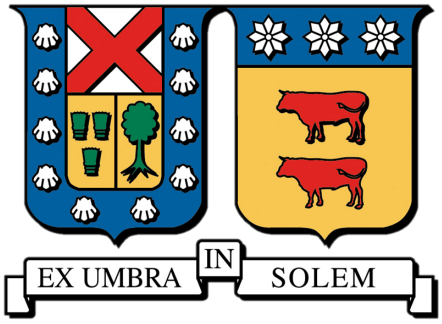
UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA

VALPARAÍSO - CHILE



“ Módulo de estimación automática albedo en la criósfera mediante métodos de visión artificial ”

PABLO BASILIO VERA PÉREZ

MEMORIA DE TITULACIÓN PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL ELECTRÓNICO, MENCIÓN COMPUTADORES

PROFESOR REFERENTE: **MARCOS ZÚÑIGA**

PROFESORES CORREFERENTES: **MOHAMED ABDELHAMID**

AGOSTO - 2024

Agradecimientos

Quiero agradecer a mi familia, sobre todo mis padres, German y Pamela por siempre apoyarme, nunca perder la fe y mostrarme una salida cuando creía que no había, a mis hermanos Bautista y Benjamin por estar ahí con migo, a mis abuelos, Rodion y Sonia, por preocuparse de mi y siempre preguntarme si necesitaba algo. Quiero agradecer también a mis amigos, tanto quienes estuvieron desde un principio, como quienes aparecieron durante el camino, Si alguno de ustedes lee esto, sabrá quién es (aunque aquí están por si se olvidan (Catalina, Dave, Daniel, Rodrigo), ustedes que me acompañaron en las noches difíciles, en las que pensaba en tirar la toalla, en que pensaba que la vida era injusta, o que simplemente estaba cansado, muchas veces incluso me dieron consejos tan importantes que me permitieron aprobar un ramo, algunos de ustedes muchas veces fueron mentores para mi. Quiero destacar esas personas que me enseñaron cosas que nunca se me olvidaran, que quedaron tan marcadas en mi mente que me acompañaran toda la vida, agradecer a mi profesor Marcos Zúñiga por enseñarme aplicaciones que yo no imaginaba en las ciencias de la electrónica, y por su paciencia al momento de desarrollar esta memoria.

También quiero agradecer a todos los anónimos que hicieron que este cambio fuera más fácil siempre les estaré agradecido.

Por ultimo quiero agradecer al Proyecto ANID-ANILLO “Interactions between environmental compartments and their impact on the Andean ecohydrosphere under conditions of climate change”, código ACT210021, por permitir desarrollar mi memoria.

Abstract

En el contexto del estudio de la deposición de partículas absorbentes de luz (LAP) en regiones cubiertas de nieve es necesaria la obtención de múltiples muestras de la superficie, ya que estas deposiciones aumentan la capacidad de la nieve para absorber radiación incidente de onda corta (ISR) y disminuye el albedo de la nieve superficial (SSA), lo que conduce a deshielo acelerado. El principal problemas es que dichas muestras son obtenidas de manera física, ya sea por estudio directo de suelo o a través de las sensores como un albedómetro, todo esto con el objetivo de obtener la concentración de *black carbon* en la superficie, siendo muestras de una corta porción de terreno o directamente la obtención de albedo, teniendo problemas de pobre cobertura de la muestra obtenida por los equipos, induciendo a una baja representatividad del espectro total, sumado al elevado costo de los equipos. Como solución se propone el uso de multiples cámaras de bajo costo, cubriendo distintos rangos espectrales y en conjunto con métodos de Visión por Computadora obtener la concentración de black carbon de una superficie. En esta memoria se presenta un prototipo de sensado multiespectral, considerando Espectroscopía del infrarrojo cercano (NIR), térmica y óptica, integradas a través de un sistema embebido para manejar su funcionamiento.

Índice general

1. Introducción **1**

1.1. Problema 1

1.2. Acercamiento a la solución 1

1.3. Hipótesis 2

1.4. Objetivos 2

1.5. Estructura de la memoria 3

2. Estado del arte **4**

2.1. Soluciones existentes 4

2.2. Técnicas relevantes y Marco teórico 5

2.2.1. Albedo 5

2.2.2. Cámara Térmica 6

2.2.3. Cámara NIR 7

2.2.4. Geometría proyectiva 7

2.2.5. Calibración 8

2.2.6. Filtrado 11

2.2.7. Discusión 11

3. Primer Prototipo **13**

3.1. Desarrollo de la solución 13

3.1.1. Raspberry Pi 4 B+ 13

3.1.2. Cámara Térmica 14

3.1.3. Cámara NIR Monocromática 14

3.1.4. Cámara Óptica 15

3.1.5. Funcionamiento sobre un ciclo de muestreo 15

3.1.6. Módulo de alimentación . . . 15
3.1.7. Módulo Disparador . . . 15
3.2. Rutina de Medición . . . 16
3.2.1. Consumo Energético de la Rutina de Medición . . . 19
3.3. Carcasa del dispositivo . . . 20
3.4. Etapa de Calibración . . . 22
3.5. Validación Prototipo 1 . . . 24
3.6. Puesta en terreno . . . 24
3.7. Rendimiento Prototipo 1 . . . 25

4. Segundo Prototipo **27**
4.1. Desarrollo de la solución . . . 27
4.1.1. Cámara Térmica . . . 29
4.1.2. Cámara NIR Monocromática . . . 30
4.1.3. Cámara Pi v3 NoIR . . . 30
4.1.4. Módulo de Alimentación . . . 31
4.1.5. Disparador . . . 31
4.1.6. Módulo de vídeo . . . 31
4.2. Rutina de Medición . . . 32
4.2.1. Consumo Energético de la rutina de medición . . . 35
4.3. Nueva carcasa . . . 36
4.4. Etapa de Calibración . . . 38
4.4.1. Etapa para valores Intrínsecos . . . 38
4.4.2. Etapa de homografía . . . 42
4.5. Validación Prototipo 2 . . . 45

5. Expedición Portillo **46**
5.1. Instalación . . . 46
5.1.1. Experimento . . . 47
5.2. Rendimiento Prototipo 2 . . . 48

6. Conclusiones **50**
6.1. Trabajo realizado . . . 50

6.2. Trabajo Futuro 51

Índice de figuras

2.1. Diagrama de la interacción de la radiación en una superficie 5
2.2. Comparación imagen óptica vs térmica 6
2.3. Fotográfica óptica e infrarroja de una persona con protector solar.Fuente 7
2.4. Vista superior de geometría estéreo estándar (Modificada de Bradsky 2008) 8
2.5. Tablero de Ajedrez (Checkerboard) 10
2.6. Patrones de Círculos 11
2.7. Imagen versus Descripción de borde 11

3.1. Diagrama de conexión del prototipo 1 14
3.2. Relación entre módulos de software 16
3.3. Máquina de estados 17
3.4. Consumo de corriente en función del tiempo. Entre los segundos 0 y 5 segundos se puede apreciar el consumo de forma pasiva. 19
3.5. Consumo de Potencia de cada etapa 20
3.6. Prototipo vista frontal 21
3.7. Prototipo vista lateral 21
3.8. Prototipo vista trasera 21
3.9. Imagen Térmica 22
3.10. Imagen Óptica 23
3.11. Imagen Calibrada obtenida de la transformación 23
3.12. Montaje de la Calibración 24
3.13. Prototipo montado en la expedición tomando Datos 25

4.1. Diagrama de conexión del prototipo 2 28
4.2. Diagrama de conexión del prototipo 2 etapa de video 28

4.3. Imagen térmica con marcas informativas 29
4.4. Imagen térmica sin marcas informativas 30
4.5. Diagrama interno de la cámara NIR 30
4.6. Visualización de la cámara Pi v3 NoIR 31
4.7. Máquina de estado asociada a la etapa de vídeo antes de la falla 32
4.8. Máquina de estado asociada a la etapa de vídeo posterior a la falla 33
4.9. Máquina de estado asociada a la etapa de captura de imágenes 33
4.10. Relación entre módulos de software 34
4.11. Aviso de incompatibilidad 35
4.12. Proceso zombie no eliminado 35
4.13. Caras Carcasa 37
4.14. Calibración Cámara Térmica 39
4.15. Calibración Cámara NIR 40
4.16. Calibración Cámara NIR Mala 41
4.17. Calibración Cámara Optica 41
4.18. Descripción general de las imágenes 42
4.19. Calibración Cámara NIR y Pi 43
4.20. Calibración Cámara Pi y NIR 44
4.21. Calibración de la cámara pi y térmica 44

5.1. Armado Final prototipo 2 antes de su partida a la expedición en portillo 46
5.2. Armado Final prototipo 2 antes de su partida a la expedición en portillo 47
5.3. Armado Final prototipo 2 antes de su partida a la expedición en Portillo 48
5.4. Grillas utilizadas para la realización del experimento desde una vista de la cámara térmica 48
5.5. Comparación de la vista entre imágenes 49

Capítulo 1

Introducción

1.1. Problema

En el estudio del deshielo acelerado sobre la criósfera, el *black carbon* aparece como uno de los principales contaminantes y objetos de estudio, alterando el albedo de esta [Figueroa-Villanueva et al., 2023]. Al momento de extraer datos sobre la concentración de este contaminante en la superficie, se enfrentan múltiples complicaciones debido a la naturaleza del contaminante, las bajas temperaturas que afectan a los equipos, y el difícil acceso a las áreas de estudio. Además, una sola muestra puede cubrir una superficie limitada, lo que resulta insuficiente en términos de representatividad. Estos desafíos, sumados al alto costo del equipo necesario, complican el estudio. Aunque las muestras obtenidas son muy precisas, la dificultad para acceder a los puntos de extracción puede generar un déficit de datos, lo que afecta la robustez del análisis.

1.2. Acercamiento a la solución

Tomando como principal problemática el muestreo de la criósfera, existen múltiples acercamientos a la solución de estimar la deposición de *black carbon* en dicha superficie. Una solución a este problema es la de un muestreo directo a través de un albedómetro (por ejemplo el equipo PIRA 6), comparando la radiación incidente con la reflejada de manera directa, y así estimar de forma bastante exacta el albedo de la superficie. Con la disposición de estas mediciones es posible realizar una regresión que permita inferir el *black carbon*. Otra forma en la cual se puede medir el *black carbon* , es extraer muestras de nieve de la superficie a examinar, posteriormente procesarla, obtener directamente el *black carbon* depositado en la nieve y así estimar el albedo según un modelo de transferencia de

radiación SNICAR [Figueroa-Villanueva et al., 2023]. El uso de cámaras NIR como método de obtención de la concentración de *black carbon* de una superficie o el uso de cámaras térmicas buscando una correlación entre temperatura y *black carbon* en una superficie específica, permite en ciertos casos inferir el albedo de dicha superficie, siendo este otro de los métodos utilizados, en el cual estará basada la hipótesis de esta memoria.

Basado en este razonamiento, se hipotetiza que el sensado mediante múltiples cámaras, además de generar una correlación geométrica entre las distintas imágenes, permitirá detectar el *black carbon* de una superficie y así inferir el albedo de esta. La utilización de cámaras NIR en conjunto con cámaras térmicas y ópticas podría ser una solución para obtener una buena estimación de la concentración de *black carbon*. Es por esto que en esta memoria se diseñará un dispositivo que conste de este sistema de adquisición, con estas características y un conjunto de cámaras.

1.3. Hipótesis

Es posible construir un dispositivo multiespectral de bajo costo que sea capaz de detectar con una precisión adecuada la concentración de *black carbon* en la superficie de la criósfera, mediante la utilización de cámaras en los espectros de luz visible, NIR y térmico; ¿Qué tan exactas serán las mediciones según esta nueva forma en comparación con los métodos existentes? ¿Es posible abarcar una superficie significativa de la criósfera por muestra, para que este nuevo método se considere una alternativa viable y un posible reemplazo a los métodos existentes?

1.4. Objetivos

Objetivo general: Diseñar un módulo multiespectral de sensado automático de la concentración de black carbon en la superficie de la criósfera, utilizando cámaras de bajo costo en los espectros de luz visible, NIR y térmico, con un criterio de compacidad, que permitirá plantear una futura implementacion de ser montado en un dron aéreo para realizar un mapeo georreferenciado de la información de sensado.

Objetivos específicos:

- Diseñar un prototipo capaz de incluir las 3 cámaras y desarrollar un programa que permita su

funcionamiento en conjunto.

- Configurar y calibrar el dispositivo para que las mediciones de la concentración de *black carbon* se encuentren dentro de un rango de aceptable de error.
- Validar la funcionalidad básica del sistema en un entorno real.

1.5. Estructura de la memoria

En el próximo capítulo, *Estado del arte*, se expone un resumen sobre las soluciones propuestas por investigadores para el problema planteado. Las técnicas modernas estudiadas en la actualidad en lo relevante al estudio de la criosfera y la obtención de concentración de *black carbon* mediante distintos métodos. Estudiar la potencial correlación con el albedo y entregar una discusión sobre la viabilidad de los métodos utilizados en comparación con los existentes.

En el capítulo *Primer Prototipo* se presenta el trabajo abarcado en 2 etapas: una primera instancia explicando el primer prototipo, el cual permitirá un acercamiento real a las condiciones que se enfrentan durante las mediciones en un entorno hostil de la criósfera. Este primer modelo es luego empleado como fundamento para el diseño y ensamblaje de un segundo prototipo, el cual presenta mejoras sustanciales. En el capítulo *Segundo Prototipo*, se desarrollará este segundo modelo, siguiendo la línea de los requerimientos generados luego del análisis del primer prototipo.
Posteriormente, en *Expedición Portillo*, se genera una análisis profundo de todo lo ocurrido en la puesta en terreno del prototipo 2 refutando o validando la hipótesis, para que finalmente en el capítulo *Conclusiones* se discuta el cumplimiento de los objetivos, el alcance del trabajo realizado y los posibles trabajos que le pueden dar continuidad.

