

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Desarrollo de sistema biométrico a partir de la
anatomía vascular del dedo índice.

Autor: Francisco José Garrido Flores

Tutores: Manuel Ángel Perales Esteve y María del Mar Elena Pérez

Dpto. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021



Proyecto Fin de Grado
Grado en Ingeniería Electrónica, Robótica y Mecatrónica

Desarrollo de sistema biométrico a partir de la anatomía vascular del dedo índice.

Autor:

Francisco José Garrido Flores

Tutores:

Manuel Ángel Perales Esteve

Profesor Titular de Universidad

María del Mar Elena Pérez

Profesor Contratado Doctor

Dpto. de Ingeniería Electrónica
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2021

Proyecto Fin de Grado: Desarrollo de sistema biométrico a partir de la anatomía vascular del dedo índice.

Autor: Francisco José Garrido Flores

Tutores: Manuel Ángel Perales Esteve
María del Mar Elena Pérez

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2021

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis profesores

Agradecimientos

La ingeniería no ha sido precisamente un camino de rosas. El trayecto ha estado plagado de baches y obstáculos que han hecho que en múltiples ocasiones me cuestione el fruto de mi trabajo. No obstante, poder superar estos reveses es parte de ser un buen ingeniero. El grado me ha enseñado a no rendirme nunca y a trabajar sin descanso disfrutando de ello. Es por eso por lo que quiero, desde aquí, agradecer profundamente la dedicación que los profesores han tenido por ofrecernos una docencia que nos ha ayudado a todos los alumnos a asimilar los conceptos necesarios para convertirnos en futuros ingenieros.

Por supuesto, no habría sido capaz de seguir adelante si no fuera por mi familia, la que siempre ha creído en mí más que nadie, motivándome siempre a seguir adelante y siendo siempre positivos. Desde aquí doy las gracias a mi familia, especialmente a mi madre, que ha estado siempre a mi lado, apoyándome de todas las maneras posibles. A todos, os quiero.

Tampoco hubiera sido lo mismo si no fuera por mis maravillosos amigos, los cuales siempre me han apoyado, han creído en mí y me ayudan continuamente a desconectar pacíficamente del trabajo. Sin vosotros no hubiera sido lo mismo. Gracias Isaac. Gracias Valentín. Gracias Sergio. Gracias Tomás. Gracias David(es).

Por último, quiero mandar un enorme agradecimiento a mi querida novia. Gracias por estar siempre ahí apoyándome e intentando ayudarme en mi trabajo (aunque no te deje). Por todo esto y mucho más; muchas gracias, Ángela. Te quiero.

Francisco José Garrido Flores

Sevilla, 2021

Hoy en día, es algo muy típico y estandarizado verificar la identidad de alguien mediante medidas biométricas. El ejemplo más evidente son los teléfonos móviles inteligentes, los cuales (en su mayoría) incluyen un lector de huellas dactilares, para facilitar el desbloqueo del dispositivo al usuario.

No obstante, existen otros tipos de medidas biométricas para identificar unívocamente a una persona, como puede ser el patrón de la retina o el patrón de venas y arterias que se encuentra debajo de un dedo de la mano. A este último caso lo denominaremos vascularidad del dedo y es el objeto de estudio de este trabajo académico.

Esta tecnología se encuentra en auge, y en diversas partes del mundo se utilizan lectores biométricos de este tipo para la identificación segura de personas en cajeros automáticos. El mayor exponente de este caso es Japón. Se utiliza este tipo de medida biométrica porque es mucho más segura que las medidas descritas anteriormente, ya que además, es muy difícil engañar al lector, algo que no sucede en los casos anteriores, siendo la biometría vascular la seguridad que devuelve menos falsas aceptaciones.

Abstract

Nowadays, verifying someone's identity by biometric measures is something quite common and standardized. The most obvious example is smartphones. Most of them already include a fingerprint sensor to ease the unlocking of the device to the user.

Nevertheless, more types of biometric measures that can identify a person unmistakably do exist. Examples are retina scan, or the pattern of the veins and arteries placed under the finger of a hand. This last case is called vascular anatomy of the finger and is an object of study in this academic work.

This technology is currently rising, and biometric readers of this type can be found in some countries. These are used to identify a person securely in ATMs. The greatest exponent of this case is Japan. This kind of measure is used because it is safer than the other types of measures described in this abstract. In addition, it is rather difficult to deceive this sensor, something that does not happen in the previous cases; being vascular biometry the security that return less false acceptances.

| | |
|--|-------------|
| Agradecimientos | ix |
| Resumen | xi |
| Abstract | xii |
| Índice | xiii |
| Índice de Tablas | xv |
| Índice de Figuras | xvii |
| Notación | xix |
| 1 Introducción | 11 |
| 1.1. Contexto | 11 |
| 1.2. Descripción del problema | 11 |
| 1.3. Estado del arte | 12 |
| 1.4. Solución propuesta | 14 |
| 1.4.1 Alcance | 14 |
| 1.4.2 Calendario de entregables | 15 |
| 1.4.3 Diseño | 17 |
| 2 Laboratorio | 21 |
| 2.1. Electrónica para la iluminación | 21 |
| 2.2. Ordenador a bordo | 25 |
| 2.2.1 NVIDIA Jetson Nano [8] | 25 |
| 2.2.2 Otras opciones | 25 |
| 2.3. Diseño e impresión de las piezas | 26 |
| 2.3.3 Tapa inferior | 26 |
| 2.3.4 Pieza principal | 26 |
| 2.3.5 Módulo dedo | 27 |
| 2.3.6 Módulo LED | 27 |
| 2.3.7 Tapa superior | 28 |
| 2.4. Montaje del prototipo | 28 |
| 3 Diseño del Software | 29 |
| 3.1. Entorno de programación | 29 |
| 3.2. Captación de imágenes e iluminación | 29 |
| 3.3. Preprocesamiento de imagen | 30 |
| 3.1.1 | 30 |
| 3.3.1 Umbralización del dedo | 30 |
| 3.3.2 Ajuste de contraste | 30 |
| 3.3.3 Filtrado en frecuencia | 31 |
| 3.3.4 Binarización de la imagen | 32 |
| 3.4. Obtención de puntos característicos | 33 |
| 3.5. Base de datos | 35 |
| 3.5.1 Creación de DB | 35 |

| | | |
|---|-----------------------------------|-----------|
| 3.5.2 | Escritura de datos | 36 |
| 3.5.3 | Lectura de datos | 37 |
| 3.5.4 | Búsqueda de la mejor coincidencia | 38 |
| Referencias | | 41 |
| Anexo A: Instalación de OpenCV 4 | | 43 |
| Anexo B: Código de webcam.cpp | | 45 |
| Anexo C: Código de main.cpp (Ubuntu) | | 47 |

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-1: Matriz de verificación

15

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Ilustración 1-0-1: Cajero con biometría vascular en Polonia [22] | 12 |
| Ilustración 1-0-2: Tipos de tecnologías de iluminación para obtener la vascularidad del dedo [23] | 12 |
| Ilustración 1-0-3: Diagrama de bloques para la identificación por patrón vascular [23] | 13 |
| Ilustración 1-0-4: Comparación entre métodos de iluminación por reflexión y directa [23] | 13 |
| Ilustración 1-0-5: Pieza principal | 17 |
| Ilustración 1-0-6: Módulo LED | 18 |
| Ilustración 1-0-7: Módulo dedo | 18 |
| Ilustración 1-0-8: Tapa superior | 18 |
| Ilustración 1-0-9: Tapa inferior | 18 |
| Ilustración 1-0-10: Montaje completo | 19 |
| Ilustración 2-1: Esquemático de conexión de la placa de alimentación LED | 22 |
| Ilustración 2-2: Rutado de la placa de alimentación LED | 22 |
| Ilustración 2-3: Muestra de encaje de PCB | 23 |
| Ilustración 2-4: PCB | 23 |
| Ilustración 2-5: Conector PCB-Ordenador | 23 |
| Ilustración 2-6: PCB alternativa | 24 |
| Ilustración 2-7: Montaje de prueba con Arduino | 24 |
| Ilustración 2-8: NVIDIA Jetson Nano Developer Kit [8] | 25 |
| Ilustración 2-9: Iteraciones de tapa inferior | 26 |
| Ilustración 2-10: Iteraciones de pieza principal | 26 |
| Ilustración 2-11: Detalle módulo dedo | 27 |
| Ilustración 2-12: Iteraciones de módulo dedo | 27 |
| Ilustración 2-13: Iteraciones de módulo LED | 27 |
| Ilustración 2-14: Iteraciones de la tapa superior | 28 |
| Ilustración 2-15: Conexión de cableado | 28 |
| Ilustración 3-1: Imagen de dedo sin preprocesamiento | 30 |
| Ilustración 3-2: Máscara de dedo | 30 |
| Ilustración 3-3: Dedo umbralizado | 30 |
| Ilustración 3-4: Resultado de igualación de histograma adaptativa | 30 |
| Ilustración 3-5: Aplicación de filtros en frecuencia | 31 |
| Ilustración 3-6: Máscara CGF: Partes real y compleja | 32 |
| Ilustración 3-7: Aplicación de CGF | 32 |
| Ilustración 3-8: Comparación características ORB | 34 |
| Ilustración 3-9: Comparación características KAZE | 34 |

