tiempo real no se requeriría de un computador, sino que un teléfono móvil sería suficiente. Además, las herramientas de software usadas en este proyecto, permiten a este programa ser adaptado a una aplicación móvil puesto que, OpenCV ofrece un API para Android y Java a es el lenguaje de programación más usado para programar aplicaciones de Android.

6 REFERENCIAS

- Arquitectura, S. (2013). Termografía Infrarroja aplicada a la edificación. Retrieved from <https://somarquitectura.wordpress.com/2013/09/>
- ASTM International, A. (2010). Standard Practice for Location of Wet Insulation in Roofing Systems Using. ASTM International. doi:C1153-10
- ASTM International, A. (2011). Standard Practice for Thermographic Inspection of Insulation Installations in Envelope Cavities of Frame Buildings. West Conshohocken, PA United States: ASTM International. doi:C1060-11A.1
- ASTM International, A. (2014). Standard Guide for Examining Electrical and Mechanical Equipment with Infrared Thermography. West Conshohocken, PA United States: ASTM International. doi:E1934 – 99a
- Bayen, A. M. (2013). Lecture 10 : Descent Methods. Retrieved October 10, 2013, from http://bayen.eecs.berkeley.edu/bayen/?q=webfm_send/246
- Bican, J., Janeba, D., Tábořská, K., & Veselý, J. (2002). Image overlay using alpha-blending technique. *Nuclear Medicine Review*, 5(1), 53–54. Retrieved from <http://czasopisma.viamedica.pl/nmr/article/viewFile/15443/12260>
- Bilodeau, G., St-Onge, P.-L., Garnier, R., Box, P. O., & Centre-ville, S. (2011). Silhouette-based features for visible-infrared registration. In *CVPR 2011 WORKSHOPS* (pp. 68–73). Québec: IEEE. Retrieved from <http://ieeexplore.ieee.org/articleDetails.jsp?arnumber=5981676>
- Bouguet, J.-Y. (2013). Camera Calibration Toolbox for Matlab. Retrieved February 10, 2014, from http://www.vision.caltech.edu/bouguetj/calib_doc/index.html
- Cardona, S. D., & Ospina, R. E. (2014a). Análisis de Requerimientos - InVi Fusion.
- Cardona, S. D., & Ospina, R. E. (2014b). Etapa de Diseño - InVi Fusion.
- Cardona, S. D., & Ospina, R. E. (2014c). Manual de Usuario - InVi Fusion.
- Cardona, S. D., & Ospina, R. E. (2014d). Pruebas Funcionales - InVi Fusion.
- Christiansen, E. / W. G., Pavlenko, A. / I., & Kamaev, A. I. (2013). OpenCV now supports desktop java. Retrieved November 18, 2014, from <http://opencv.org/opencv-java-api.html>
- Cisa, A. (2002). Algoritmo de Levenberg-Mardquardt. Retrieved from <http://iie.fing.edu.uy/investigacion/grupos/gti/cursos/egvc/material/algoritmo-lm.pdf>
- Cyganek, B., & Siebert, J. P. (2011). *An Introduction to 3D Computer Vision Techniques and Algorithms* (p. 504). John Wiley & Sons. Retrieved from <http://books.google.com/books?id=4leU0ZBkHngC&pgis=1>