Capítulo 2

Estado del arte

2.1. Soluciones existentes

Dada la emergencia climática vivida en estos tiempos, el estudio del deshielo acelerado de la criósfera se ha vuelto un tema recurrente. En este contexto, existen múltiples maneras de determinar estos efectos y calcular sus consecuencias. Uno de los contaminantes depositados en gran parte de la superficie es el *black carbon* (BC), elemento que absorbe radiación a los 880 nm [Rönkkö et al., 2023], alterando el albedo de la criósfera. Cabe destacar que la base de todo este desarrollo nace como necesidad de la investigación del Profesor Francisco Cereceda, para estimar el efecto del BC sobre la criósfera [Figueroa-Villanueva et al., 2023]. Como se explica en la sección 1.2, es posible estimar el albedo de una superficie basado en la concentración del BC extraído directamente de muestras de nieve, mediante la utilización de un modelo de transferencia energética (como se estudia en [Figueroa-Villanueva et al., 2023], el cual utiliza el modelo SNICAR) o utilizando un albedómetro, el cual entrega directamente el albedo de una región de superficie.

Adicionalmente, existen otros métodos que permiten medir las concentraciones de BC. Una alternativa son los métodos de incandescencia inducida por láser, que permiten determinar el tamaño de las partículas de BC y su agrupación. Otra alternativa radica en la utilización de cámaras con un rango de frecuencia específico, permitiendo ya sea determinar el albedo directamente o detectar las distintas frecuencias de radiación incidente en una superficie (como se explica en la sección 2.2.3). En este caso se realizó un experimento para muestrear una región utilizando un observador estático (cámara fija) a través del espectro infrarrojo.

Un nuevo planteamiento sobre la relación entre temperatura y albedo de una superficie, se desarrolla en el estudio [Lu et al., 2021]. Dado este principio, es posible relacionar la temperatura con el conta-

minante que altera el albedo de dicha superficie.

Otro acercamiento a esta problemática se enfoca en la opción de dispositivos multiespectrales, dado que, por la naturaleza del fenómeno, esperar que sea posible realizar una estimación de la concentración de BC, a partir de imágenes, es un proceso complejo, tal como se menciona en la sección 1.2. Para estos casos es necesario optar por la utilización de dos o más cámaras que en conjunto, logren cubrir el espectro relevante para efectuar la estimación.

2.2. Técnicas relevantes y Marco teórico

2.2.1. Albedo

El albedo es el porcentaje de radiación que cualquier superficie refleja respecto a la radiación que incide sobre ella. Tomando como Fuente la radiación del sol, y el BC alterando el albedo de la superficie superficie como se aprecia en la figura 2.1

Esta interacción esta descrita por la ecuación:

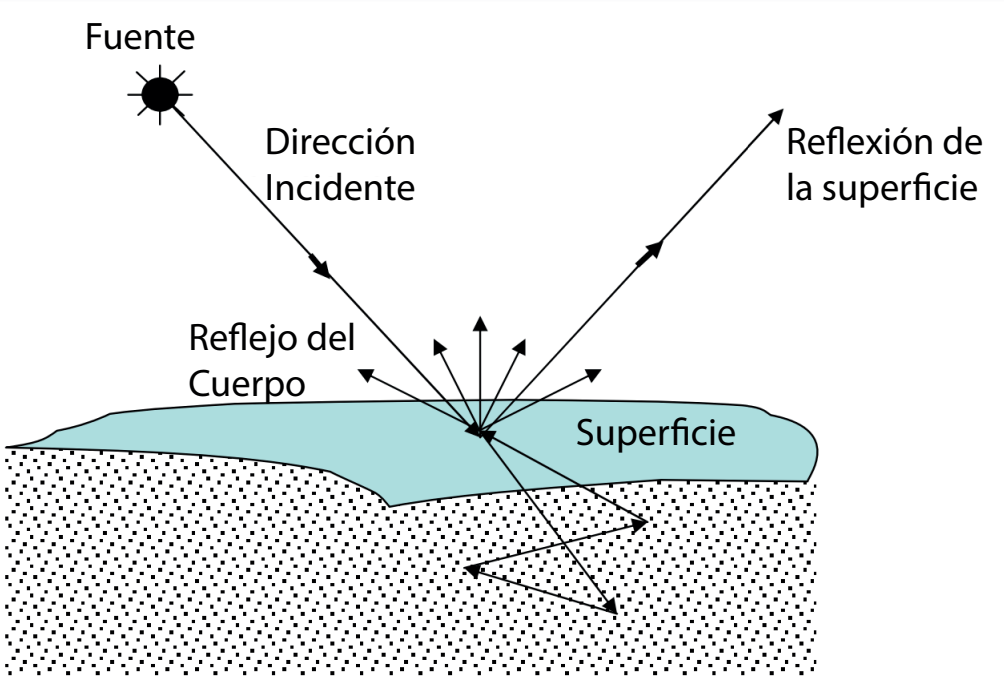


Figura 2.1: Diagrama de la interacción de la radiación en una superficie

$$\alpha = (1 - D)\bar{\alpha}(\theta_i) + D\bar{\bar{\alpha}}, \tag{2.1}$$

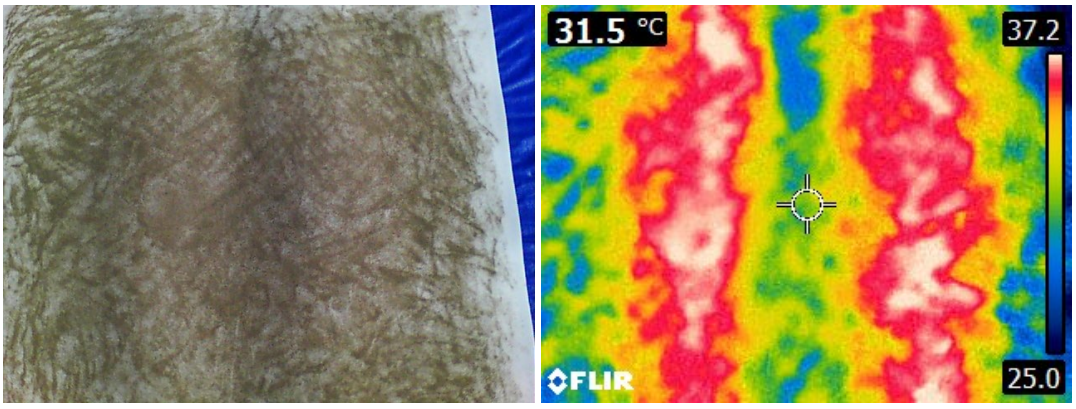
donde θ es el ángulo de elevación del Sol, $\bar{\alpha}(\theta_i)$ la reflectancia direccional-hemisférica, $\bar{\bar{\alpha}}$ la reflectancia bi-hemisférica, $(1 - D)$ la proporción de radiación directa de un ángulo solar y D la proporción de iluminación difusa. Por lo tanto, el albedo real esta dado por α (también llamado albedo de cielo azul).

2.2.2. Cámara Térmica

La cobertura de este elemento en la investigación sobre la aglomeración de BC y su relación con el albedo, no sólo se limita a la criósfera. Existen precedentes de su utilización en superficies como el asfalto [Lu et al., 2021], con el fin de estudiar distintos materiales, buscando aquellos que absorban la menor cantidad de radiación y así evitar su calentamiento. En este estudio se realizó un análisis de superficies con el fin de encontrar un nuevo material de pavimentación, marcando de esta manera un precedente sobre la correlación entre albedo y temperatura, y dado que el BC altera el albedo de una superficie también debería alterar la temperatura de esta. Con esto es posible determinar una directa correlación entre temperatura y el albedo de una superficie. Los autores realizaron este experimento de forma controlada en un laboratorio regulando las variables de exposición. Aún así esto permite generar un precedente sobre la viabilidad de la relación térmica/albedo, utilizada en la hipótesis, al menos desde el enfoque de la cámara térmica.

Dada la naturaleza multidisciplinaria de esta memoria, el alumno y tesista de magíster del profesor Marcos Zuñiga, Gerald Lavergne se encuentra investigando de manera paralela esta relación, aplicada a una superficie de la criósfera.

Los datos compartidos poseen un gran parecido al de la figura 2.2, y serán usados para probar esta relación.



(a) Vista lateral (b) Vista aérea

Figura 2.2: Comparación imagen óptica vs térmica

2.2.3. Cámara NIR

La investigación de [Rengarajan et al., 2000], desarrolla un experimento similar a la propuesta de esta memoria. Se utiliza un dispositivo en trípode estático, que consta de 2 cámaras: una infrarroja con filtro óptico de 400nm a 700 nm y dos cabezales detectores de UVA (uno Gigahertz Optics y desarrollado por los investigadores). Otro proyecto que estudia la relación entre el espectro infrarrojo y el albedo de una superficie es [Montpetit et al., 2012], el cual utilizo una cámara NIR que opera entre (0.9–1.7 μ m) con una resolución de (320 x 256 pixels), con el objetivo de determinar el albedo de una superficie cubierta de nieve y comparar las mediciones obtenidas mediante un laser.
El funcionamiento básico de una cámara NIR se encuentra retratado de mejor manera en la figura 2.3, apreciando la diferencia de una persona con protector solar ante una cámara óptica y una cámara NIR.



Figura 2.3: Fotográfica óptica e infrarroja de una persona con protector solar.Fuente

2.2.4. Geometría proyectiva

Un recurso muy utilizado para correlacionar directamente píxeles y regiones de imágenes distintas que compartan un área en común, es la geometría proyectiva, dando la posibilidad de sobreponer el mismo objeto tomado por dos cámaras distintas desde posiciones distintas y así realizar un análisis píxel a píxel o región a región. Una manera estándar de definir esta relación entre imágenes es a través de la siguiente matriz de transformación (homografía) que permite llevar desde un vector real a un

vector en coordenadas píxel y/o de píxel de una cámara a otra como se aprecia en la figura 2.4

$$\begin{bmatrix} i \\ j \\ 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & h_{13} \\ h_{21} & h_{22} & h_{23} \\ h_{31} & h_{32} & h_{33} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{bmatrix}$$

Esta matriz describe lo siguiente:

- $h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$:Estos elementos determinan la rotación, escala y cizalladura de la transformación.
- h_{13}, h_{23} : Estos elementos determinan de las traslaciones en los ejes x e y, respectivamente.
- h_{31}, h_{32}: Estos elementos introducen la perspectiva en la transformación, afectando cómo los puntos se proyectan en el plano de la imagen. A menudo, si h_{31} y h_{32} son cero, la transformación es una afinidad (es decir, no hay efecto de perspectiva).
- h_{33} :Valor de escala para mantener la homogeneidad.

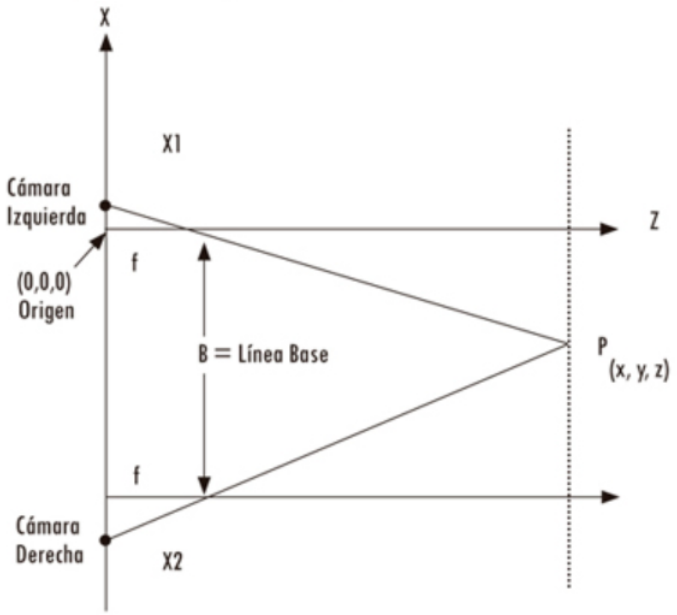


Figura 2.4: Vista superior de geometría estéreo estándar (Modificada de Bradsky 2008)

2.2.5. Calibración

Al momento de utilizar cámaras como método de estudio o para la aplicación de algún método de Visión por Computador, es necesario calibrar dichas cámaras. Para esto existen distintos métodos de

calibración

Método de Zhang

Es uno de los métodos más utilizados y usando múltiples imágenes de un patrón de calibración (generalmente un tablero de ajedrez) en diferentes orientaciones. Este método es robusto y relativamente fácil de implementar.

Calibración Estéreo

Involucra la calibración de dos cámaras para establecer su relación espacial. Se utiliza en sistemas de visión estereoscópica para obtener información de profundidad.

Calibración mediante Homografía

Este método usa la correspondencia de puntos entre la imagen y un plano conocido para estimar la matriz de calibración, por lo cual no maneja distorsión

Patrones de calibración utilizados

Tablero de Ajedrez (Checksboard)

Es el comúnmente utilizado. Consiste en un patrón de cuadros blancos y negros. La intersección de las esquinas de los cuadros se utiliza para calcular la calibración.