| | |
|--|----|
| Ilustración 3-10: Comparación características SURF | 34 |
| Ilustración 3-11: Comparación características SIFT | 34 |
| Ilustración 3-12: Creación de una tabla en DB Browser for SQLite | 36 |
| Ilustración 3-13: Diagrama de flujo de función de búsqueda de mejor coincidencia | 39 |

| | |
|-------|--|
| FAR | False Acceptance Ratio |
| API | Application Programming Interface |
| SIFT | Scale Invariant Feature Transform |
| SURF | Speeded-Up Robust Features |
| ORB | Oriented FAST and Rotated BRIEF |
| NIR | Near InfraRed |
| CLAHE | Contrast Limited Adaptive Histogram Equalization |
| LED | Light-Emitting Diode |
| PCB | Printed Circuit Board |
| IR | Infrarrojo/Infrared |
| RAM | Random Access Memory |
| SBC | Single Board Computer |
| RP4 | <i>Raspberry Pi 4</i> |
| ARM | Advanced RISC Machine |
| ABS | Acrylonitrile Butadiene Styrene |
| IC | Integrated Circuit |
| IDE | Integrated Development Environment |
| CGF | Circular Gabor Filter |
| OS | Operative System |
| FLANN | Fast Library for Approximate Nearest Neighbors |
| DB | Database |
| SQL | Structured Query Language |

1 INTRODUCCIÓN

Sólo hay un bien: El conocimiento. Sólo hay un mal: La ignorancia.

Sócrates, 470 AC - 399 AC

En este primer capítulo se realizará una introducción al proyecto con el fin de colocar al lector en contexto y se expondrán los motivos por los cuales el trabajo fue elegido. Además, se describirán ligeramente los problemas a los que nos enfrentaremos y las soluciones y caminos tomados.

1.1. Contexto

Hoy en día, todo el mundo tiene en su teléfono móvil inteligente un sensor de huellas dactilares. A todos nos gusta porque es muy rápido y nos evita tener que escribir manualmente una contraseña o patrón. El pensamiento generalizado es, además, que es un sistema muy seguro, ya que sólo funciona con tu huella dactilar. Realmente, esto no es exactamente así.

Como cualquier sistema de seguridad, las medidas biométricas tampoco son completamente impenetrables, y en concreto, la huella dactilar es de las medidas biométricas menos seguras. Esto es así porque los sensores de huella dactilar tienen una ratio conocida como ratio de falsas aceptaciones (FAR de ahora en adelante) más alto que en otros sistemas biométricos de seguridad. Esto quiere decir que existe una probabilidad de que cualquier persona distinta a la autorizada consiga entrar en el dispositivo sin permiso. Es por ello por lo que la huella dactilar no es utilizada en aplicaciones de muy alta seguridad.

En caso de necesitar una muy alta seguridad, y por tanto, un bajo FAR; recurrimos a otras medidas biométricas como pueden ser el escáner de retina, vascularidad ocular o vascularidad de la palma de la mano o dedos. De estas medidas de seguridad, las que utilizan la anatomía vascular de una persona son considerablemente más seguras que la huella dactilar o incluso el escáner de retina. Este último ofrece una buena seguridad, pero como contrapartida, su costo es extremadamente elevado con respecto a los escáneres de vascularidad del dedo.

Por lo tanto, llegamos así a la conclusión de que se puede realizar un sistema muy seguro con un costo bajo y es por ello; que en este trabajo académico hemos optado por realizar un escáner que sea capaz de identificar a una persona mediante la vascularidad de su dedo índice.

1.2. Descripción del problema

Se plantea un problema a la hora de identificar personas de manera fiable. Actualmente, la forma más extendida de esto es la identificación mediante huella dactilar. Sin embargo, como se ha descrito anteriormente, esta medida no es completamente fiable e incluso a través de una simple foto es posible obtener las huellas dactilares de una persona sin su consentimiento. Es por esto por lo que se plantea recurrir a un sistema más fiable y seguro, como puede ser la identificación a través de la vascularidad del dedo índice de una persona.

Este tipo de sensores, ya existen y se pueden encontrar en el mercado. Sin embargo, el coste de estos

dispositivos los hace muy poco competentes en el mercado y por lo tanto, son usados en muy pocas aplicaciones. Es por ello, que en la propuesta de proyecto se plantea conseguir un sensor de este tipo a un precio competitivo aunque con características reducidas.

Por lo tanto, se propone como solución un sistema simplificado que consta de una cámara sin filtro infrarrojo, varias luces en el espectro infrarrojo cercano (de ahora en adelante, NIR), un ordenador para procesar las imágenes y una carcasa para mantener todo en su lugar.

1.3. Estado del arte

La identificación de personas mediante medidas biométricas está presente desde hace ya bastantes años. Sin embargo, la identificación mediante el patrón vascular del dedo de la mano es una tecnología relativamente reciente, y el primer dispositivo comercial llegó de las manos de *Hitachi* en 1997 [1]. Sin embargo, la patente más antigua [2] corresponde a un inventor francés en el año 1984, que ideó esta tecnología debido a que le fue robada su identidad bancaria. Hoy en día, esta tecnología se utiliza en cajeros alrededor de todo el mundo, incluyendo Japón, China y Polonia.



Ilustración 1-0-1: Cajero con biometría vascular en Polonia [22]

Dentro de los sensores de este tipo, hay diversas maneras de tomar las medidas. En primer lugar, como en la figura anterior, se puede utilizar tecnología de reflexión; es decir, la luz se refleja en el dedo y la cámara capta el producto de esta reflexión de luz. Sin embargo, existen más tecnologías, como la transmisión de luz, en la que la luz atraviesa el dedo y la cámara capta la imagen desde el otro lado. Por último, también existe la posibilidad de iluminar el dedo desde ambos laterales y captar la imagen desde abajo. Estas tecnologías se pueden ver de forma gráfica en las figuras de abajo:

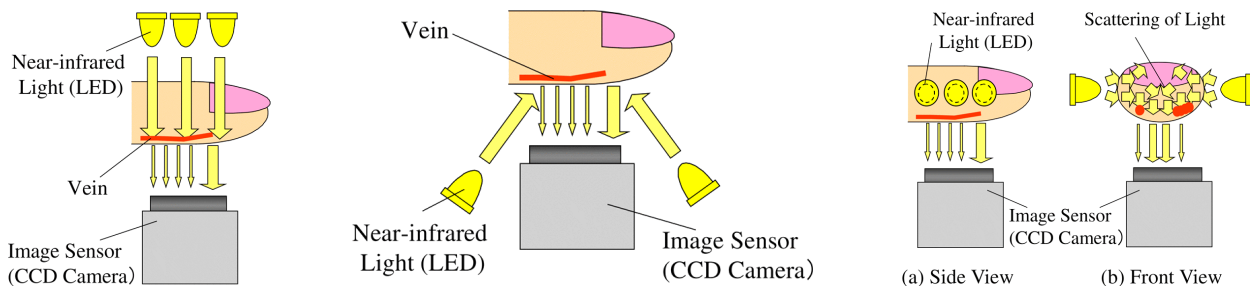
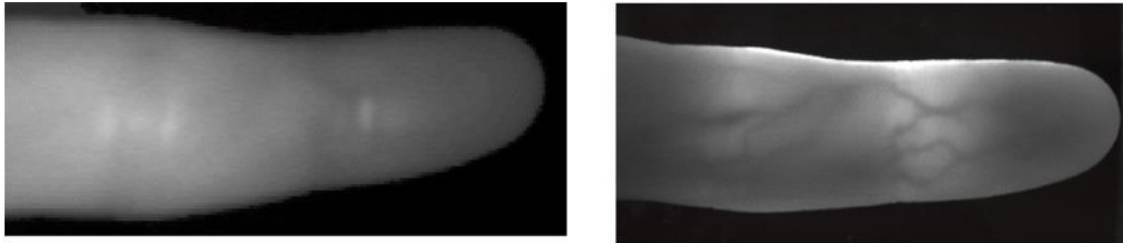


Ilustración 1-0-2: Tipos de tecnologías de iluminación para obtener la vascularidad del dedo [23]

Observando los tipos de tecnologías anteriores, consideramos que la solución más sencilla es utilizar la tecnología de iluminación directa, que tal y como se puede observar en la siguiente figura, otorga resultados más prometedores que la captura por reflexión. En la siguiente figura, también podemos observar el esquema de diseño que seguiremos en el proyecto.