- FLIR Systems. (2006). ThermaCAM™ E320 User 's manual. FLIR Systems.
doi:1558407
- FLIR Systems. (2014a). FLIR ThermoVision SDK. Retrieved November 26, 2014, from <http://www.flir.com/instruments/display/?id=60091>
- FLIR Systems. (2014b). Termografías para Ciencia / I+D. Retrieved August 10, 2014, from http://www.flirmedia.com/MMC/THG/Brochures/T820486/T820486_ES.pdf
- Gratton, S., Lawless, A. S., & Nichols, N. K. (2004). Approximate Gauss-Newton methods for nonlinear least squares problems. Retrieved from <http://www.henley.ac.uk/web/FILES/math/09-04.pdf>
- Heikkila, J., & Silven, O. (1997). A four-step camera calibration procedure with implicit image correction. *Proceedings of IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition*, 1–7.
- Hernández, P., & Gómez, A. (2013). *Diseño e implementacion de un sistema multimodal para la clasificacion de vehículos terrestres* (p. 139). Cali.
- Hoff, W. (2014). Computer Vision-Lectures. Retrieved September 01, 2014, from <http://inside.mines.edu/~whoff/courses/EENG512/lectures/>
- Kaj Madsen, Hans Bruun, O. T. (2004). Methods for non-linear least squares problems. Retrieved from <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.73.3864>
- Kruchten, P. (2004). *The Rational Unified Process: An Introduction* (p. 310). Addison-Wesley Professional. Retrieved from http://books.google.ca/books/about/The_Rational_Unified_Process.html?id=RYCMx6o47pMC&pgis=1
- LangPop. (2013). Programming Language Popularity.
- Matlab. (2014). Documentation for showReprojectionErrors. Retrieved November 11, 2014, from <http://www.mathworks.com/help/vision/ref/showreprojectionerrors.html>
- Minkina, W., & Dudzik, S. (2009). *Infrared Thermography. Errors and Uncertainties* (p. 210).
- Moghadam, P., & Vidas, S. (2014). HeatWave: the next generation of thermography devices. In F. P. Colbert & S.-J. (Tony) Hsieh (Eds.), (p. 91050F). doi:10.1117/12.2053950
- Moghadam, P., Vidas, S., Lam, O., & Pullenvale, Q. (2014). Spectra: 3D Multispectral Fusion and Visualization Toolkit. *Peymanmoghadam.com*, 10. Retrieved from https://www.researchgate.net/publication/268741438_Spectra_3D_Multispectral_Fusion_and_Visualization_Toolkit

- OpenCV. (2014a). Open Source Computer Vision. Retrieved October 01, 2014, from <http://opencv.org/>
- OpenCV. (2014b). OpenCV documentation. Retrieved November 21, 2014, from <http://docs.opencv.org/>
- Polikovskiy, S., Kameda, Y., & Ohta, Y. (2011). Infrared and Visible Spectrum Camera Calibration. *Kameda-Lab.org*, 1. Retrieved from http://www.kameda-lab.org/research/publication/2011/201103_IEICE/201103IEICE-d_12_001-PolikovskyS.pdf
- Prakash, S., Lee, P. Y., & Caelli, T. (2006). 3D Mapping of Surface Temperature Using Thermal Stereo. *2006 9th International Conference on Control, Automation, Robotics and Vision*, 1–4. doi:10.1109/ICARCV.2006.345342
- Raytek. (2014). ThermoView Pi20. Retrieved November 26, 2014, from <http://www.raytek.com/Raytek/en-r0/ProductsAndAccessories/ProcessImagers/ProcessImagersSeries/ThermoViewPi20/Overview.htm?trck=pi20>
- Schmidt, R. (2007). Ventajas de la tecnología IR-Fusion TM. Retrieved from http://www.adler-instrumentos.es/imagenes_web/notas_aplicacion/nota de aplicaci3n IR fusion.pdf
- Sergio, M. (Fundaci3n de la E. de la C. de M. (2011). *Guía de la termografía infrarroja. Aplicaciones en ahorro y eficiencia energética*.
- Siebert, J. P., & Cyganek, B. (2011). *An Introduction to 3D Computer Vision Techniques and Algorithms* (p. 504). John Wiley & Sons. Retrieved from <http://books.google.com/books?id=4leU0ZBkHngC&pgis=1>
- Sinais. (2013). Termografía infrarroja. Retrieved November 10, 2014, from <http://www.sinais.es/Recursos/Curso-vibraciones/intro/termografia.html>
- St-Laurent, L., Prévost, D., & Maldague, X. (2010). Fast and accurate calibration-based thermal/colour sensors registration. *Proceedings of 10th Quantitative InfraRed ...*, (section 1), 1–8. Retrieved from <http://scholar.google.com/scholar?hl=en&btnG=Search&q=intitle:Fast+and+accu+rate+calibration-based+thermal+/+colour+sensors+registration#0>
- Strandemar, K. 762 94 R. (SE). (2013). Resolution and contrast enhancement with fusion in IR images. Europe. Retrieved from <https://www.google.com.co/patents/EP2570988A2?cl=en&dq=ir+fusion%C2%AE&hl=es-419&sa=X&ei=hvJ8VK-jE8TbsATu1oLADw&sqi=2&pj=1&ved=0CDUQ6AEwAw>
- Szeliski, R. (2010). *Computer Vision: Algorithms and Applications*. (D. Gries & F. B. Schneider, Eds.) (p. 832). Springer. Retrieved from <http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=bXzAlkODwa8C&oi=fnd&pg=PR9&dq=Computer+Vision+Algorithms+and+Applications&ots=gZX79YqFBC&sig=6AF P1owt1CyHXOKHXjiPuH75pWk>

T/IR Systems LLC. (2014). IR Info. Retrieved November 10, 2014, from <http://www.irinfo.org/>

Testo. (2010). Termografía básica.