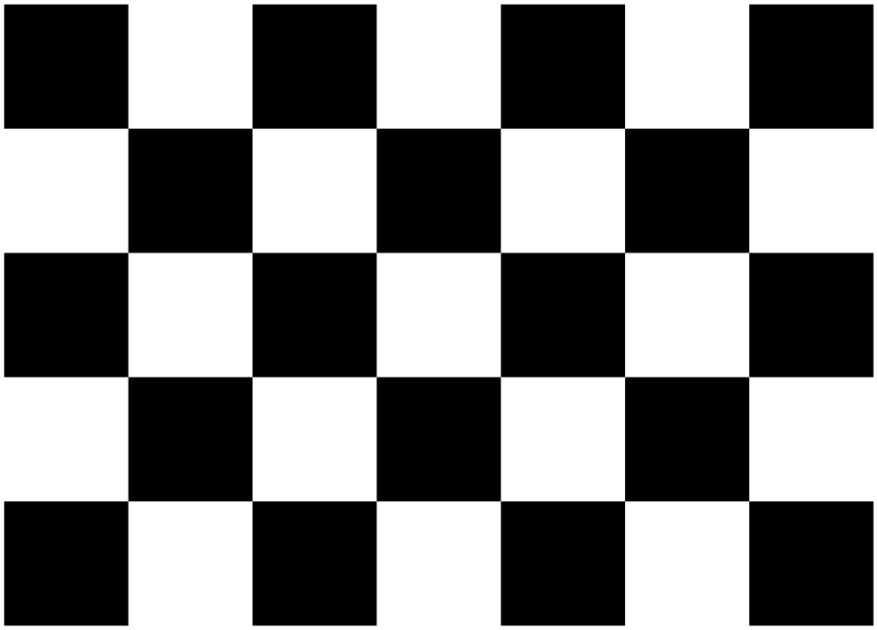


Figura 2.5: Tablero de Ajedrez (Checkerboard)

Patrones de Círculos

Consisten en una disposición regular de círculos que pueden ser detectados por los algoritmos de calibración. Se utilizan cuando la detección de esquinas del tablero de ajedrez no es suficiente. La variación existente en el patrón que se muestra en la figura 2.6, en que los círculos fueron perforados. De esta manera es posible realizar una calibración en cámaras térmicas, existiendo una diferencia de temperatura entre el patrón y la superficie posterior y de esta manera el patrón se percibe, tanto en la imagen óptica como en la imagen térmica.

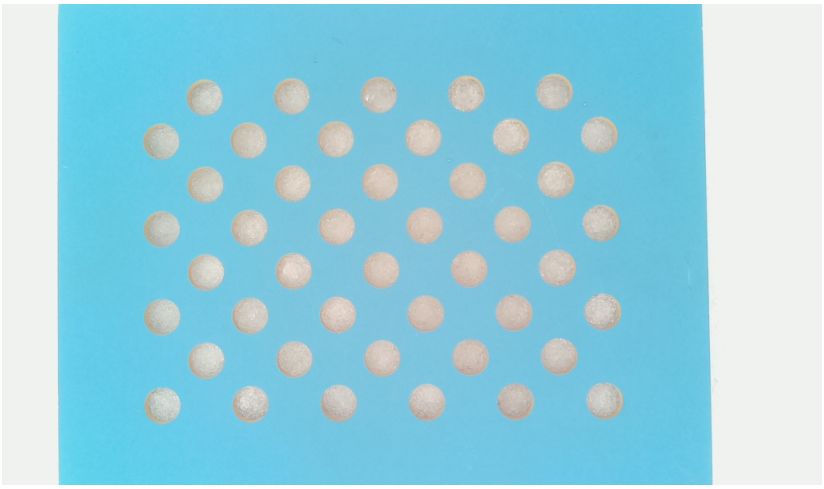


Figura 2.6: Patrones de Círculos

2.2.6. Filtrado

Existen múltiples maneras de filtrar una imagen: extracción de bordes, difuminacion de características, agrupación por macro píxeles, eliminación de ruido, etc. La aplicación de distintas herramientas de filtrado permite extraer diversas característica. Un claro ejemplo se aprecia en la figura 2.7, retratando un filtro detector de borde, aplicado a una imagen BGR.



Figura 2.7: Imagen versus Descripción de borde

2.2.7. Discusión

Dada la naturaleza multiespectral de la problemática, se diseñará un dispositivo, utilizando gran parte de la base de muchos de los trabajos vistos en el estado del arte, principalmente el realizado en la Universidad de Oxford, [Rengarajan et al., 2000]. La diferencia en este trabajo es que las estimaciones s de concentración de BC se apoyaran en la utilización de una cámara térmica que permita

agregar datos de temperatura y una cámara óptica para datos de aglomeración o contaminación visible, apoyando el análisis de la cámara NIR. El cruce de estos datos sería el valor agregado que permitiría estudiar una relación, entre una imagen infrarroja, térmica, óptica y la concentración de BC. Dada la naturaleza de las cámaras, existe la posibilidad de saturación y la necesidad de una etapa tanto de prefiltrado como de ajuste del ancho de banda en el cual se trabaja. Esto se confirmará luego de que se realice un análisis completo de los datos obtenidos al final del experimento.

Capítulo 3

Primer Prototipo

3.1. Desarrollo de la solución

Diagrama de componentes:

En base a los requerimientos discutidos con el Profesor Francisco Cereceda, se diseñó el prototipo N°1, el cual se aprecia en la fig.3.1. Este prototipo cuenta con 3 cámaras de distintos tramos operacionales, funcionando como un aparato de muestreo de diferentes rangos de frecuencia o ” cámara multiespectral”, una batería incorporada para el uso en exterior de manera autónoma, un botón accionado y un led que permita dar indicaciones al operador sobre el estado del prototipo.

El prototipo cuenta con distintas partes y etapas:

- Raspberry Pi 4 B+
- Cámara Pi v1.4
- Cámara NIR Monocromatica
- Cámara Térmica Lepton 1.4
- Etapa de alimentación
- Disparador

3.1.1. Raspberry Pi 4 B+

Dispositivo embebido que permite la integración de las distintas cámaras y algoritmos de medición necesarios para el muestreo discreto de la superficie. Se escogió por sus múltiples usos, amplio

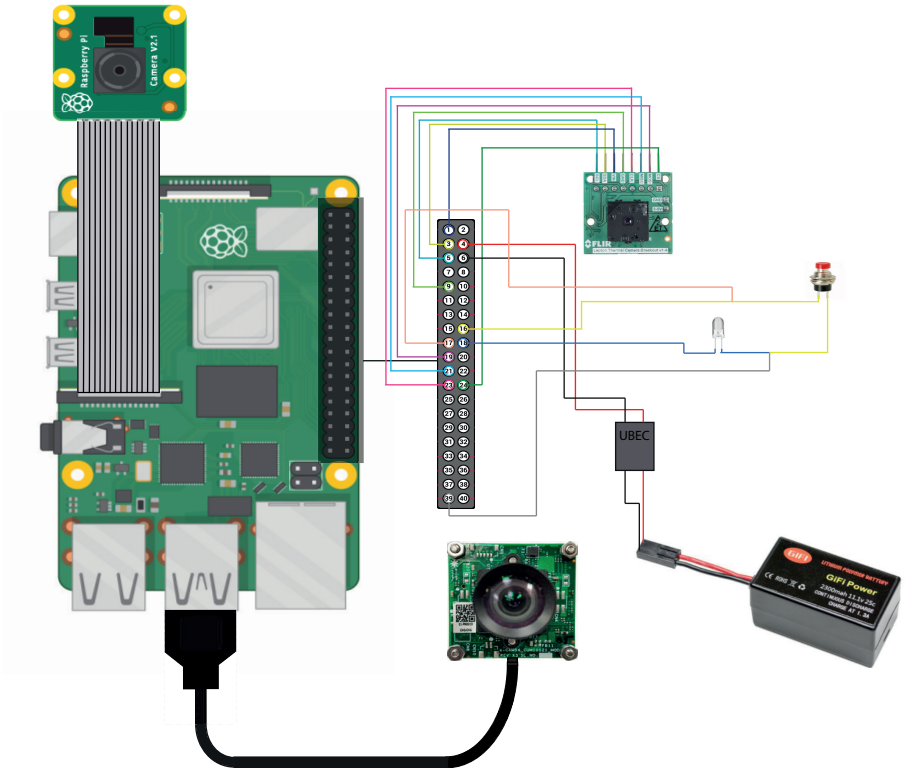


Figura 3.1: Diagrama de conexión del prototipo 1

historial en aplicaciones prácticas y SO incorporado que permite programar de manera libre en múltiples lenguajes para la operación de cada cámara.

3.1.2. Cámara Térmica

Se utilizó una cámara lepton v1.4, alternativa económica que cumple con los requerimientos necesarios para la implementación. Al ser una cámara que mide diferencias térmicas y no temperaturas absolutas, sólo permite describir gradientes de temperatura en función de los objetos de una misma imagen, una alternativa que permitiría describir la variación de temperatura en función de la concentración de BC, con respecto a partes no contaminadas de la superficie.
Posee un rango espectral entre 8 μm y 14 μm y una imagen resultante de 80x60 pixeles.

3.1.3. Cámara NIR Monocromática

Dada la naturaleza de las superficies de la criósfera y el exceso de luz que estas superficies reflejan, posiblemente interfiera con una cámara óptica. En base a todos los estudios previos vistos en la sección

2.2.3, la opción de la cámara NIR monocromática aportaría otorgando una imagen menos saturada y con un espectro de muestreo mayor, abarcando en nuestro caso (modelo de cámara) entre los xxx - xxx nm.

3.1.4. Cámara Óptica

Se utilizará la cámara que por defecto es compatible con raspberry pi (colocar modelo). De esta manera se tiene una base en la cual comenzar la correlación con la concentracion de BC, y sirve como método de comparación con las imágenes tomadas en los otros espectros.

3.1.5. Funcionamiento sobre un ciclo de muestreo

Un ciclo de muestreo está divido en distintas sub-etapas, que permiten una obtención óptima de las imágenes (sera profundizado en la sección 3.2), generando un registro ordenado de estas.

3.1.6. Módulo de alimentación

Este módulo consta de dos elementos clave: una batería y un circuito UBEC. El UBEC, o Convertidor de Voltaje de Alto Rendimiento (por sus siglas en inglés: Universal Battery Elimination Circuit), permite la conversión de voltaje a uno adecuado para la Raspberry Pi, la cual debe ser alimentada con 5V.

3.1.7. Módulo Disparador

Etapa conformada por botones (para este caso, solo un botón), cuya tarea es iniciar la rutina de medición (más especificada más adelante).

3.2. Rutina de Medición

Por la necesidad del mismo prototipo de manejar múltiples cámaras, es necesario tener una subrutina encargada de controlar cada cámara, funcionando bajo la utilización de un eje central que permita la coordinación de cada muestreo, catalogando y almacenando las imágenes de manera ordenada. Esta rutina se conforma de un archivo para cada cámara, un programa central que se encargue de las instancias de cada cámara y funciones en conjunto de estas, un programa que se encargue de las rutinas de mediciones y clasificaciones de las imágenes. Esta relación se aprecia en el diagrama de la fig. 3.2

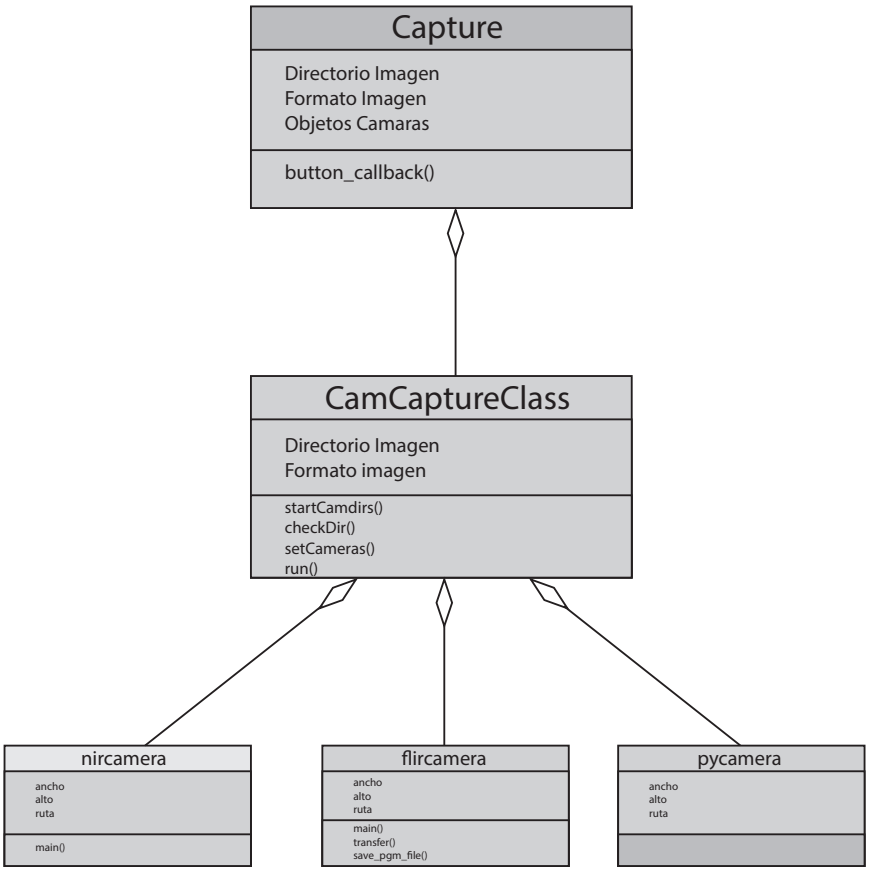


Figura 3.2: Relación entre módulos de software

Al mismo tiempo el funcionamiento en conjunto de la rutina de medición y sus múltiples etapas, se explica en la máquina de estados en la fig.3.3,

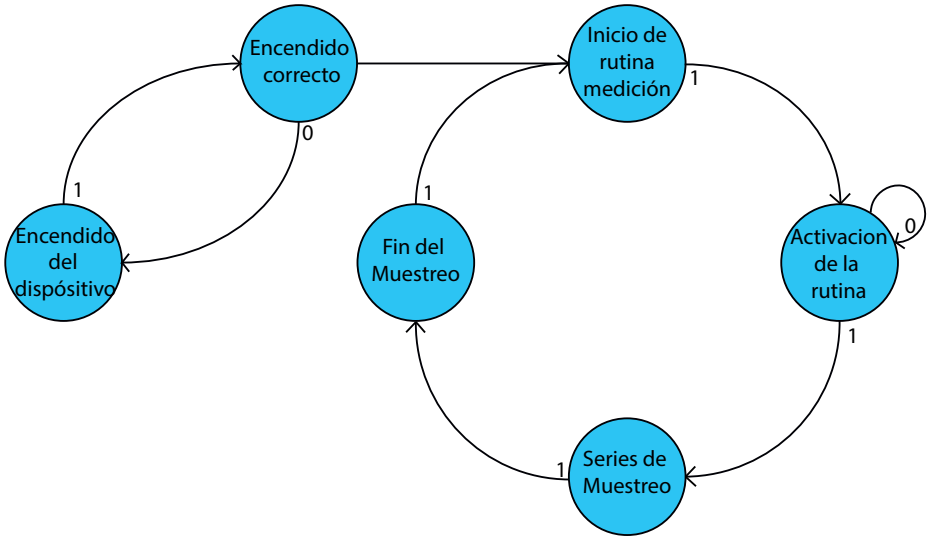


Figura 3.3: Máquina de estados

destacando las etapas:

1. Encendido: comienza al momento de oprimir el botón de encendido.
2. Encendido correcto: Si el encendido es correcto se comienza de manera automática la rutina de muestreo.
3. Inicio de la rutina: se comienza la rutina y el programa espera que se aprete el botón de disparo para poder comenzar el muestreo.
4. Activación de la rutina: al momento de oprimir el botón de disparo, se comienza un ciclo el cual tomará 3 fotos de cada cámara, y así tener reemplazos en el caso de que ocurran problemas de enfoque de alguna cámara.
5. Serie de muestreo: etapa en la cual se toman las imágenes.
6. Fin del muestreo: al finalizar la adquisición de fotografías, se retorna inmediatamente al paso 3 y nuevamente se espera que se oprima el botón.