(a) Imaging using Reflecting Light (b) Imaging using Transmitting Light

Ilustración 1-0-4: Comparación entre métodos de iluminación por reflexión y directa [23]

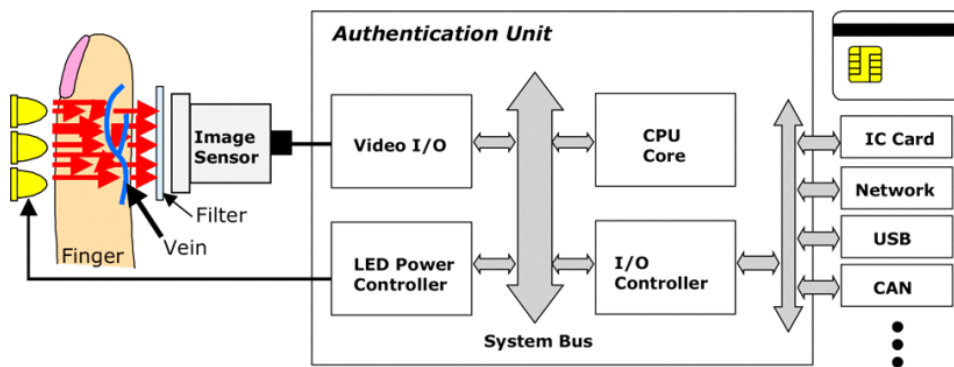


Ilustración 1-0-3: Diagrama de bloques para la identificación por patrón vascular [23]

1.4. Solución propuesta

En este apartado se describirán los objetivos y requisitos del proyecto a realizar así como las decisiones tomadas que influyen en el resultado del trabajo.

1.4.1 Alcance

1.4.1.1 Objetivos

- OBJ.1: El sistema debe ser capaz de tomar imágenes en el espectro *NIR*.
- OBJ.2: El sistema debe ser capaz de obtener la vascularidad del dedo índice de un sujeto cualquiera.
- OBJ.3: El sistema debe ser capaz de detectar patrones característicos de imágenes binarias.

1.4.1.2 Requisitos

- F.1: El sistema será capaz de obtener imágenes.
- P.1.1: La resolución de las imágenes no debe ser inferior a 640x480.
- P.1.2: El espectro capturado por la cámara debe incluir el infrarrojo cercano.
- F.2: El sistema será capaz de realizar procesamiento de imágenes.
- P.2.1: El sistema debe procesar las imágenes mediante *OpenCV4* [3].
- F.3: El sistema debe ser capaz de obtener la vascularidad del dedo índice mediante el transpaso de luz *NIR* a través de éste.
- P.3.1: La vascularidad obtenida debe formatearse en una imagen binaria.
- P.3.2: El sistema debe utilizar luz *NIR* en las longitudes de onda de 890nm y 940nm pico conjuntamente.
- F.4: El sistema debe ser capaz de identificar puntos característicos en imágenes binarias.
- P.4.1: El sistema detectará puntos clave mediante los métodos *SIFT*, *SURF*, *ORB* o *KAZE* [4].
- F.5: El sistema debería ser capaz de reconocer a una persona mediante la vascularidad de su dedo índice.
- F.6: El sistema debería incluir una base de datos para el reconocimiento de personas.
- P.6.1: La base de datos contendrá los puntos característicos de la vascularidad del dedo índice de varias personas.
- O.1: La captura de imágenes se realizará mediante la pulsación de una tecla.
- SEC.1: El sistema no debe causar daño alguno al usuario.
- SAF.1: La base de datos del sistema debería estar protegida mediante encriptación.
- C.1: El presupuesto máximo del proyecto será de 150 euros.
- C.2: El procesamiento se debe realizar sobre una *Raspberry Pi 4* (4GB).
- C.3: La captura de imágenes se debe realizar mediante la cámara *Raspberry Pi NoIR Camera*.
- C.4: El sistema debe contar con una fuente de alimentación externa tipo *USB-C* de 5V con una potencia mínima de 15W.
- C.5: La salida de vídeo del sistema debe conectarse a un monitor externo.
- C.6: La cámara debe estar a 9cm del dedo índice del usuario.

1.4.2 Calendario de entregables

1.4.2.1 Criterios de aceptación

El proyecto se aceptará cuando se hayan implementado y verificado todos los requisitos según la matriz de verificación del siguiente apartado.

1.4.2.2 Matriz de verificación

| Requisito | Nombre requisito | I | A | D | T | Nombre prueba | Estado |
|-----------|---------------------------|---|---|---|---|--------------------------------|-----------|
| F.1 | Adquisición de imágenes | | | X | | Test1 | Terminado |
| P.1.1 | Resolución | | | X | | Test1 | Terminado |
| P.1.2 | Espectro | | | X | | Test1 | Terminado |
| P.1.3 | Captura por pulsación | | | | X | Test1, Test2 | Terminado |
| F.2 | Procesamiento de imágenes | | X | | | Instalación <i>OpenCV4</i> [3] | Terminado |
| F.3 | Vascularidad | | | X | X | Test3 | Terminado |
| P.3.1 | Binarización | | | | X | Test3, Test4 | Terminado |
| P.3.2 | Luz <i>NIR</i> | | X | | | Estudio <i>datasheet</i> | Terminado |
| F.4 | Puntos característicos | | | | X | Test4, Test5 | Terminado |
| F.5 | Reconocimiento | | | | X | Test5, Test6 | Pendiente |
| P.5.1 | Base de datos | | X | | | Creación base de datos | Pendiente |

Tabla 1-1: Matriz de verificación

1.4.2.3 Plan de pruebas

- Análisis 1: Adquisición de imágenes.
 - Nombre de la prueba: Test1.
 - Descripción: El sistema debe tomar una o varias imágenes en las que se pueda ver que cumple con la resolución mínima requerida y se observe que se incluye el espectro infrarrojo cercano.
 - Realización: Se crea un código fuente con *OpenCV4* [3] y *C++* que capture imágenes y las muestre por pantalla en bucle, creando así una especie de *webcam NIR*. Posteriormente se ejecuta el programa resultado de la compilación y se observa el resultado.
- Análisis 2: Captura por pulsación.
 - Nombre de la prueba: Test2.
 - Descripción: El sistema debe tomar una única imagen cuando se presione una tecla en el mismo. Posteriormente, se muestra la imagen capturada por pantalla.
 - Realización: Se crea un código fuente con *OpenCV4* [3] que ejecute el programa cuando se pulse una tecla cualquiera a excepción de la tecla *ESC*, que es utilizada para terminar el programa. Posteriormente se ejecuta el programa resultado de la compilación del código y se observa si el resultado es el esperado.

- Análisis 3: Obtención de la vascularidad del dedo índice.
 - Nombre de la prueba: Test3.
 - Descripción: El sistema debe ser capaz de umbralizar el dedo del sujeto y posteriormente resaltar las venas y arterias dentro de éste.
 - Realización: Se crea un código con *OpenCV4* [3] y *C++* que umbralice el dedo índice de la persona y realice un procesamiento de imagen que resalte las venas y arterias del sujeto en la imagen. Esta prueba debe realizarse en el sistema construido, ya que la obtención de imágenes en un entorno similar es muy importante para el funcionamiento del sistema. Por último, se ejecuta el programa creado y se comprueba el resultado.
- Análisis 4: Binarización de la vascularidad del dedo índice.
 - Nombre de la prueba: Test4.
 - Descripción: El sistema, a partir de los datos obtenidos en la prueba anterior, debe realizar un procesamiento de imagen para obtener las venas y arterias del dedo y posteriormente convertirlas en una imagen binaria, donde los píxeles en los que se encuentran éstas serán 255 y el resto, 0.
 - Realización: Se escribe un código en *C++* con *OpenCV4* [3] que realice varias acciones; entre ellos, una igualación de histograma adaptativa (*CLAHE*), filtrado de imagen en frecuencia y umbralización binaria. Cuando se ejecute el código, deberían mostrarse las arterias y venas en blanco sobre un fondo negro.
- Análisis 5: Obtención de puntos característicos.
 - Nombre de la prueba: Test5.
 - Descripción: El sistema, a partir de la imagen binarizada de la vascularidad del dedo, debe ser capaz de obtener puntos característicos de la imagen que la identifiquen unívocamente.
 - Realización: Se genera un programa con *OpenCV4* [3] y *C++* que utilice los métodos de obtención de puntos característicos y descriptores SIFT, SURF, ORB y KAZE, con el fin de comprobar cuál otorga mejores resultados. Las características que obtenemos con estos métodos nos ayudarán a diferenciar la vascularidad del dedo de una persona de la de otra.
- Análisis 6: Reconocimiento de personas
 - Nombre de la prueba: Test6.
 - Descripción: El sistema, a partir de los puntos característicos obtenidos de la vascularidad del dedo, coteja los datos obtenidos con una base de datos que almacena las características de la vascularidad del dedo índice de varias personas y es capaz de determinar cuál de esas personas (si es una de ellas) es.
 - Realización: Se crea un código con *OpenCV4* [3] en *C++* que a partir de los puntos característicos obtenidos con el anterior análisis, realice una comparación de estas características con las existentes en una base de datos para buscar similitudes y determinar si coinciden con alguna entrada ya existente. En ese caso, la persona está identificada, en caso contrario, es una persona desconocida para el sistema.