Ursine, W., Calado, F., Teixeira, G., & Diniz, H. (2012). Thermal/Visible Autonomous Stereo Visio System Calibration Methodology for Non-controlled Environments. *Proceedings of 11th Quantitative InfraRed ...*, 1–10. Retrieved from <http://www.ndt.net/article/qirt2012/papers/QIRT-2012-261.pdf>

Ursine, W., Calado, F., Teixeira, G., Diniz, H., Silvino, P. S., & Andrade, R. De. (2012). Quantitative InfraRed Thermography Thermal / Visible Autonomous Stereo Visio System Calibration Methodology for Non-controlled Environments.

Viala, C. R. (Universidad P. de V. de I. de S. y A. (2006). Catacterización y optimización del proceso de calibrado de cámaras basado en Plantilla bidimensional.

Vidas, S., & Moghadam, P. (2013). HeatWave: A handheld 3D thermography system for energy auditing. *Energy and Buildings*, 66, 445–460. doi:10.1016/j.enbuild.2013.07.030

Vidas, S., Moghadam, P., & Bosse, M. (2013). 3D thermal mapping of building interiors using an RGB-D and thermal camera. *2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation*, 2311–2318. doi:10.1109/ICRA.2013.6630890

Yang, R., & Chen, Y. (2011). Design of a 3-D Infrared Imaging System Using Structured Light. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 60(2), 608–617. doi:10.1109/TIM.2010.2051614

Zhang, Z. (2000). A Flexible New Technique for Camera Calibration, 22(11), 1330–1334.

Zhang, Z., & Way, O. M. (1999). Flexible Camera Calibration By Viewing a Plane From Unknown Orientations, 00(c), 0–7.

Zisserman, A., & Hartley, R. (2004). *Multiple view geometry in computer vision* (2nd Editio, p. 673). CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS. Retrieved from http://books.google.com/books?hl=en&lr=&id=si3R3Pfa98QC&oi=fnd&pg=PR11&dq=Multiple+View+Geometry+in+computer+vision&ots=aRo4nqaa4K&sig=s8XNCo0S_MLx_43Eu0kxHSX4Q3U

7 ANEXOS

7.1 CASOS DE USO REALES

En el documento de desarrollo de *software* titulado “Análisis de Requerimientos - InVi Fusion” (Cardona & Ospina, 2014a) se hace una descripción extensiva de los casos de uso correspondientes a cada requerimiento citado en la tabla de análisis de requerimientos (Tabla 3.10). Los casos de uso, cuya relación con el Usuario de la aplicación se puede ver también en la Figura 3.16 Diagrama de Casos de Uso InVi Fusion., describen claramente las diferentes acciones que un Usuario puede realizar de acuerdo a las funcionalidades de la aplicación. En este documento también se presenta la tabla con los requerimientos y el diagrama de casos de uso mencionados.

7.2 DIAGRAMAS DE SECUENCIAS

Un diagrama de secuencia es un modelo de interacción de *software* que permite observar la historia de la interacción entre varios objetos o clases, ordenada temporalmente. Los diagramas de secuencia muestran el intercambio de mensajes entre los distintos objetos que se ven envueltos en la ejecución de una función de la aplicación. En el documento “Etapa de Diseño – InVi Fusion” (Cardona & Ospina, 2014b) se exponen los diagramas de secuencia correspondientes a cada caso de uso de la aplicación. Adicionalmente se incorporan los diagramas de clases y su respectiva descripción.

7.3 PRUEBAS FUNCIONALES

El documento “Pruebas Funcionales – InVi Fusion” (Cardona & Ospina, 2014d) registra diferentes pruebas funcionales realizadas a la aplicación. En ellas se divide la ejecución del programa en cuatro partes: Funciones de la Interfaz Gráfica, Funciones de Calibración, Funciones de Análisis de Imágenes y Funciones de Reporte.

7.4 MANUAL DE USUARIO

El Manual de Usuario de InVi Fusion (Cardona & Ospina, 2014c), explica a plenitud el modo de empleo de la aplicación. En él se presenta una guía que permite al usuario aprovechar al máximo las funciones de InVi Fusion, e incorpora una serie de soluciones a problemas comunes que permiten determinar fácilmente errores en el manejo del programa.