Rutina cámara NIR

Algorithm 1 Módulo Cámara NIR:./a.out 672 328 **directorio**

if directoriono vacio **then**

width = 672

height = 328

path = **directorio**

$See3camCU40cu40 = See3camCU40(dev, std :: stoi(width), std :: stoi(height));$

▷ Se instancia el objeto See3camCU40

cv::Mat img = cu40.CaptureImage(cu40.cam, path);

▷ Se captura y se guarda en *Directorio*

end if

Rutina cámara Térmica (FLIR)

Algorithm 2 Módulo Cámara FLIR:
./a.out /dev/spidev0.* **directorio**

uint8_t lepton_frame

if directorio no vacio **then**

frame = lepton_frame

path = **directorio**

save_pgm_file(path) ▷ Se guarda en *Directorio*

end if

Rutina cámara óptica

Algorithm 3 Módulo Cámara Óptica:
sudo python3 pycamera.py **directorio**

if directorio no vacio **then**

Directorio = **directorio**

Se instancia el objeto PiCamera()

$camera.capture('\%s\%s.jpg'\%(directory, i))$ ▷ Se captura y se guarda en *Directorio*

else

Se imprime en consola "No directory given"

end if

3.2.1. Consumo Energético de la Rutina de Medición

Una de las características fundamentales de este prototipo es su autonomía al momento de su funcionamiento. Debe ser capaz de completar múltiples ciclos de mediciones antes de necesitar una recarga. La imagen 3.4 ilustra el consumo de corriente en función del tiempo, mostrando 4 aumentos de corriente, incluyendo 3 ciclos de muestreo y el inicio del dispositivo, apreciado en el primer peack de corriente. En ciertos momentos el circuito podría consumir de forma pasiva energía mientras intenta resolver algún problema de escritura (error al reconstruir la imagen) por parte de las cámaras, tal como se aprecia en el valle ubicado entre el segundo y el tercer peack.

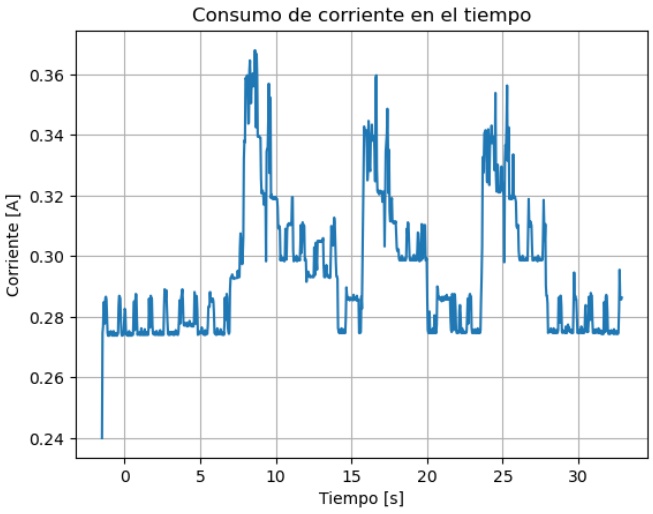


Figura 3.4: Consumo de corriente en función del tiempo. Entre los segundos 0 y 5 segundos se puede apreciar el consumo de forma pasiva.

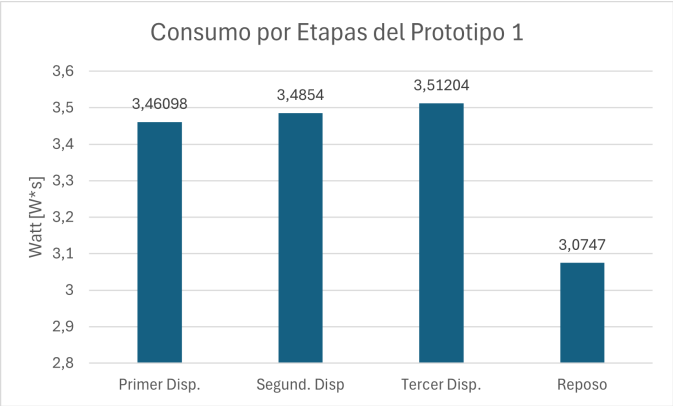


Figura 3.5: Consumo de Potencia de cada etapa

Es posible apreciar en los consumos totales de cada etapa en la figura 3.5, una tendencia de consumo constante en cada ciclo de adquisición de un set de fotos y un muy bajo consumo cuando el dispositivo se encuentra en reposo.

Con esto es posible determinar una autonomía teórica, y comparar con la experimental la cual se realizó alrededor de las 1.5 hrs. El consumo energético de cada etapa, tal como se aprecia en la 3.4, nos daría una autonomía teórica de un funcionamiento continuo de 6 hrs. aproximadamente, tomando ciclos de muestreo de 1 minuto.

3.3. Carcasa del dispositivo

Durante el desarrollo del prototipo, se trabajó en conjunto con el estudiante de la carrera de Ing. en Diseño de productos Mario Maldonado , quien diseñó una carcasa que permitiera al prototipo soportar las bajas temperaturas. Muchos de los componentes soportan como mínimo -10 °C. Por esto es necesario protegerlos contra las bajas temperaturas. Además, la carcasa cuenta con los botones necesarios para operar el prototipo sin la necesidad de grandes conocimientos sobre este, niveladores para instalar de manera correcta el dispositivo y un láser que permita obtener feedback sobre la zona de aquisición de fotos. Por último, los led ubicados al costado del prototipo permiten al operador saber en qué parte del ciclo de muestreo se encuentra la cámara. En las figuras 3.6, 3.7 y 3.8 se aprecian múltiples vistas de la carcasa:

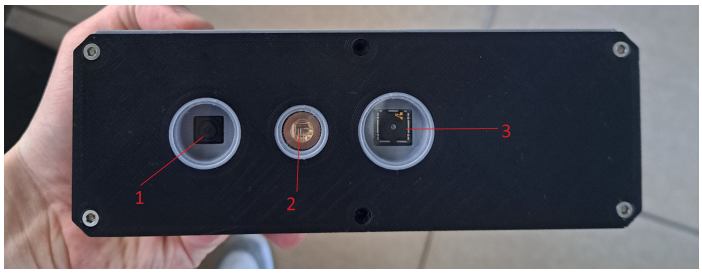


Figura 3.6: Prototipo vista frontal

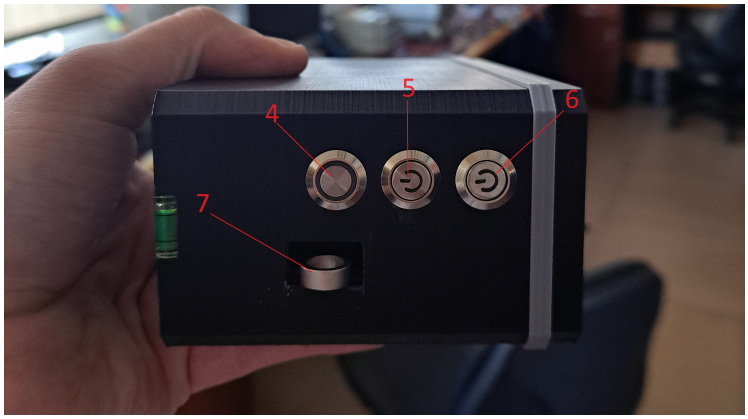


Figura 3.7: Prototipo vista lateral

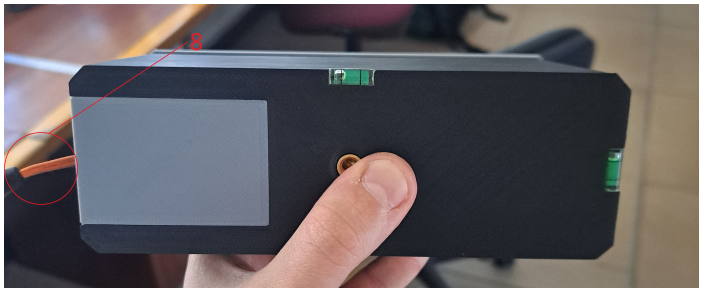


Figura 3.8: Prototipo vista trasera

- 1) Cámara Óptica
- 2) Láser
- 3) Cámara Térmica
- 4) Botón de disparo
- 5) Botón encendido del laser
- 6) Botón encendido dispositivo

- 7) Unidad USB de almacenamiento
- 8) Tapa de cambio de batería

3.4. Etapa de Calibración

Debido al análisis necesario entre múltiples imágenes de distintos espectros y dimensiones, se debe establecer una correspondencia entre cada cámara. Para esto se realizó un proceso de calibración, el que considero una plancha perforada de color azul considerada como placa de calibración, la cual se calentó durante un tiempo al sol. Con esto se logró tanto tomar una clara imagen térmica (3.9), como una imagen óptica (3.10). La razón por la cual no existen imágenes desde la perspectiva de una cámara NIR, es porque durante el ensamblaje de la carcasa del prototipo, esta falló. De igual forma la calibración se completó con éxito, tal como se aprecia en la figura 3.11, y entregando la matriz de homografía:

$$\begin{bmatrix} 0{,}767 & -0{,}029 & 0{,}019 \\ -0{,}032 & 0{,}961 & 0{,}675 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

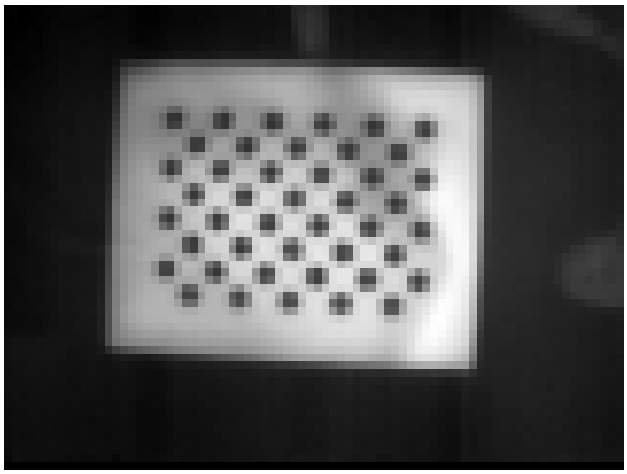


Figura 3.9: Imagen Térmica

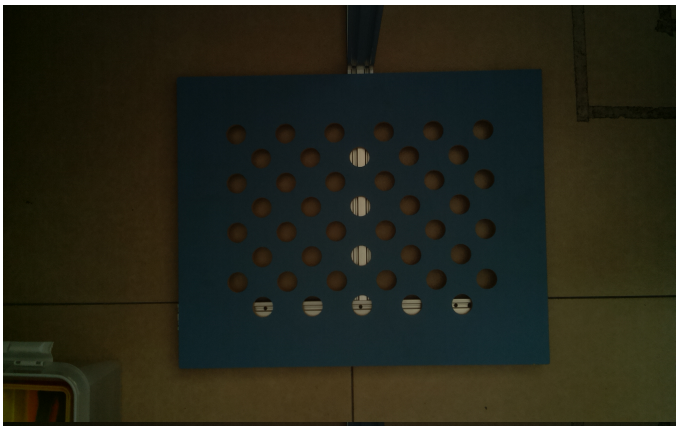


Figura 3.10: Imagen Óptica

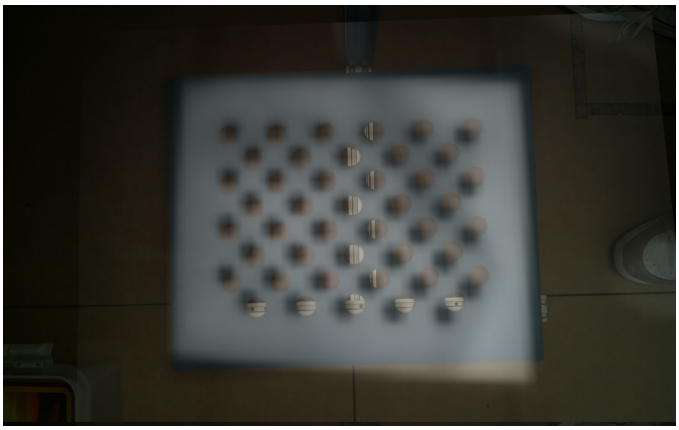


Figura 3.11: Imagen Calibrada obtenida de la transformación

Estas imágenes fueron tomadas a una altura de 1m desde la placa de calibración a la cámara.como se aprecia en la figura 3.12, ya que el funcionamiento básico que se planteó para el prototipo es de apuntar con todas las cámaras directamente al suelo a dicha altura.