- Análisis 7: Procesamiento de imágenes
 - Nombre de la prueba: Instalación *OpenCV4* [3].
 - Descripción: Se realizará la descarga y compilación de las librerías de código abierto para procesamiento de imagen *OpenCV* [3] en su versión 4.5.2 sobre el sistema operativo *Raspbian* de la propia *Raspberry Pi 4*.
 - Realización: Se clonarán los repositorios de los paquetes *opencv_4.5.2* y *opencv_contrib_4.5.2* de sus respectivas páginas de *Github*, github.com/opencv/opencv y github.com/opencv/opencv_contrib. Una vez descargadas, con la herramienta de *CMake* y las dependencias necesarias, se realiza la compilación y por tanto, instalación de las librerías en el sistema operativo. Después de esto, el usuario puede utilizar *OpenCV* [3], siempre y cuando realice la compilación con los argumentos '*pkg-config -cflags -libs opencv*'.

1.4.3 Diseño

La solución propuesta para alcanzar todos los requisitos y limitaciones mencionados anteriormente consiste en crear una carcasa mediante impresión 3D. El material elegido para el proyecto es *PLA+*, debido a su reducido coste, buena flexibilidad y resistencia, facilidad de impresión y por ser biodegradable e industrialmente compostable. La impresora utilizada para la impresión de todas las piezas es una *Prusa i3 MK3s*.

El diseño consta de cinco piezas distintas, de manera que el diseño del prototipo es modular. La unión de las piezas se realiza mediante cuatro tornillos M4. A continuación se describen individualmente las distintas piezas que componen el sistema:

1.4.3.1 Pieza principal

Esta pieza se denomina la pieza principal por ser la de mayor tamaño. La única función que tiene es alojar la carcasa en la que se encuentra la *Raspberry Pi* y la cámara, además de dejar un hueco de aproximadamente 9cm hasta la siguiente pieza, siguiendo la restricción C.6. La pieza se compone únicamente de cuatro paredes y cuatro bloques pequeños con hendiduras para introducir tuercas M4. Los tornillos irán enroscados en estas tuercas cuando se cierre el sistema completo.

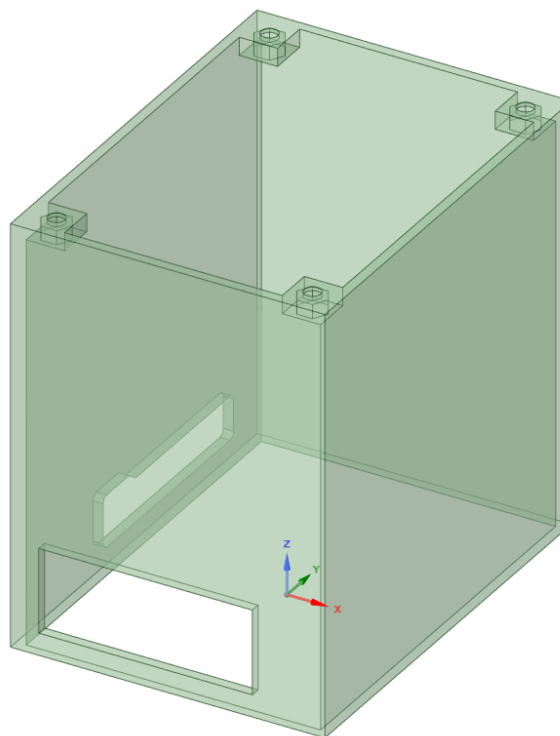


Ilustración 1-0-5: Pieza principal

1.4.3.2 Módulo dedo

Esta pieza, tal y como su propio nombre indica, es el módulo en el cual el usuario debe introducir el dedo. Es una parte relativamente simple, ya que sólo se compone de un agujero para introducir el dedo, unas paredes que limitan la movilidad de éste y unos pasadores para la correcta alineación de los tornillos.

1.4.3.3 Módulo LED

En este módulo, se ubicarán siete LEDs infrarrojos con distintas longitudes de onda y la PCB encargada de suministrarles corriente, de la cual hablaremos más adelante. En cuanto a la iluminación, se eligen 4 LEDs con una longitud de onda de 890nm, y tres con una longitud de onda de 940nm. Para contener todos estos elementos, la pieza se compone de cuatro paredes con pasadores para los tornillos en las que dentro se encuentra a su vez un recinto modelado de manera que encaje de manera justa con la PCB diseñada. Por supuesto, se encuentran siete agujeros por los que saldrán la iluminación hacia la pieza de abajo, el módulo dedo, encajando los LEDs en estos agujeros. Además, se añaden tres huecos para tuercas M2 para poder atornillar la placa a la pieza de manera que quede fija y un rebaje donde se coloca el circuito integrado para tener mayor margen. A continuación se muestran en las figuras el módulo LED y módulo dedo individualmente.

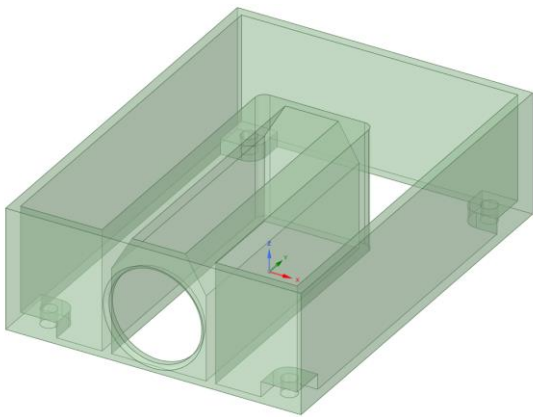


Ilustración 1-0-7: Módulo dedo

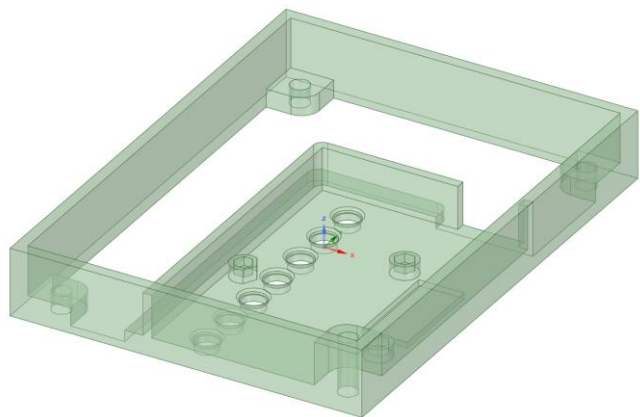


Ilustración 1-0-6: Módulo LED

1.4.3.4 Tapas inferior y superior

Estas dos piezas, simplemente se tratan de tapas para cerrar el sistema por arriba y por abajo. La tapa inferior está diseñada para encajar en la pieza principal, e incorpora unos huecos para ayudar a la ventilación del computador. Cabe destacar que para que esta ventilación funcione, se le debe incorporar además cuatro patas de goma adhesivas a esta tapa, para elevarla con respecto al suelo. En cuanto a la tapa superior, esta se trata de un panel sólido con cuatro agujeros avellanados para tornillos M4.

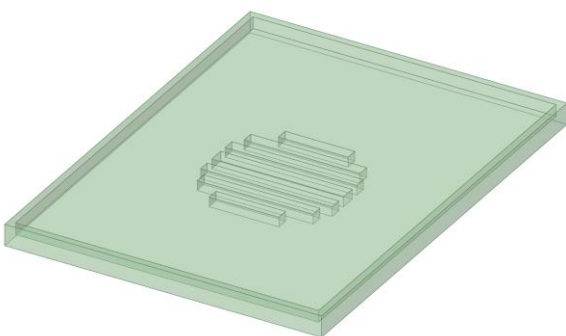


Ilustración 1-0-9: Tapa inferior

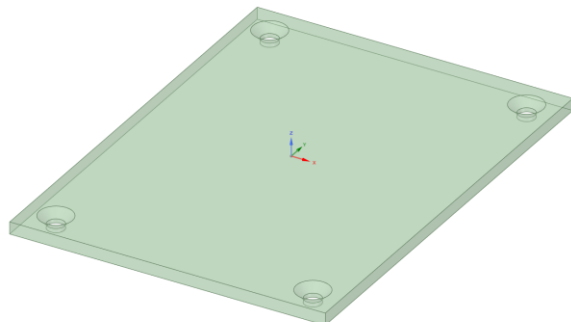


Ilustración 1-0-8: Tapa superior

1.4.3.5 Montaje completo

Juntando todas las piezas, el sistema queda totalmente montado. En la parte inferior se alojará la carcasa con la *Raspberry Pi* y la cámara sin filtro IR. El objetivo del diseño es que la cámara capte una imagen del dedo desde abajo mientras, con el módulo LED, éste está siendo iluminado con luz infrarroja desde arriba. Además, para ayudar a disminuir la dispersión de luz en el hueco para el dedo, se reviste de una esponja negra flexible que permite que el usuario introduzca el dedo sin ofrecer resistencia, pero que reduzca o elimine la reflexión de luz en las paredes del dispositivo, haciendo difícil la tarea de separar regiones posteriormente. A continuación, se puede observar una foto del montaje completo.

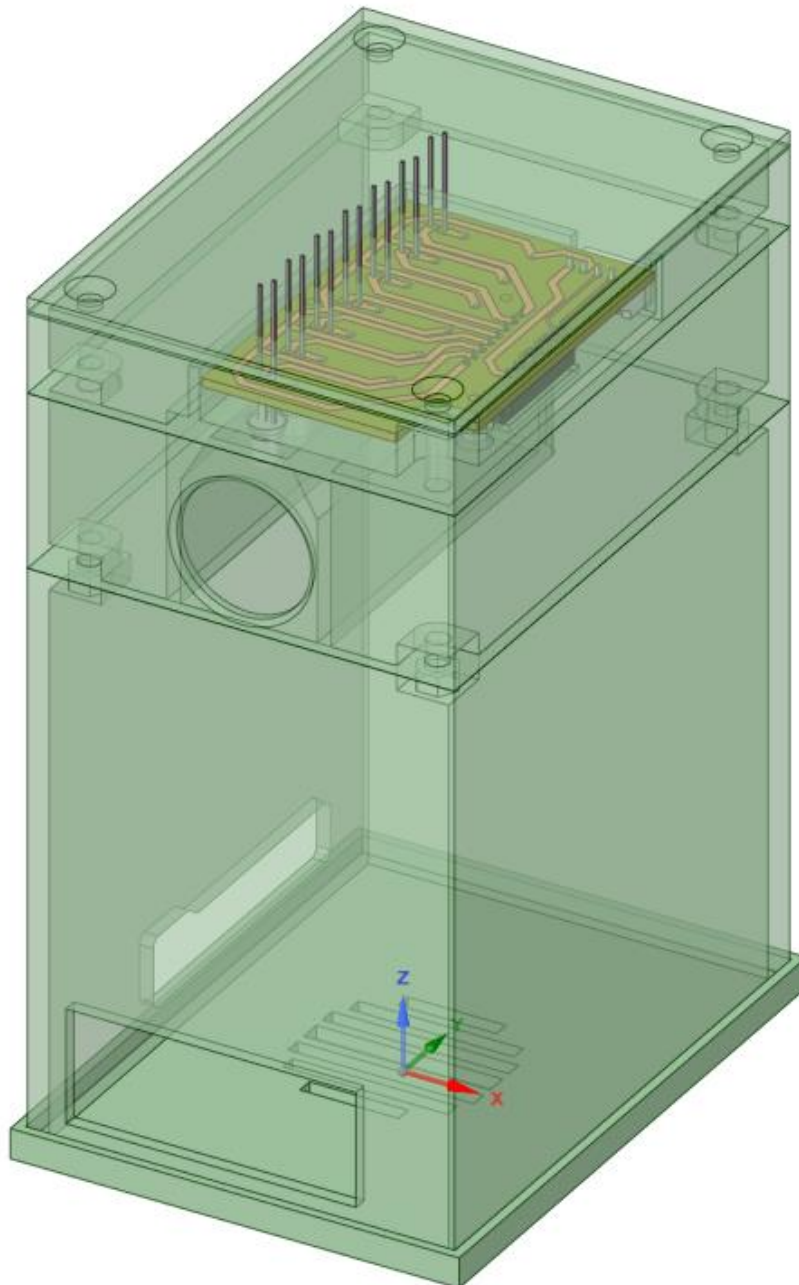


Ilustración 1-0-10: Montaje completo

2 LABORATORIO

Hay una fuerza motriz más poderosa que el vapor, la electricidad y la energía atómica: La voluntad.

Albert Einstein, 1879-1955

En este capítulo vamos a explicar con mayor nivel de detalle el proceso de creación de los diseños del proyecto, especialmente el diseño de la electrónica. Además, se detallará completamente todo el *Hardware* utilizado para la creación del prototipo y se hará un repaso sobre los errores encontrados y las iteraciones que han sido necesarias en el diseño.

2.1. Electrónica para la iluminación

Para comenzar el diseño de la electrónica del sistema, partimos de ciertas limitaciones. Para conocer mejor estas restricciones, nos remontaremos antes a los componentes que sabemos con total seguridad que necesitaremos, como son una fuente de alimentación, y los siete LEDs NIR. Por supuesto, también necesitaremos resistencias para estos LEDs, para limitar el flujo de corriente y evitar la rotura de éstos.

Para calcular las resistencias que necesitamos, primero necesitamos conocer la alimentación nominal de ambos tipos de LED, por lo que estudiamos la *datasheet* de ambos. Primero, buscamos lo necesario para el LED de 940nm pico, en concreto, el modelo TSAL6100 [5]. En la *datasheet*, podemos ver que la intensidad típica es de 100mA, y que la caída de tensión es de 1.35V típicamente. Por lo tanto, podemos calcular el valor de la resistencia de la siguiente manera:

$$R = \frac{V_{cc} - V_{LED}}{I_f} = \frac{5V - 1.35V}{0.1A} \rightarrow R = 36.5\Omega$$

$$W = I^2 \cdot R = (0.1A)^2 \cdot 36.5\Omega \rightarrow W = 0.365W$$

Como se puede ver en los valores obtenidos en las ecuaciones anteriores, necesitaremos una resistencia de al menos $\frac{1}{2} W$ de un valor cercano a los 36.5 ohmios. En el laboratorio de la escuela se nos fueron proporcionadas resistencias de 34Ω, las cuales consideramos totalmente válidas para esta aplicación aunque la corriente sea ligeramente mayor que la estimada inicialmente.

A continuación, debemos realizar el mismo cálculo con el otro tipo de LED NIR, en concreto, el modelo QED223 [6]. Si observamos la *datasheet*, podemos observar que tanto la corriente típica como caída de tensión es similar al caso del LED anterior, por lo que las resistencias que utilizaremos serán las mismas.

Ahora ya conocemos el valor de intensidad que queremos que pase por cada diodo, por lo tanto sólo nos queda pendiente conocer cómo vamos a alimentar los LEDs. No podemos ponerlos en paralelo porque desconoceríamos la intensidad que circula por cada uno de ellos e incluso puede llegar a ser peligroso. La mejor solución es utilizar un IC controlador de LEDs. Sin embargo, tuvimos que descartar esta opción ya que la corriente necesaria para alimentar los diodos es demasiado alta para usar este tipo de integrado. Por lo tanto, decidimos utilizar un controlador más genérico, como puede ser un IC de pares Darlington; en concreto, el integrado ULN2003AN [7] de Texas Instruments. Este integrado es capaz de manejar siete salidas con sus respectivas entradas individuales, por lo cual es perfecto para esta aplicación. Conectaremos las salidas a los LEDs a través de las resistencias y puentearemos las entradas de manera que con una señal podamos encender todos los LEDs de 940nm y con otra, los de 890; tal y como se aprecia en el circuito de la siguiente figura:

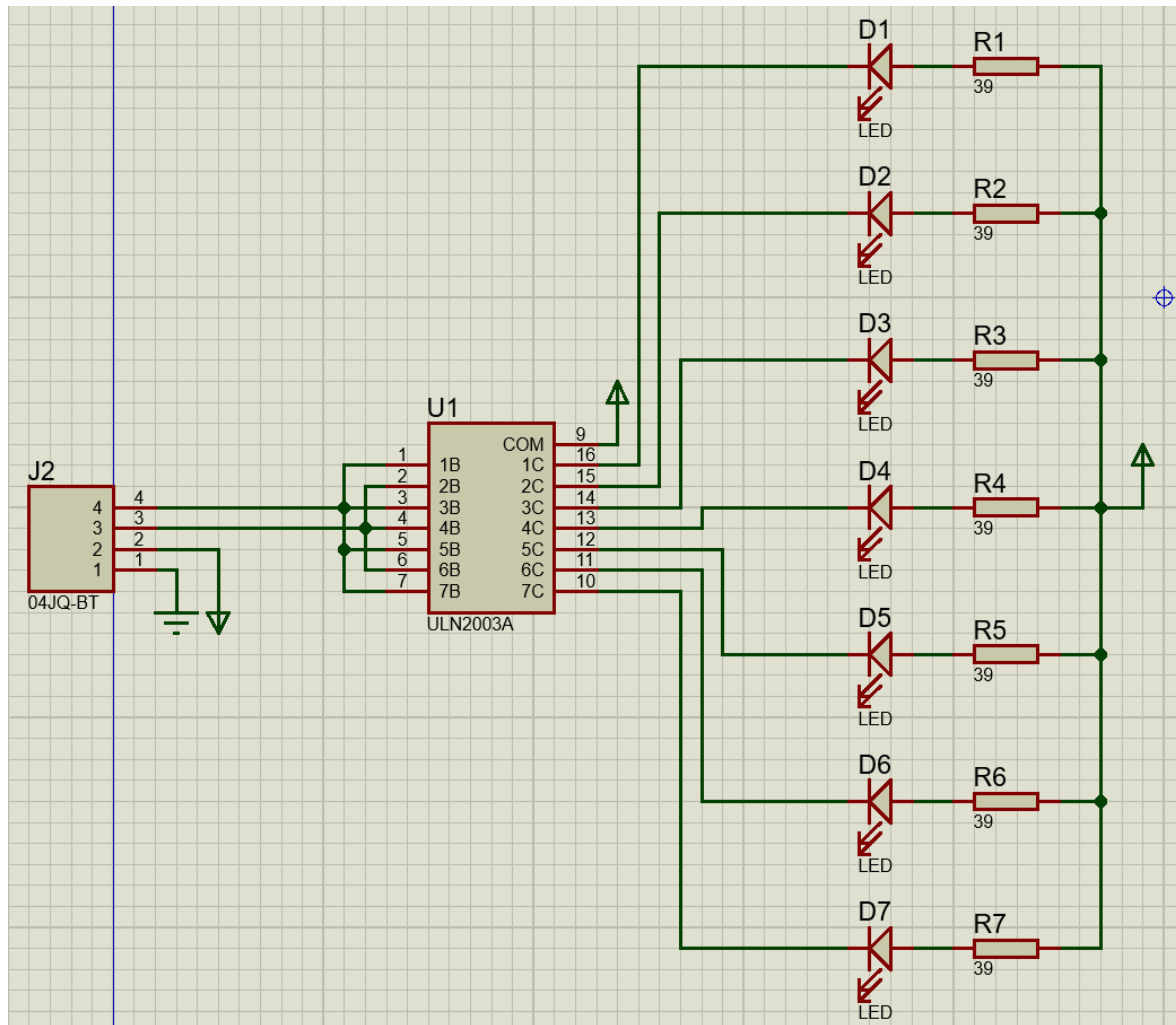
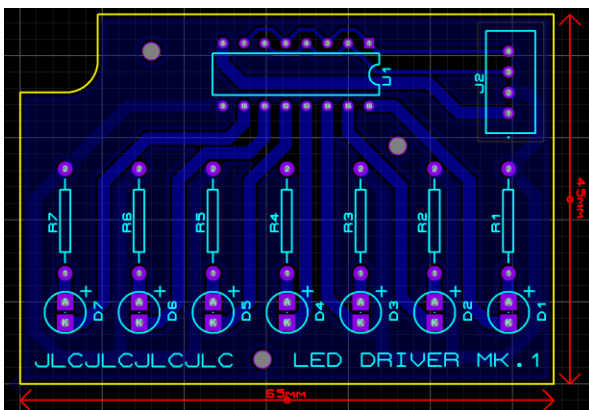