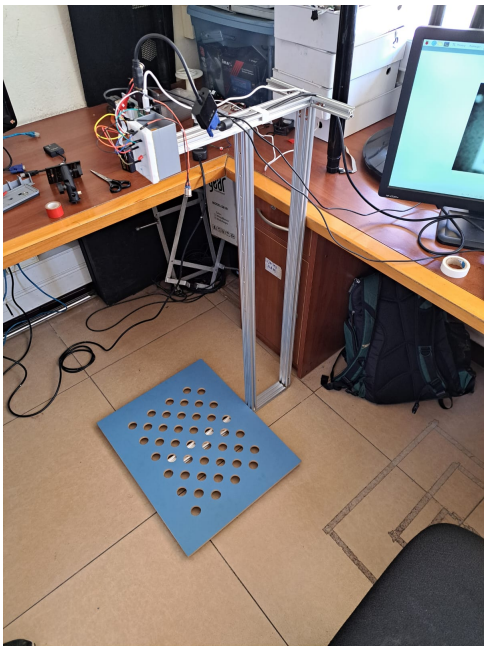


Figura 3.12: Montaje de la Calibración

3.5. Validación Prototipo 1

Durante las pruebas finales el prototipo se vio dañado a tal grado que se debió recurrir a un respaldo existente de este, en conjunto de errores de comunicación por parte de la etapa de almacenamiento, no se pudo realizar una validación rigurosa. Esta validación preliminar consistió en realizar múltiples mediciones una tras de otra, buscando si es que existía algún error durante el funcionamiento de las cámaras en conjunto, ya que, en algunos casos el exceso de datos podía saturar el buffer de datos. Para resolver este problema la única solución era reiniciar la rutina de medición (lo cual para este prototipo aún no estaba implementado) o reiniciar la Raspberry Pi 4 y así poder liberar espacio. Los errores de fotos fueron los mínimos y fueron cubiertos por la toma de 3 muestras consecutivas.

3.6. Puesta en terreno

Este prototipo tuvo como fecha limite de entrega el día 6 de diciembre del 2023, ya que se utilizaría como parte de la investigación del profesor Francisco Cereceda (dispositivo montado en la figura 3.13), en una expedición a la Antártica. Se indicó que aunque en el trayecto el prototipo sufrió complicaciones con respecto a una de las cámaras, este logró operar en terreno. De regreso de la expedición, el prototipo seguía intacto y este no había sufrido grandes daños e incluso aún poseía carga para

seguir funcionando, habiendo almacenado un amplio número de fotos (52 conjuntos de fotografías, aproximadamente). Estas fueron analizadas, para encontrar que en muchas de estas imágenes se encontraba una gran cantidad de ruido y saturación, lo que posteriormente llevaría a una etapa destinada a encontrar causas a estas problemáticas.



Figura 3.13: Prototipo montado en la expedición tomando Datos

3.7. Rendimiento Prototipo 1

Durante su funcionamiento el prototipo presentó múltiples inconvenientes, tanto de software como de hardware. Al recuperar el equipo de la expedición a la Antártica, fue posible determinar ciertas fallas que pudieron ocurrir y causar que los datos se capturaran erróneamente:

- Falla catastrófica por parte de la cámara NIR: Esta dejó de funcionar durante las pruebas iniciales.
- Obstrucción sobre la cámara térmica por parte de mica protectora, resultando que al momento de llegar al equilibrio térmico la mica protectora interfiriera en las mediciones de la superficie, razón por la cual muchos de los datos se vieron descartados.
- Saturación de la cámara óptica: resultante del exceso de brillo en la superficie causando el descarte de más datos, por el hecho de ser una imagen de valores máximos en su totalidad, sin la posibilidad de diferenciar algo.
- La potencia de láser no era la suficiente para ser visible en un escenario de la criósfera.

- No fue posible visualizar las alertas lumínicas a través de los led, debido a las condiciones del entorno, dificultando al operador conocer el estado del prototipo mientras realizaba el muestreo.

Capítulo 4

Segundo Prototipo

4.1. Desarrollo de la solución

Diagrama de componentes:

Posterior a la expedición (revisar 3.6) y en base a los datos rescatados, acotaciones del equipo y mejoras programadas, se realizó un nuevo listado de componentes y un nuevo diagrama de conexiones con el cual trabajar. Destacar que al momento de comenzar la lista de requerimiento, se habilitó la venta para la versión 5 de la Raspberry pi, lo que permitió considerar la inclusión de esta nueva versión en el prototipo. Sin embargo, lamentablemente, no podrá ser utilizada debido a que el nuevo sistema operativo no es compatible con muchas de las bibliotecas utilizadas para el manejo de las cámaras. Tal como se aprecia en la figura 4.1 , con el fin de despejar los pines se prefirió cámaras que utilizaran conexión Flex o Usb. De esta manera se dejan disponibles para una futura aplicación de algún sensor. Este nuevo diseño cuenta con 3 cámaras, del mismo tipo que el prototipo número 1, pero con mejoras tanto en resolución como en sensibilidad, una cámara térmica, una cámara NIR monocromática y una cámara Pi v3 NoIR. Además como requerimiento directo del profesor Francisco Cereceda, se agregó una pantalla de 7 pulgadas que permitirá una mejor visualización de los datos, además de permitir una mejor interacción con el usuario, retroalimentando de mejor manera el proceso de medición. Esta se alimentará con una batería extra, evitando así una caída de tensión en la etapa de la alimentación de la Raspberry pi, tal como se aprecia en la figura 4.2.

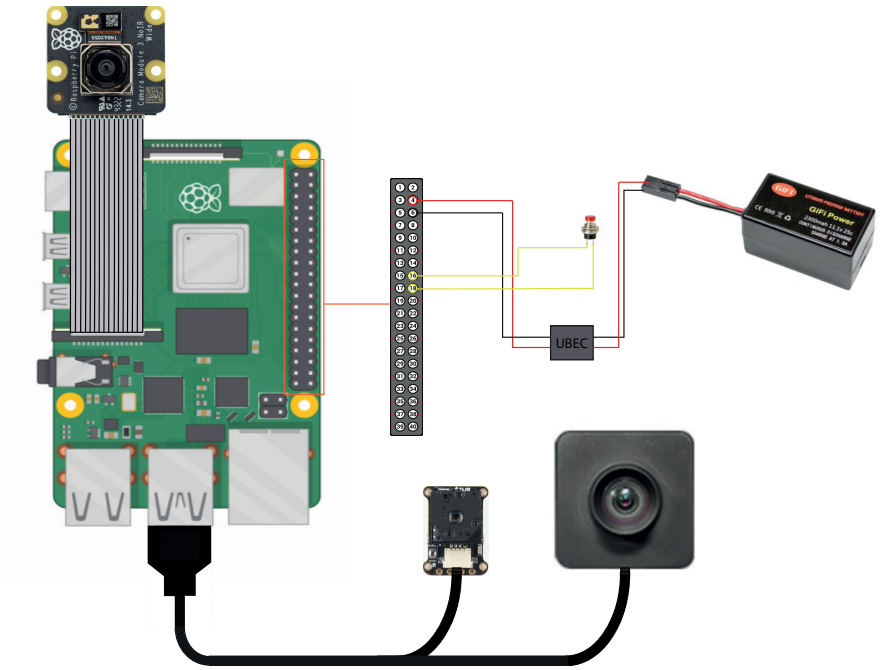


Figura 4.1: Diagrama de conexión del prototipo 2

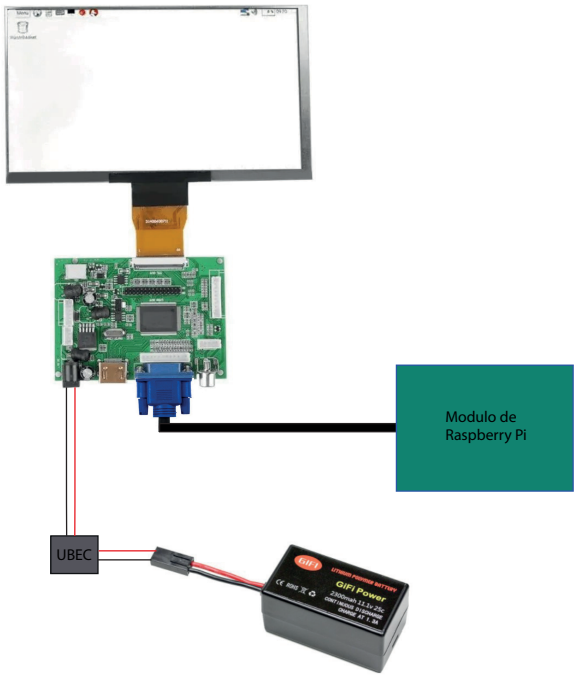


Figura 4.2: Diagrama de conexión del prototipo 2 etapa de video

Al igual que en el prototipo 1, este nuevo prototipo cuenta con una lista de elementos que se detallan a continuación:

- Raspberry Pi 4 B+
- Cámara Pi v3 NoIR
- Cámara NIR Monocromática
- Cámara Térmica Lepton 3.5
- Etapa de alimentación
- Disparador
- Pantalla

4.1.1. Cámara Térmica

La nueva elección de la cámara térmica se debe a que la cámara anterior no poseía la resolución necesaria para el proyecto, perdiendo parte de información relevante y deformando la imagen. La cámara térmica Lepton 3.5 posee una resolución de 160x120 píxeles, lo cual es suficiente para el proyecto, además de que posee un rango de temperatura de -10 a 150 grados Celsius. Para manejar las temperaturas contenidas en la imagen, se utiliza un archivo .log, que contendrá las temperaturas máximas y mínimas, junto a su ubicación píxel. Posteriormente, se podrá analizar generando una relación lineal entre el punto de mínima y máxima temperatura y asociando cada color de un pixel con una temperatura.

Como requerimientos de postprocesamiento, se han eliminado todas las marcas de agua y elementos informativos de la imagen térmica, para luego agregar esta información al archivo .log .

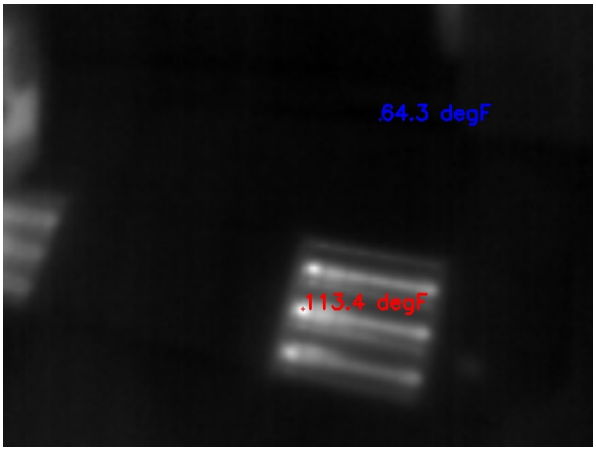


Figura 4.3: Imagen térmica con marcas informativas

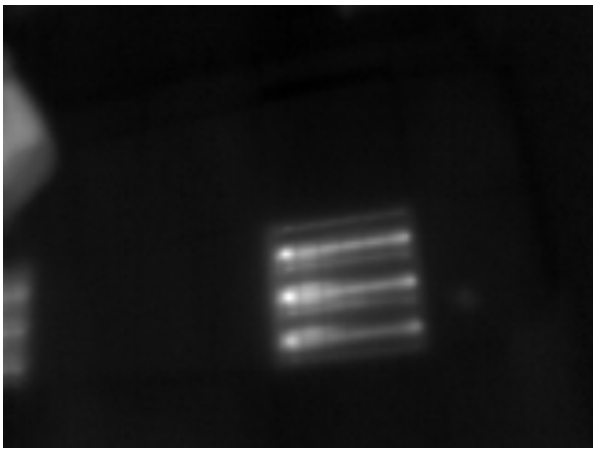


Figura 4.4: Imagen térmica sin marcas informativas

4.1.2. Cámara NIR Monocromática

Dado el problema de la cámara anterior y su sensibilidad a la estática, se decidió reemplazar la cámara por una nueva recubierta de una carcasa, la cual permitirá una mayor durabilidad y resistencia (como se aprecia en la figura 4.5).



Figura 4.5: Diagrama interno de la cámara NIR

4.1.3. Cámara Pi v3 NoIR

Este modelo de cámara posee 3 sensores, pero a diferencia de estar configurada de forma RGB, Red (635 nm), Green (520 nm) y Blue (445 nm), se ha eliminado el sensor del color azul y se han instalado otros sensores , sensibles a una radiación del espectro infrarrojo cercano (NIR) de 850 nm. Esta cámara genera una imagen RGN, pero representada en formato RGB, tal como se aprecia en la figura 4.6.



Figura 4.6: Visualización de la cámara Pi v3 NoIR

4.1.4. Módulo de Alimentación

Como mejora al prototipo anterior, sólo se agregará una batería extra que permita alimentar a la pantalla. Esto para evitar una caída de tensión en la etapa de alimentación de la Raspberry Pi, tal como se aprecia en la imagen 4.2.

4.1.5. Disparador

Para esta iteración del dispositivo y en base a charlas previas con el equipo de diseño de carcasa, se optó por cambiar el botón pulsador, por un pulsador y un switch. De esta manera es posible mantener el estado de uno de los botones y así interrumpir el código de premuestreo para poder cambiar al modo de captura específica 4.2.
En la práctica, esto significa que es posible alternar entre el modo de captura y el modo de vídeo utilizando el switch, y cambiar el tipo de cámara en el modo de vídeo con la pulsación de un botón)

4.1.6. Módulo de vídeo

Se incorporó una pantalla de 7 pulgadas para una mejor visualización de los datos, además de permitir una mejor interacción con el usuario, compartimentando de mejor manera el proceso de medición.