Ilustración 2-1: Esquemático de conexión de la placa de alimentación LED

Para otorgar la alimentación y las señales de control al circuito integrado, optamos por utilizar un conector de JST (Japan Solderless Terminals) tipo XH de cuatro pines. De esta manera, la conexión entre la placa y el ordenador no es permanente, ya que se puede desconectar simplemente el cable, permitiendo así la modularidad. Por último, tras verificar el circuito, se procede a diseñar la PCB de manera que sólo sea necesaria una cara de cobre. Teniendo en cuenta los requisitos de corriente de las pistas, la placa queda rutada de la siguiente manera:



Además, como se puede apreciar, se añaden tres agujeros M2 por los que pasarán tornillos que mantendrán sujeta firmemente la placa a la pieza de plástico junto con tuercas. También se añade un plano de V_{CC} para ahorrar ácido y/o tiempo a la hora de fabricar la placa. Las marcas que se ven en cian corresponden a las inscripciones que contiene la placa por el lado sin cobre, para identificar rápidamente el componente que se tiene que soldar en una determinada posición. Por último, a continuación, se muestra el resultado de fabricación de la placa, y el resultado tras realizar las soldaduras de forma manual.

Ilustración 2-2: Rutado de la placa de alimentación LED

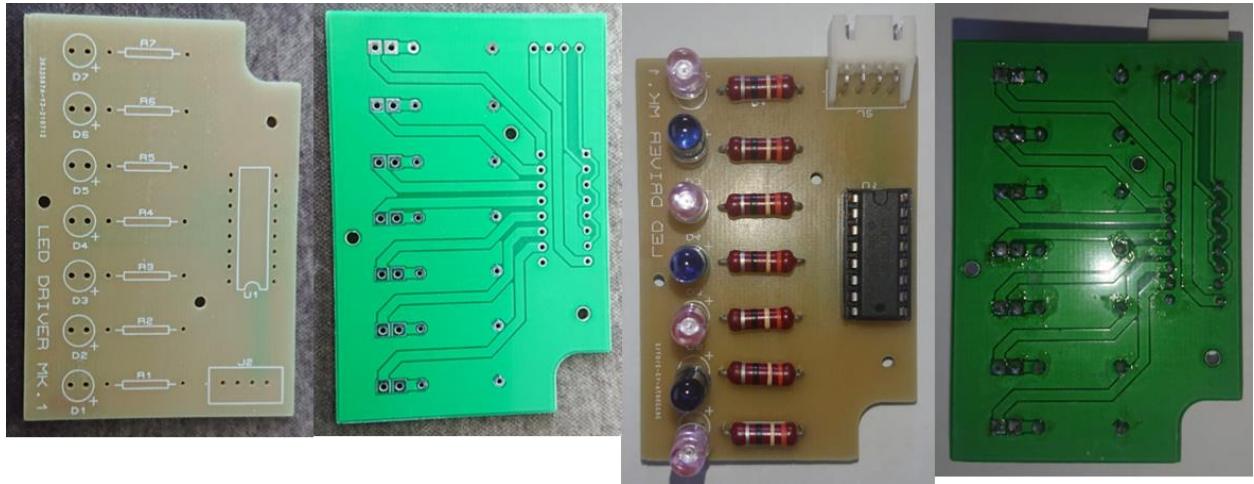


Ilustración 2-4: PCB



Ilustración 2-3: Muestra de encaje de PCB

Para la conexión de la placa con la *Raspberry Pi*, utilizaremos cuatro cables 22AWG con terminales crimpados de JST XH hembra por un lado, y Dupont hembra por el otro extremo, el cual será conectado al ordenador del sistema. El cable queda de la siguiente manera:



Ilustración 2-5: Conector PCB-Ordenador

No obstante, antes de fijar el montaje de la placa, se verifica si el circuito funciona correctamente. Para ello, decidimos soldar a una PCB igual unos LEDs con espectro visible, en este caso, rojos. En lugar de utilizar resistencias de mayor potencia como en el caso anterior, utilizamos resistencias de $\frac{1}{4} W$ de 330Ω . La placa obtenida queda de la siguiente manera:

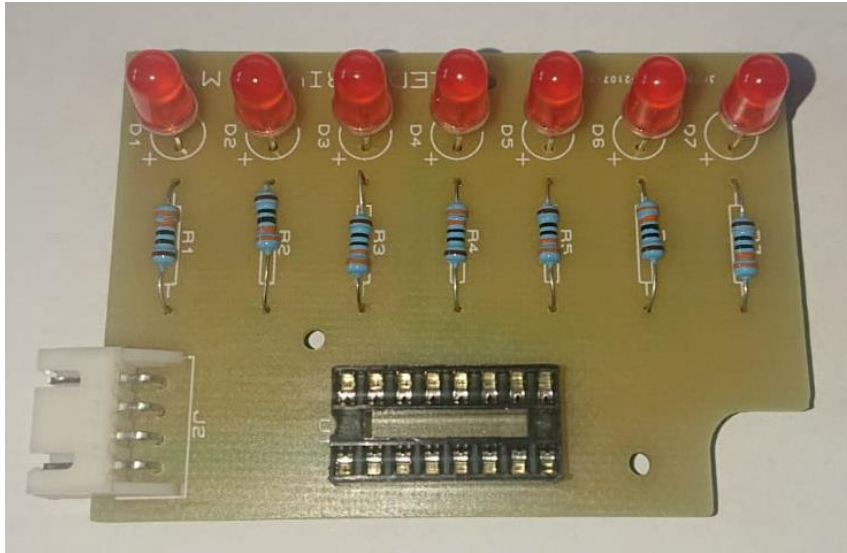


Ilustración 2-6: PCB alternativa

De esta forma, podemos verificar rápidamente si el circuito funciona o no, ya que esta luz sí es visible para el ojo humano, en contraposición al caso de las luces NIR. Para mandar las señales de encendido y apagado de las luces, utilizaremos una placa Arduino Uno R3. Colocaremos dos pulsadores que leerá el microcontrolador mediante *polling* para activar o desactivar las señales de control de las luces. El código se encuentra en el anexo y el esquemático seguido es el siguiente:

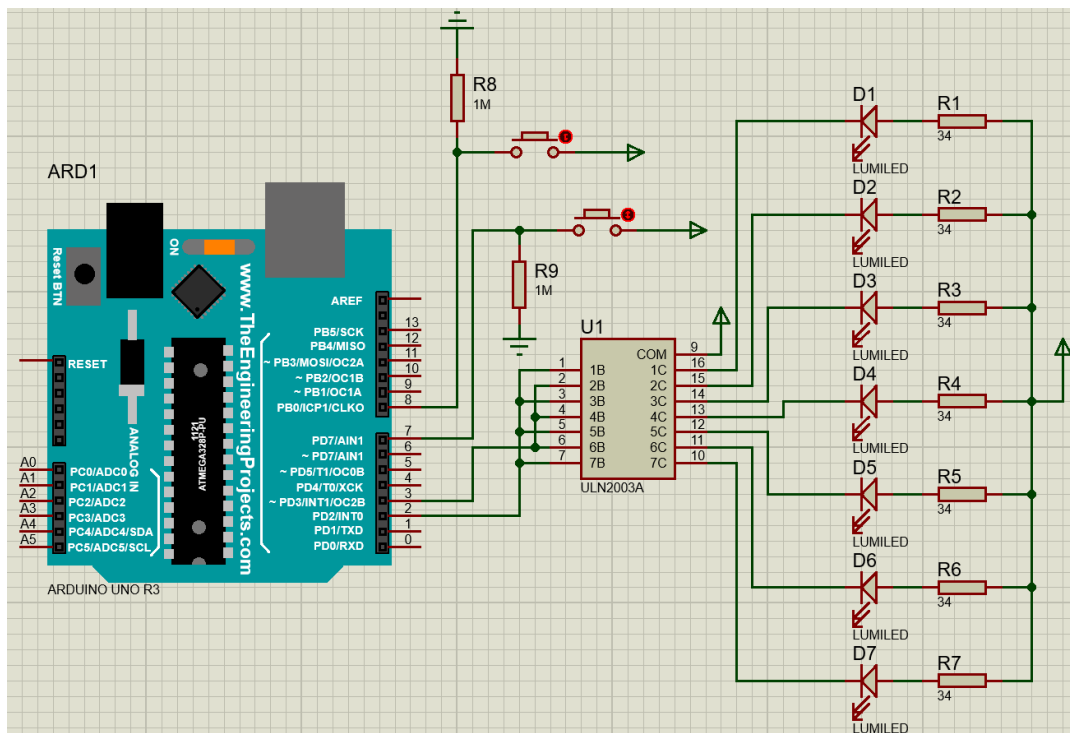


Ilustración 2-7: Montaje de prueba con Arduino

2.2. Ordenador a bordo

Como se ha indicado en apartados anteriores, la elección del ordenador del sistema es la placa *Raspberry Pi 4* en su versión de 4GB de memoria RAM. El principal motivo para elegir este ordenador es la relación prestaciones/precio. Además, soporta aceleración de *Software* por paralelización y autovectorización, que es a su vez compatible con la API de *OpenCV4* [3]. Esto, sumado a su bajo coste, la hace la placa adecuada para la aplicación de este proyecto. No obstante, a continuación, repasaremos las otras posibles opciones.

2.2.1 NVIDIA Jetson Nano [8]

Este ordenador de única placa o SBC es una propuesta muy interesante, ya que tiene una gráfica completamente dedicada de 128 núcleos. Sin embargo, el procesador se queda un poco atrás con respecto a la *Raspberry Pi 4*. No obstante, el tamaño es menor, aunque al necesitar un disipador de aluminio, es notablemente más alta. Lo más destacable y lo que provoca que se descarte esta opción sin ninguna duda es el elevado precio del producto. El coste de esta placa es aproximadamente el triple que la *RP4*, por lo que esta opción queda descartada.



Ilustración 2-8: NVIDIA Jetson Nano Developer Kit [8]

2.2.2 Otras opciones

También se barajaron otras opciones, aunque se consideran menos importantes que el punto anterior, por lo que simplemente se enumerarán y se comentarán de forma breve.

- *Orange Pi 4B* [9]. Esta opción es una propuesta interesante porque incluye un procesador ARM con arquitectura big.LITTLE¹, por lo que el consumo podría verse reducido notablemente, además de incorporar una gráfica dedicada compatible con las APIs gráficas más recientes. Por otra parte, existe una escasez de este SBC y el precio es muy elevado.
- *BeagleBoard-X15* [10]. Esta opción fue rápidamente descartada ya que además de su elevado precio, las prestaciones se quedan atrás con respecto a las placas anteriores, incluso llegando a poder ser insuficientes para cumplir los requisitos del sistema.

¹ Arquitectura de computación heterogénea que consiste en acoplar los procesadores más lentos y que consumen menos energía (LITTLE) con los procesadores más potentes y que consumen más (big). En general, sólo un lado se activa a la vez, por lo que se manifiesta que se puede ahorrar hasta un 75% de energía en algunas tareas. [24]

2.3. Diseño e impresión de las piezas

Para el diseño del proyecto, se realizaron varias iteraciones dependiendo de cada pieza. Lo más destacable fue que en la primera iteración completada, no fue posible encontrar unos tornillos adecuados para cerrar el prototipo, por lo que fue necesario cambiar el calibre de los agujeros de todas las piezas a excepción de la tapa inferior. A continuación se comentarán las iteraciones necesarias hasta obtener el prototipo final pieza por pieza.

2.3.3 Tapa inferior

La primera iteración de esta pieza, al igual que todas las siguientes, fue impresa en plástico ABS gris con la impresora BCN3D SIGMA R17. Sin embargo, este es el único caso en el que el modelo no fue cambiado para la siguiente iteración. Simplemente, en la segunda y última iteración de esta pieza, ésta fue impresa en PLA+ negro en una impresora Prusa i3 Mk3s. Cabe destacar que esta pieza está pensada para incluir patas de goma adhesivas en las esquinas y a diferencia de las demás piezas, que llevan tornillos; esta pieza está diseñada para encajar con la siguiente. A continuación, en la figura, se puede observar las dos iteraciones impresas.



Ilustración 2-9: Iteraciones de tapa inferior

2.3.4 Pieza principal

Al igual que la pieza anterior y las siguientes, la primera iteración de esta pieza fue impresa en ABS. No obstante, en la siguiente y última iteración de esta pieza, hay un cambio notable. En la primera iteración de esta pieza, los agujeros para los tornillos son de tamaño M3, al igual que el hueco para las tuercas. Sin embargo, en la segunda iteración se amplió el diámetro de estos agujeros hasta M4, ampliando, por tanto, el tamaño para las tuercas correctas. El resto de las partes de la pieza se mantuvieron iguales.



Ilustración 2-10: Iteraciones de pieza principal

2.3.5 Módulo dedo

Para esta pieza, también fueron necesarias únicamente dos iteraciones. En la segunda iteración se realizaron varios cambios. Para comenzar, el diámetro de los agujeros paso de M3 a M4, la cavidad para introducir el dedo se alargó ligeramente y, por último, se añadió una subida en pendiente con el fin de disminuir la dispersión de luz, motivo por el que también se le añadieron a la pieza esponjas forradas con tela opaca. A continuación, se observan la primera y segunda pieza y un detalle de la pendiente mencionada.

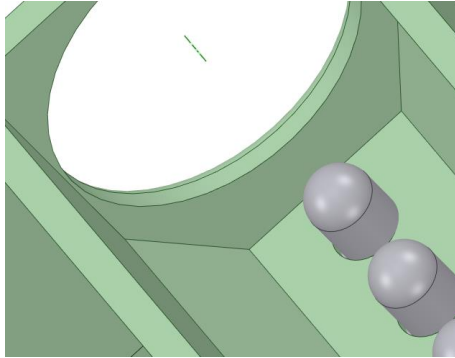


Ilustración 2-11: Detalle módulo dedo

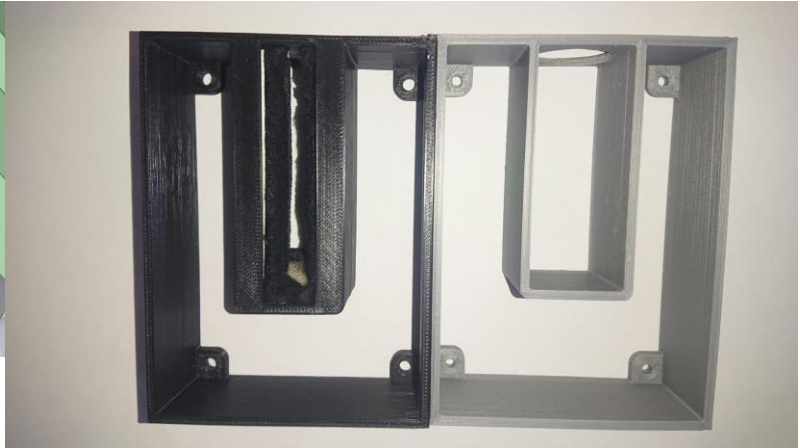


Ilustración 2-12: Iteraciones de módulo dedo

2.3.6 Módulo LED

Esta pieza fue la que más iteraciones necesitó, siendo tres en total. La primera iteración se realizó antes de tener el diseño de la placa de control de los LEDs, por lo que la segunda iteración cambia de manera notable. Para comenzar, elimina plástico de donde no es necesario, para reducir el tiempo de impresión, posteriormente se añaden paredes para la PCB, de manera que encaje de manera justa, además de añadir los huecos correspondientes para las tuercas. Por último, se aumenta ligeramente la altura de la pieza y se aumenta el calibre de los agujeros de los tornillos de M3 a M4. Sin embargo, estos cambios no fueron suficientes y se necesitó una tercera iteración en la que se aumentó aún un poco más la altura de la pieza, se aumentó la altura de los huecos para las tuercas, se eliminó más plástico innecesario para agilizar la impresión y, por último, se realizó un rebaje en la zona en la que se encontrará el IC, ya que se había detectado que chocaba con el suelo de la pieza. Tras estos cambios, la pieza se da por válida. En la siguiente figura se pueden apreciar todas las iteraciones una tras otra.