4.2. Rutina de Medición

Esta vez se manejarán 2 rutinas por separado, a diferencia del prototipo 1: una rutina que maneje la visualización de una cámara, mostrando en vídeo la vista de la cámara óptica como se aprecia en la figura 4.8; y otra rutina que maneje el muestreo y la adquisición de imágenes, centrándose solamente en adquirir y almacenar las imágenes, tal como se aprecia en la figura 4.9. Esta última rutina será activada como una interrupción sobre la rutina de vídeo (utilizando la misma idea aplicada para el prototipo 1, en la sección 3.2), deteniéndola y comenzando una adquisición de datos, sin vídeo, para de esta manera mantener una coherencia temporal entre las fotos, minimizando el tiempo de muestreo. Durante el fallo explicado en 4.5, el funcionamiento original de la rutina de vídeo se vio alterada y se reemplazó con la anteriormente explicada. En un principio, el funcionamiento original que se encuentra gráficado en la figura 4.7, consistía en que ademas de poder alternar entre modo vídeo y capturas, era posible alternar la vista a la cámara que el usuario estimara conveniente. De esta manera sería posible no sólo visualizar en un espectro para que el operador estimara la posición de la cámara al momento del muestreo.

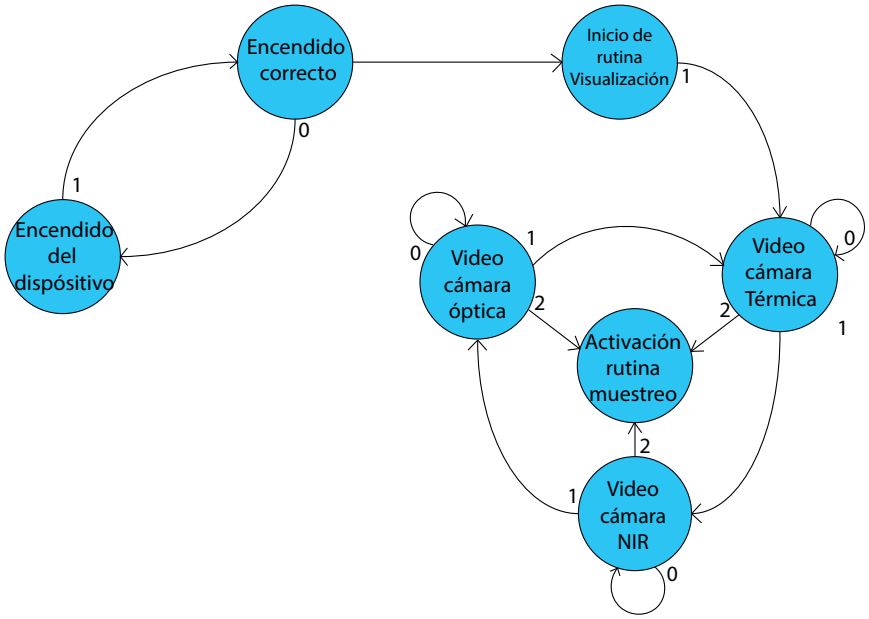


Figura 4.7: Máquina de estado asociada a la etapa de vídeo antes de la falla

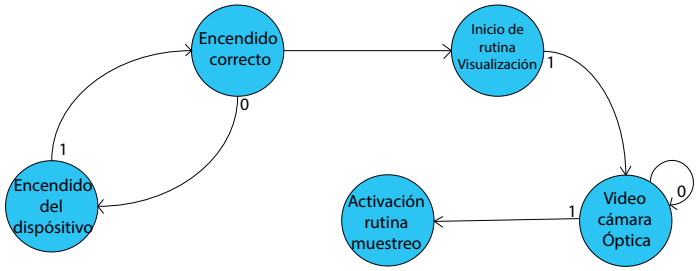


Figura 4.8: Máquina de estado asociada a la etapa de vídeo posterior a la falla

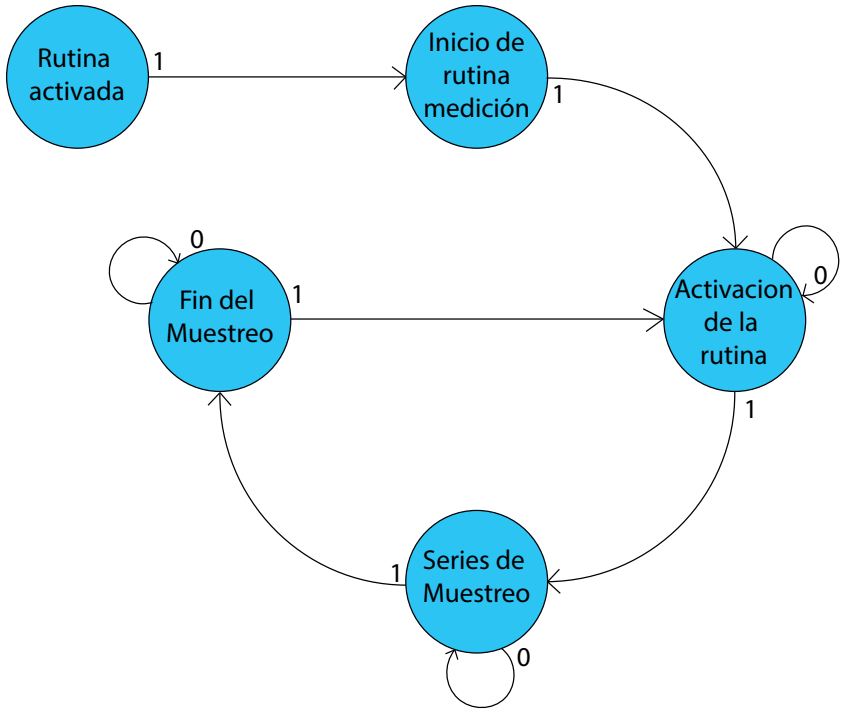


Figura 4.9: Máquina de estado asociada a la etapa de captura de imágenes

Con los ajustes aplicados, el diagrama de relación entre módulos quedaría como la figura 4.10 .

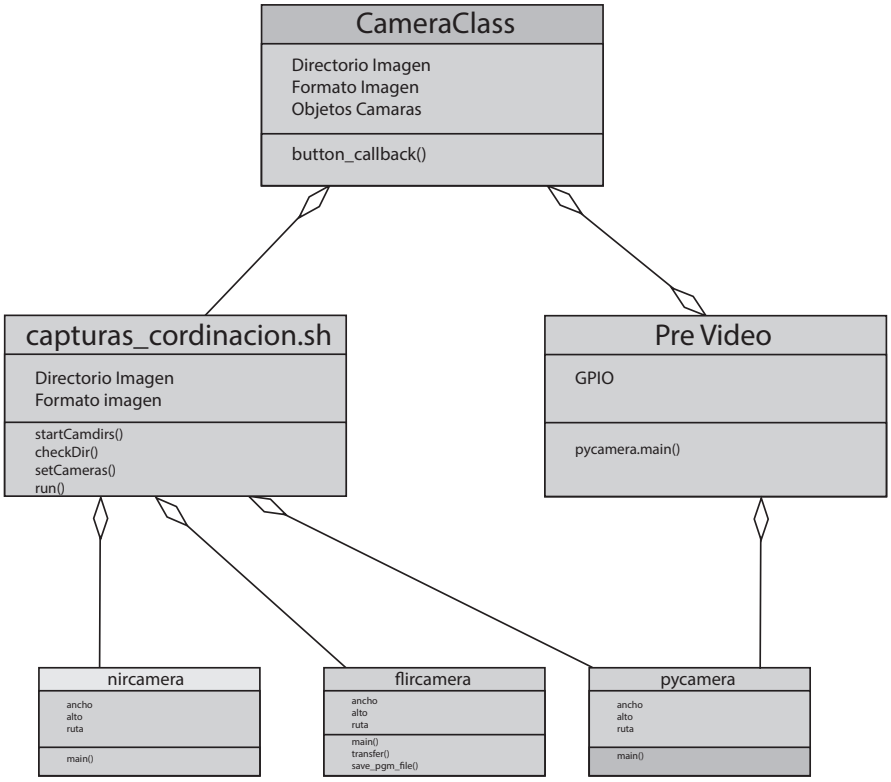


Figura 4.10: Relación entre módulos de software

Además hay que destacar que para un manejo eficiente de los procesos que se realizan de forma sincronizada, se ocupará un archivo .sh que cumpla la función de manejar los hilos de cada etapa.

La rutina que se utilizó para la obtención de datos, tuvo que ser modificada: el sistema operativo en conjunto con la API (GNOME) que se utilizó para el funcionamiento de las cámaras, es incompatible con las interrupciones de GPIO (como se observa en la figura 4.11), además de ser incompatible con comunicación entre procesos, quedando procesos zombies como se aprecia en la figura 4.12. Para resolver este problema y en preocupación del poco tiempo restante antes de la siguiente prueba, se utilizó python como lenguaje y un archivo con instrucciones bash. Además, como uno de los elementos a implementar para trabajo futuro, se evaluará la utilización de lenguajes no interpretativos, como C++ y C. De esta manera, el manejo de hilos se implementaría de manera manual, lo que se explicará a mayor detalle en la sección de Trabajo Futuro 6.2.

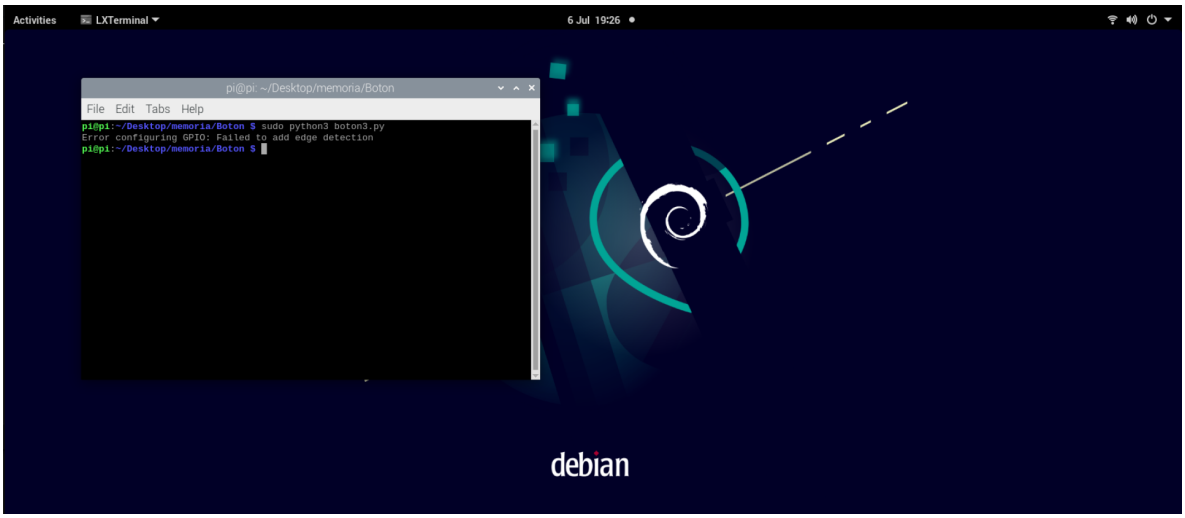


Figura 4.11: Aviso de incompatibilidad

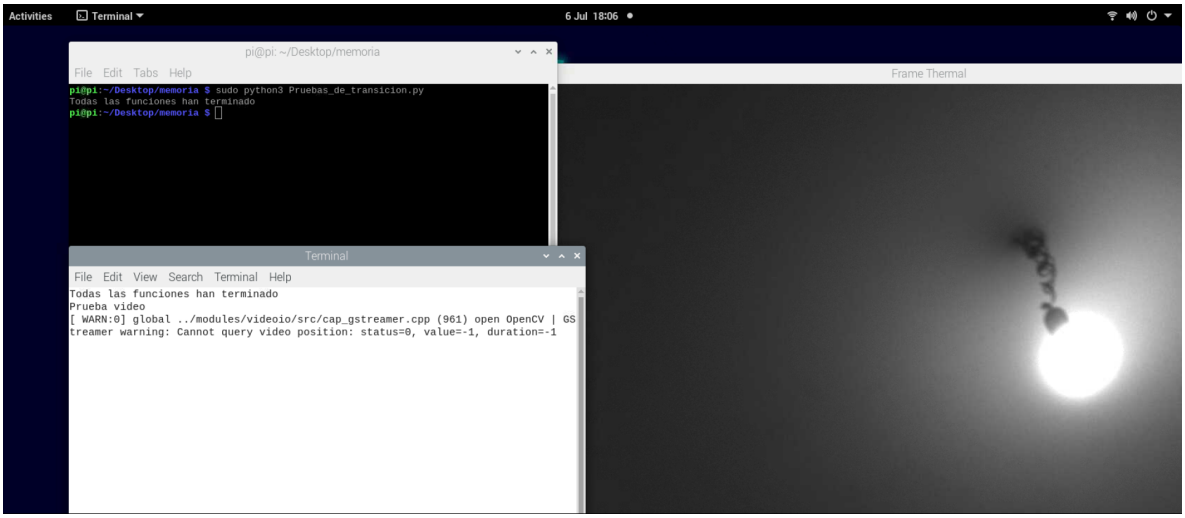


Figura 4.12: Proceso zombie no eliminado

En base a esto se utilizara la misma lógica de la maquinas de estado vistas en las figuras 4.8 y 4.9. Sólo se le aplicará detención cada x ciclos, con el propósito de saber el estado de los pines de manera manual, y cambiando los botones pulsadores por switches. Así simplemente perderemos un par de segundos cada x ciclos, siendo x un valor indicado por el usuario antes de cerrar el prototipo, tomando $x = 3$ para esta versión del prototipo.

4.2.1. Consumo Energético de la rutina de medición

Dado que existen etapas en las cuales el tiempo de consumo se vuelve indefinido, como en la etapa de vídeo cuando se intercambia entre cámaras, la duración de la batería se estimará entre un mínimo

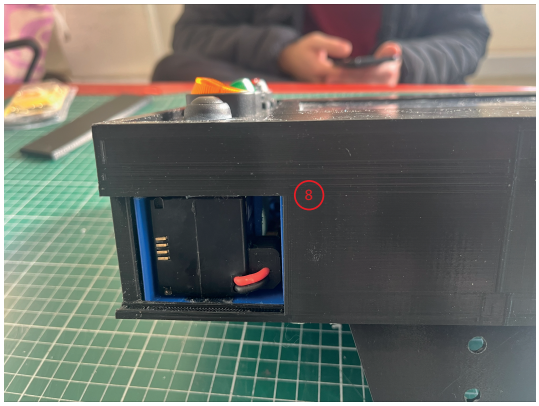
y un máximo, dando un rango de funcionamiento de la batería, dependiendo solamente del uso del prototipo qué tanto se extienda la duración de esta. Tal como se aprecia en la figura 4.2, la pantalla contará con su propia alimentación, dado que alimentar la Raspberry pi y la pantalla con la misma batería podría causar una caída de tensión. Durante las ultimas pruebas en terreno (5.1.1) se logro determinar que el tiempo de funcionamiento promedio del conjunto de Prototipo más pantalla es de 1 hora con 50 minutos

4.3. Nueva carcasa

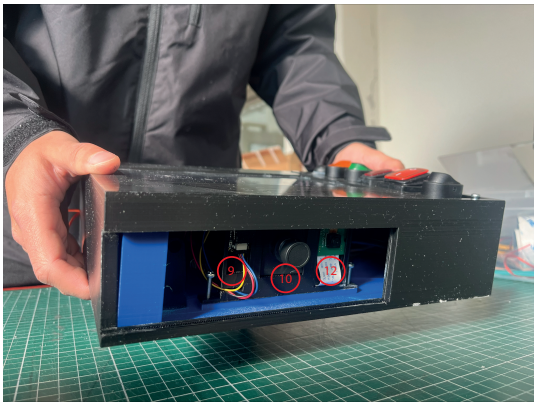
La nueva carcasa se encuentra en proceso de diseño, pero se espera que esta sea más resistente y que permita una mejor disipación del calor, al dejar más espacio entre los componentes, además de que permita un mejor acceso a las partes del prototipo en el caso de ser necesario un reemplazo o una actualización. Actualmente se dispone de lo descrito como carcasa número 2 (como se aprecia en la figura 4.13). No es la versión final, pero esta se utilizará para soportar al prototipo en la etapa de validación 4.5.



(a) Imagen superior



(b) Imagen izquierda



(c) Imagen derecha

Figura 4.13: Caras Carcasa

1. Pantalla
2. Botón paso rutina 2 a 1
3. Botón de respaldo
4. Botón paso rutina 1 a 2
5. Botón encendido Raspberry Pi
6. Botón encendido pantalla
7. Botón de respaldo
8. Batería (se utilizan 2 para este prototipo)

9. Cámara Térmica
10. Cámara NIR
11. Cámara Óptica

4.4. Etapa de Calibración

La etapa de calibración se realizará de manera similar a la del prototipo 1 (3.4), con la diferencia de que esta vez se llevarán a cabo dos calibraciones por separado: una calibración de homografía con lógica estéreo, utilizando pares de formatos, dado que se manejan tres tipos de imágenes. Esta calibración generará tres matrices de homografía y tres imágenes superpuestas para un análisis posterior. Además, se realizará una etapa de calibración de valores intrínsecos que servirá para corregir la distorsión de cada cámara.
Estas imágenes se obtuvieron a través de fotografiar un panel de calibración circular con perforaciones tal y como se explicó en el estado del arte 2.2.5. De esta manera, es posible calibrar tanto de manera óptica e infrarroja, como térmica.

4.4.1. Etapa para valores Intrínsecos

Para este caso fue necesario en una primera instancia, generar un número de muestras suficientes de cada cámara, para así poder compensar las distorsiones que son independientes para cada cámara, que por experiencias previas son mayores para la cámara térmica.

Como en este caso se realizó una calibración individual se entregarán 2 matrices por cámara. La primera matriz de 3x3 de la cámara contiene sus parámetros intrínsecos, como la distancia focal y el centro óptico. Se representa de la siguiente manera:

$$\begin{bmatrix} f_x & 0 & c_x \\ 0 & f_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

- (f_x) y (f_y) son las distancias focales en píxeles.
- (c_x) y (c_y) son las coordenadas del centro óptico.

Luego la segunda matriz corresponde a los coeficientes de distorsión, la cual corresponde a un vector que contiene los coeficientes de distorsión radial y tangencial. Puede tener 4, 5 o 8 parámetros, dependiendo del modelo de distorsión que se esté utilizando (para este caso se entrega un vector de 5 valores). Tal como se aprecia a continuación.

$$\begin{bmatrix} k_1 & k_2 & p_1 & p_2 & k_3 \end{bmatrix}$$

- (k_1, k_2, k_3) son los coeficientes de distorsión radial.
- (p_1, p_2) son los coeficientes de distorsión tangencial

Calibración Cámara Térmica

Dadas las dimensiones de esta (160x120), comparar una imagen térmica con una infrarroja u óptica ya es una tarea difícil debido al tamaño del píxel en comparación con las demás cámaras (de igual manera, fue posible hacerlo como se aprecia en la figura 4.14) . Por esta razón, es importante realizar una etapa de calibración de valores intrínsecos tanto para esta cámara como para las demás.

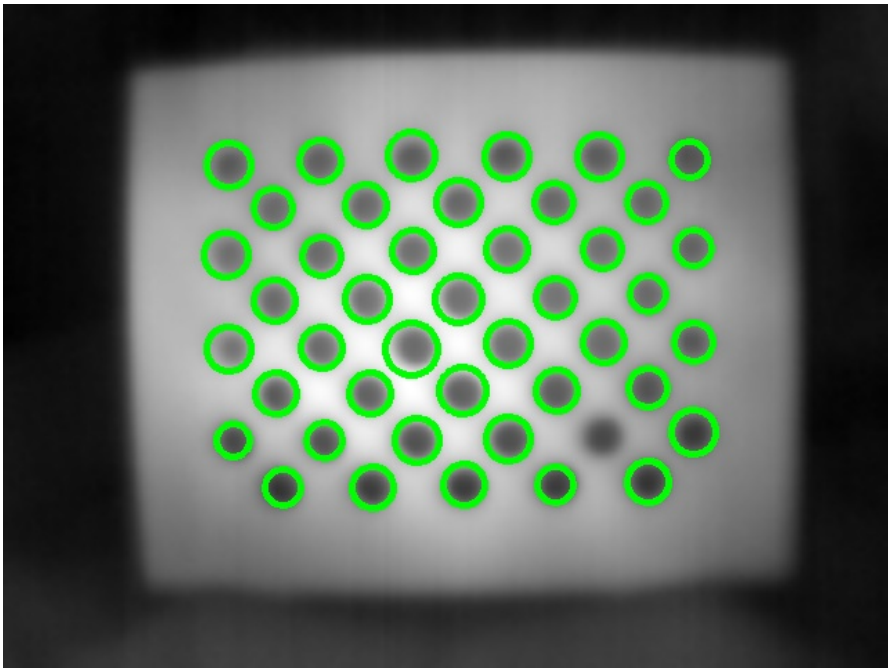


Figura 4.14: Calibración Cámara Térmica

Calibración Cámara NIR

Dada la saturación que ocurrio en esta cámara, fue difícil de calibrar. Aun así fue posible identificar los 44 orificios, de los cuales solo 22 serian necesarios para desarrollar una calibración, como se aprecia en la figura 4.15. De igual forma existieron problemas al detectar agujeros como se aprecia en la figura 4.16.

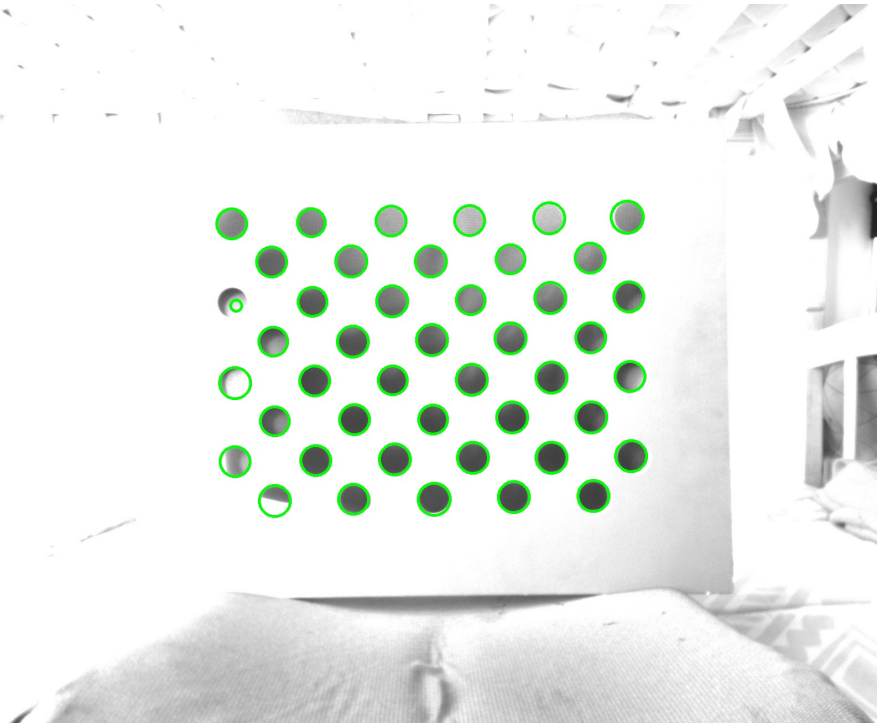


Figura 4.15: Calibración Cámara NIR

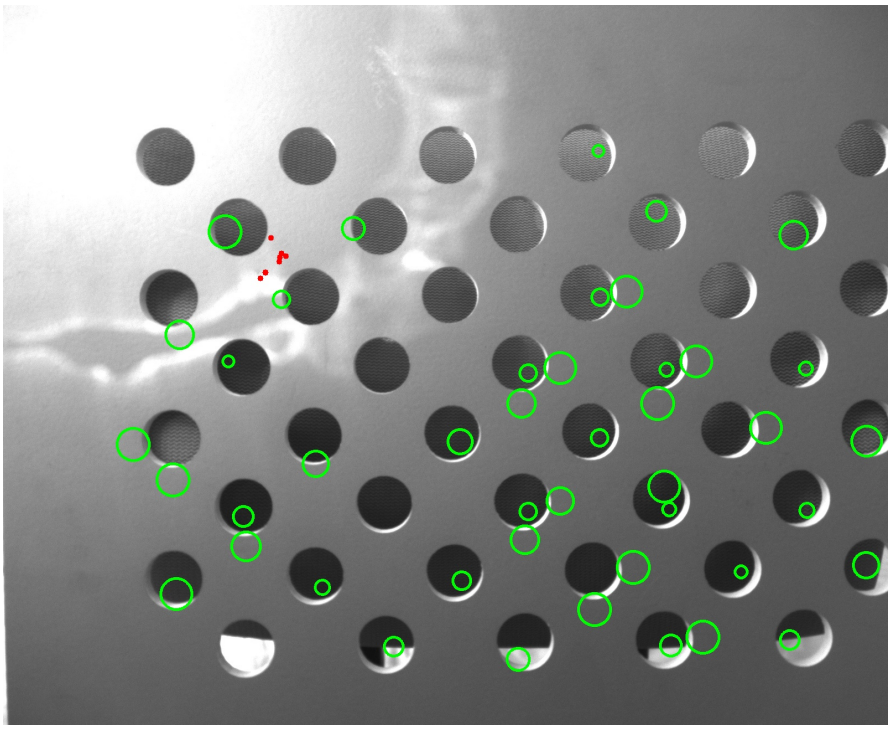


Figura 4.16: Calibración Cámara NIR Mala

Calibración Cámara Óptica

Esta calibración, fue la más difíciles de calibrar. El hecho de que el filtro NoIR eliminara parte del espectro de luz visible, complejizó la detección de los patrones circulares para generar la calibración. Aun así fue posible la realización de esta, como se aprecia en la figura 4.17.

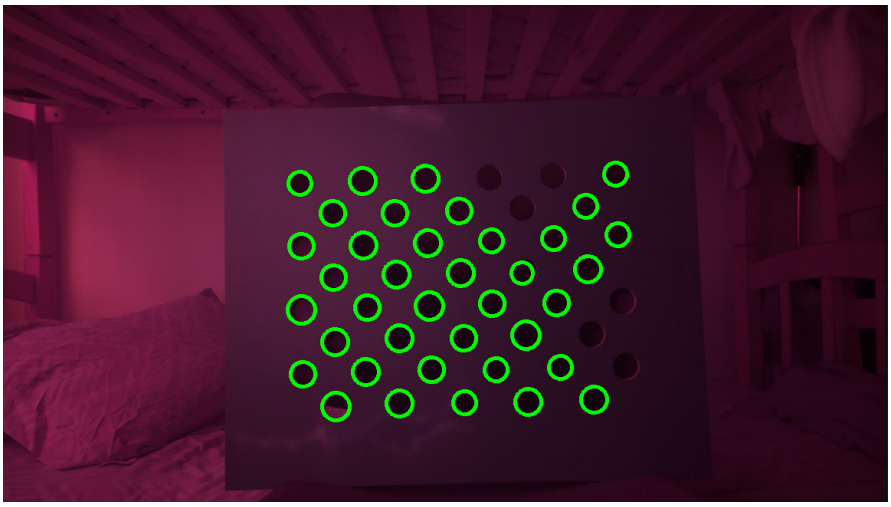


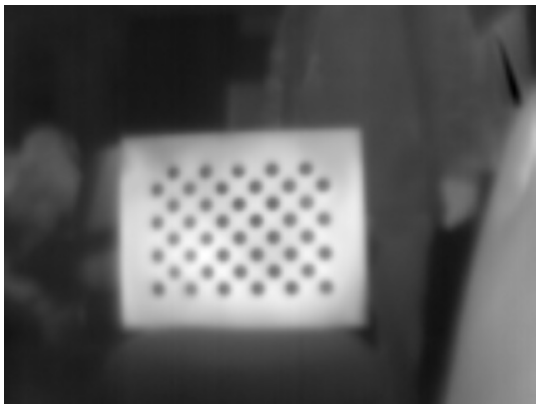
Figura 4.17: Calibración Cámara Optica

4.4.2. Etapa de homografía

Primero tenemos las imágenes de cada cámara, luego utilizando métodos de homografía y lógica de geometría proyectiva, obtenemos la matriz que corresponde a la traslación de las imágenes con tal de formar un plano conjunto donde ocurra la coherencia espacial. Las imágenes que se muestran a continuación 4.18 son las utilizadas para determinar la calibración estéreo.



(a) Imagen cámara PI NoIR 3



(b) Imagen cámara Térmica Lepton 3.5



(c) Imagen cámara NIR

Figura 4.18: Descripción general de las imágenes

Caso 1 Calibración estéreo cámara NIR y térmica

Notar que en los casos en los cuales se utilizó la cámara térmica, la calibración no será tan perfecta debido a las distorsiones que existen por la naturaleza de la cámara térmica. Tendremos la matriz asociada, a las imágenes de la cámara NIR, la cámara térmica, obteniendo además la imagen resultante 4.19.



Figura 4.19: Calibración Cámara NIR y Pi

Caso 2 Calibración estereo camara Pi y NIR

Tendremos el resultado de la comparación entre la imágenes de la cámara NIR, la cámara Pi v3 NoIR, en la figura 4.20.



Figura 4.20: Calibración Cámara Pi y NIR

Caso 3 Calibración estereo camara

Se presentará el resultado de la comparación entre las imágenes de la cámara térmica, la cámara Pi v3 NoIR, obteniendo además la figura resultante 4.21



Figura 4.21: Calibración de la cámara pi y térmica

4.5. Validación Prototipo 2

Durante las últimas etapas de pruebas se generó una falla en el dispositivo, el segundo prototipo sufrió un borrado de muchos de sus datos. Pese a que existía respaldo de la totalidad de códigos e información, el tiempo empleado en recuperar la funcionalidad completa del prototipo2 no dejo mayor tiempo para pruebas básicas antes de tener que empaquetar.

Capítulo 5

Expedición Portillo

5.1. Instalación

El prototipo 2 termino su armado el día 4 de agosto del 2024 (5.1), para ser llevado a la realización de pruebas en portillo el día 5 de agosto del mismo año. Para las pruebas se monto en un trípode con el objetivo de estar entre 1 metro a 65 centímetros de distancia de la superficie del suelo, siendo este el mínimo permitido por la pequeña resolución de la cámara térmica, ya que de ser superado el metro o más de distancian , el tamaño de cada pixel seria de 2.5cm cuadrados o más debido a la cantidad de pixeles en la imagen térmica (160x120 en este caso), imposibilitando su posterior análisis.



Figura 5.1: Armado Final prototipo 2 antes de su partida a la expedición en portillo

5.1.1. Experimento

Montado el prototipo en el trípode se dispusieron 2 superficies para las muestras, una nevada (figura 5.2) y una de teflón blanco (figura 5.3) el cual ayudara para en un futuro no tener que realizar las pruebas en nieve cada vez que se necesiten, si se puede demuestra el parecido de los datos en una superficie nevada y una de teflón. El contaminante escogido para este experimento fue carbón activo, definido por equipo de químicos de CETAM (Centro de Tecnología Ambientales)

Se generó una división de cuadrados de 16 × 24 cm en un cuadrado de 70 × 50 cm tal como se aprecia en la figura 5.3, de esta manera se fueron generando áreas de muestreo, partiendo desde un cuadrado sin concentraciones de contaminante, sirviendo como área de control, para posteriormente ir ascendiendo. Este experimento se realizó una vez sobre nieve y una vez sobre teflón, repetido 3 veces, con el objetivo de generar múltiples muestra y un mayor conjunto de muestreo, teniendo dispersabilidad en los datos, esto debido a que repetir una dispersión exacta en cada caso era prácticamente imposible, se opto por repetir el experimento múltiples veces y así generar un mayor conjunto de muestreo.



Figura 5.2: Armado Final prototipo 2 antes de su partida a la expedición en portillo

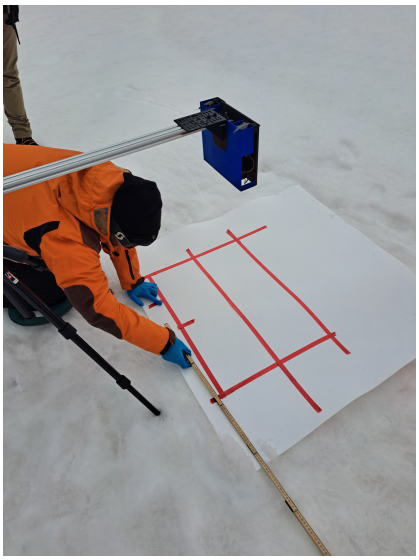


Figura 5.3: Armado Final prototipo 2 antes de su partida a la expedición en Portillo

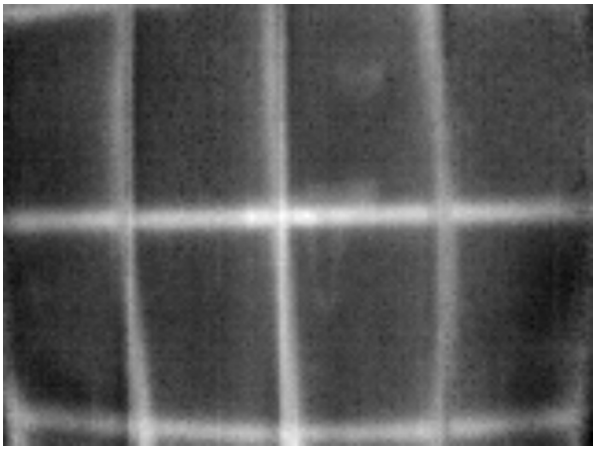


Figura 5.4: Grillas utilizadas para la realización del experimento desde una vista de la cámara térmica

Cabe destacar que la imagen anterior no está pasada a través de la matriz de calibración, ya que se ve una clara distorsiona sobre las lineas rectas en la figura 5.4.

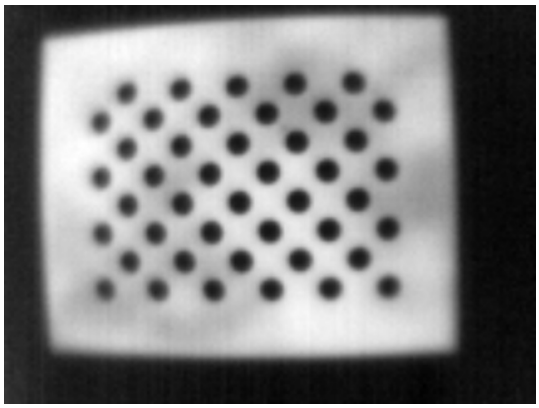
5.2. Rendimiento Prototipo 2

Durante el experimento el prototipo se desempeño de manera bastante optima tratándose sobre la rutina, a nivel de sensores solo 1 de las cámaras tubo complicaciones severas, la cámara NIR tubo un problema de saturación, esto debido a que el exceso de radiación incidente en la superficie saturaron los censores de la cámara en valores de 255 imposibilitando un posterior análisis (notar que existe una clara diferencia entre la figura 5.5a, imagen que se encuentra saturada con las figuras 5.5b y 5.5c).

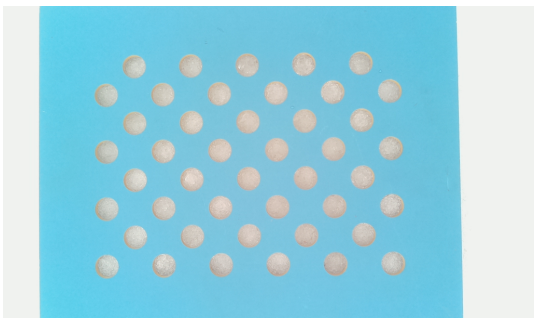
Por parte de las baterías el frió no afecto la durabilidad de aprox. 2 horas, con la complicación de que el cambio de estas debe hacerse en una zona de segura, aunque la expositivo al frió termino averiando una de las baterías dañando varias de sus celdas. Las demás cámaras no tuvieron inconvenientes



(a) Vista cámara NIR



(b) Vista cámara Térmica



(c) Vista cámara Óptica

Figura 5.5: Comparación de la vista entre imágenes

Capítulo 6

Conclusiones

6.1. Trabajo realizado

Durante una investigación sobre los trabajos realizados de manera anterior se estimo que podría existir una relación directa entre la concentración de BC y la temperatura de la superficie. Se propuso el diseño de un prototipos capaz de detectar concentraciones de BC, mediante la utilización de 3 cámaras que trabajan en distintos espectros de las ondas electromagnéticas. Mediante la utilización de tres tipos de cámaras, las cuales fueron, NIR, térmica y óptica, seria posible determinar tanto la concentración como la naturaleza de la emisión del contaminante que se encontraba en la superficie de la criósfera. El análisis de las imágenes del primer prototipo no pudo realizarse debido a un problema que surgió durante la construcción de la carcasa. Esto impidió recuperar datos viables que permitieran un análisis profundo de las imágenes, ya que todas estaban obstruidas por la lámina protectora de la carcasa. Esto se vio reparado al momento de realizar el ensamblaje del prototipo 2 buscando una exposición directa de los lentes para que no existiera interferencia en las mediciones, esto trajo la complicación de que pese a que fue posible obtener imágenes ópticas y térmicas con una resolución suficientes para una análisis, la exposición directa por parte de la cámara NIR, termino suturando sus sensores y evitando obtener imágenes que fuera útiles para un análisis. Al momento de colocar operativo este segundo prototipo se encontró que no solo fue buena idea colocar una pantalla para visualizar en tiempo real las imágenes obtenidas, si no que la cámara que mayor información aportaba a la ubicación y calibración del dispositivo en terreno era la cámara térmica, pese a que su baja resolución dificultaba muchas veces el experimento aun así otorgaba información esencial para este. Dado el funcionamiento registrado del prototipo 2 durante el desarrollo de la memoria y la expedición a Portillo 5, se da por logrado el objetivo específico de configurar y calibrar 1.4. Sin embargo, no se ha comprobado completamente la

hipótesis, ya que, aunque se logró diseñar un dispositivo con las características solicitadas, aún no se ha demostrado su eficacia en la estimación de concentraciones de BC debido a los fallos en la cámara NIR y la baja resolución de la cámara térmica. No obstante, sí se cumplió con la necesidad de abarcar una superficie significativa de muestreo, la cual podría ampliarse aún más con una cámara térmica de mayor resolución. Este punto se desarrolla posteriormente en la sección de trabajo futuro. Además, fue posible desarrollar un dispositivo bastante compacto, con una autonomía mínima de 2 horas, lo que permite su futura aplicación en un dron de monitoreo.

6.2. Trabajo Futuro

Durante las distintas etapas de este proyecto, surgieron nuevas necesidades y requerimientos que deben ser abordados en trabajos futuros. Entre estos, se incluye la reconfiguración del orden de las cámaras, colocando la cámara térmica en el centro para aumentar el área efectiva de muestreo. Además, es necesario desarrollar un filtro óptico analógico y uno por software para la cámara NIR, con el fin de resolver la saturación del sensor, garantizando adaptabilidad en condiciones de baja y alta exposición. También se propone mejorar el proceso de cambio de batería, para reducir la probabilidad de fallos por exposición a bajas temperaturas, y adquirir baterías de mayor duración que permitan realizar experimentos más extensos. Otra mejora incluye diseñar una nueva carcasa que facilite un ensamblaje y desarmado más eficiente y rápido. Asimismo, la incorporación de un sensor de distancia eliminaría la necesidad de mediciones manuales constantes. Finalmente, se recomienda utilizar una cámara térmica de mayor resolución, lo cual permitiría obtener mediciones más precisas a mayor distancia de la superficie. Esto abre la posibilidad de incorporar el prototipo en un dron con el objetivo de realizar un monitoreo geolocalizado. Como último objetivo a plantear en trabajos futuros, se sugiere la adquisición de un nuevo sistema en reemplazo de la Raspberry Pi 4 utilizada. De esta manera, sería posible incluir un análisis previo de las imágenes e incluso obtener directamente las concentraciones de BC.

Bibliografía

[Cao et al., 2018] Cao, C., Lee, X., Muhlhausen, J., Bonneau, L., and Xu, J. (2018). Measuring landscape albedo using unmanned aerial vehicles. *Remote Sensing*, 10(11):1812.

[Figueroa-Villanueva et al., 2023] Figueroa-Villanueva, L., Castro, L., Bolaño-Ortiz, T. R., Flores, R. P., Pacheco-Ferrada, D., and Cereceda-Balic, F. (2023). Changes in snow surface albedo and radiative forcing in the chilean central andes measured by in situ and remote sensing data. *Water*, 15(18):3198.

[Lu et al., 2021] Lu, Y., Rahman, M. A., Moore, N. W., and Golrokh, A. J. (2021). Lab-controlled experimental evaluation of heat-reflective coatings by increasing surface albedo for cool pavements in urban areas. *Coatings*, 12(1):7.

[Montpetit et al., 2012] Montpetit, B., Royer, A., Langlois, A., Cliche, P., Roy, A., Champollion, N., Picard, G., Domine, F., and Obbard, R. (2012). New shortwave infrared albedo measurements for snow specific surface area retrieval. *Journal of Glaciology*, 58(211):941–952.

[Rengarajan et al., 2000] Rengarajan, G., Weihs, P., Simic, S., Mikielewicz, W., and Laube, W. (2000). Albedo measurement system for uva and the visible wavelength. *Radiation protection dosimetry*, 91(1-3):197–199.

[Rönkkö et al., 2023] Rönkkö, T., Saarikoski, S., Kuittinen, N., Karjalainen, P., Keskinen, H., Järvinen, A., Mylläri, F., Aakko-Saksa, P., and Timonen, H. (2023). Review of black carbon emission factors from different anthropogenic sources. *Environmental Research Letters*, 18(3):033004.