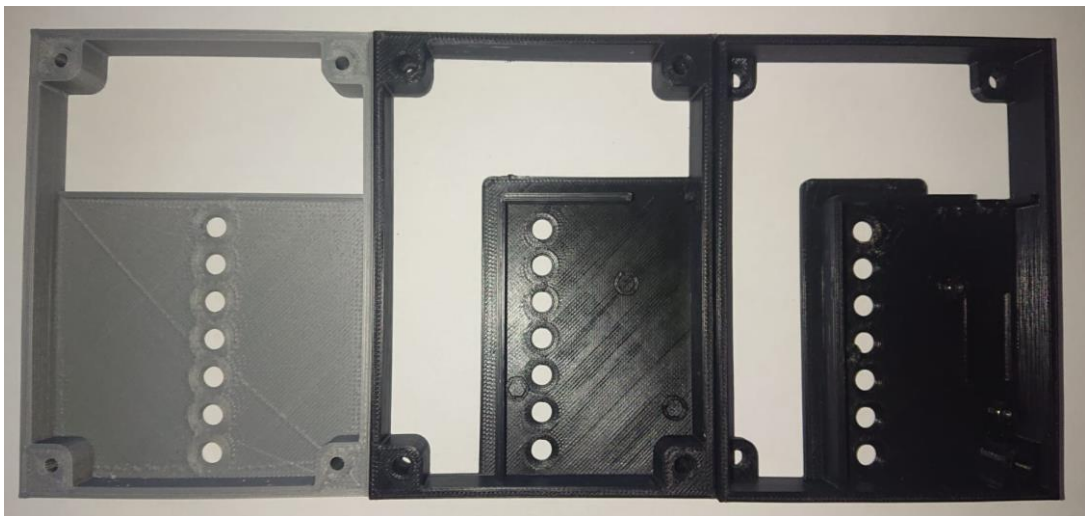


Ilustración 2-13: Iteraciones de módulo LED

2.3.7 Tapa superior

Para la tapa superior, fueron necesarias únicamente dos iteraciones. El cambio más notable es el paso del diámetro de los agujeros de M3 a M4. Además de esto, se disminuye ligeramente la altura de la pieza y se realiza un avellanado en los agujeros para los tornillos, ya que para el montaje se utilizarán tornillos M4x60mm de cabeza avellanada. En la siguiente figura se aprecia la ligera diferencia entre las dos iteraciones.



Ilustración 2-14: Iteraciones de la tapa superior

2.4. Montaje del prototipo

Por último, únicamente resta ensamblar el prototipo. Para ellos, debemos seguir una serie de pasos en orden, que se indicarán como puntos para facilitar la lectura:

1. Conectar la cámara, el ventilador y los cables de la placa de alimentación de los LEDs a la *RP4* en la carcasa de ésta, de manera que el cable rojo se conecta a 5V, el negro a masa, el amarillo a GPIO.4, y el verde a GPIO.5, tal y como se observa en la figura.



Ilustración 2-15: Conexión de cableado

2. Colocar las tuercas M4 en la pieza principal.
3. Colocar la caja contenedora de la placa sobre la tapa inferior y encajar la pieza principal encima.
4. Colocar encima el módulo dedo.
5. Introducir las tuercas M2 en el módulo LED y encajar y atornillar la PCB a la pieza.
6. Colocar encima del módulo dedo el módulo LED y conectar el cable de la placa a ésta.
7. Colocar la tapa superior encima del conjunto.
8. Introducir los tornillos desde arriba y atornillar.
9. Montaje finalizado.

3 DISEÑO DEL SOFTWARE

Un ordenador te permite cometer más errores y más rápido que cualquier otra invención en la historia de la humanidad, con las posibles excepciones de las pistolas y el tequila.

Mitch Radcliffe

Este apartado va a tratar sobre todo el desarrollo de código realizado en el proyecto, así como las decisiones de diseño *Software* que se han tomado y problemas hallados en el camino. Se explicará con detalle todos los procedimientos seguidos y se añadirán imágenes mostrando los resultados obtenidos a cada paso. También se comentará el entorno de programación elegido y el control de versiones utilizado.

3.1. Entorno de programación

En este proyecto, se ha trabajado desde diversos entornos y sistemas operativos. El trabajo principal se ha desarrollado desde la conexión de un sistema *Windows 10* con un sistema *Raspbian* funcionando sobre la *Raspberry Pi 4* a través de un escritorio remoto. Dentro de este sistema, el IDE utilizado ha sido *Visual Studio Code*, ya que permite realizar *debugging*². Además, las pruebas que se han planteado han sido probadas en su mayoría no sobre la *RP4*, sino sobre una máquina virtual ejecutando *Ubuntu 21*. En esta máquina también se ha utilizado el IDE de *Visual Studio Code* y el motivo de ejecutar las pruebas sobre este sistema es por el simple hecho de la comodidad y rapidez, ya que la máquina tiene mucha mayor potencia que el ordenador del prototipo.

Para el control de versiones, se utiliza el *Software* libre de *Git*, funcionando sobre un repositorio público [11] en *Github*. El esquema seguido es muy simple y existe únicamente una rama en la que se publican todos los avances realizados en el código.

3.2. Captación de imágenes e iluminación

El primer paso, antes de poder comenzar a realizar código, consiste en instalar *OpenCV 4.5.2* [3]. Esto es un proceso relativamente largo de explicar, por lo que el proceso de instalación y configuración en el IDE puede encontrarse en el anexo B. Una vez tenemos preparada la API, podemos comenzar a programar.

Para comenzar, empezaremos con lo más simple, es decir, la captación de imágenes a través de la cámara. Para ello necesitamos agregar las cabeceras *highgui.hpp*, *imgproc.hpp* y *imgcodecs.hpp*. Ahora, podemos definir un tipo *Mat* para almacenar las imágenes que tome la cámara y para ello, además creamos un objeto de tipo *VideoCapture* para ejecutar la función *read*, que provocará que la cámara tome una imagen y sea almacenada en el contenedor definido anteriormente. Posteriormente, solo resta mostrar la imagen tomada por pantalla mediante el uso de la orden *imshow*. Si compilamos el programa y lo ejecutamos, debería aparecer una imagen muy oscura, ya que estamos tomando una foto de un lugar sin apenas luz. Para conseguir vislumbrar las venas y arterias del dedo, necesitamos hacer uso de la iluminación NIR, de manera que ésta atraviese el dedo y la cámara recoja una imagen en la que la anatomía vascular del dedo se vea oscura con relación al resto del dedo.

Para poder activar la iluminación, necesitamos acceder a las salidas y entradas de la *Raspberry Pi 4*. Para ello, necesitamos incluir la cabecera *wiringPi.h*. Ahora, inicializamos la librería con la función *wiringPiSetup*,

² Proceso de identificación y corrección de errores de programación.

seleccionamos los pines 4 y 5 como salidas y los colocamos en estado lógico *HIGH*. Después de tomar la imagen, cambiamos el estado lógico a *LOW* para desactivar la iluminación, de manera que ahorramos energía y evitamos calentar los componentes del sistema. Ahora, tras compilar y ejecutar el programa se puede vislumbrar claramente el dedo introducido y de forma sutil, la anatomía vascular del dedo, tal y como se puede apreciar en la siguiente figura.



Ilustración 3-1: Imagen de dedo sin preprocesamiento

3.3. Preprocesamiento de imagen

En este punto tenemos un objetivo muy claro: Obtener el patrón de venas y arterias del dedo a partir de la imagen tomada por la cámara. Este proceso no es trivial y es necesario un gran número de operaciones para conseguir un resultado satisfactorio. Principalmente, nos basaremos en el preprocesamiento seguido en el desarrollo de *OpenVein Toolkit* [12] de la universidad de Salzburgo.

3.3.1 Umbralización del dedo

En la imagen anterior, las zonas de la imagen que no pertenecen al dedo no son totalmente oscuras, por lo que será necesario umbralizar para aislar el dedo del fondo de la imagen. Para ello, creamos una imagen de máscara que será el resultado de aplicar un umbral de valor fijo binario, de manera que el fondo se convierta en negro y el dedo en blanco. Posteriormente podremos usar esta imagen umbral como máscara.



Ilustración 3-2: Máscara de dedo

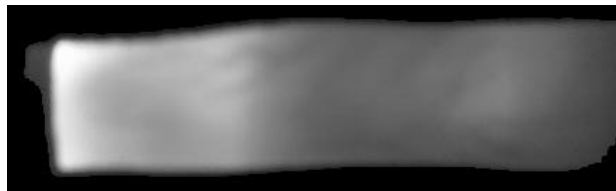


Ilustración 3-3: Dedo umbralizado

3.3.2 Ajuste de contraste

Como se puede observar, la imagen original tiene un contraste con margen de maniobra. Para mejorarlo, usaremos una técnica de igualación de histograma adaptativa. *OpenCV4* [3] incluye el algoritmo del método CLAHE, por lo que simplemente tenemos que crear un puntero de tipo CLAHE, inicializarlo y aplicarlo a la imagen. El resultado obtenido es una imagen en la que es mucho más fácil apreciar la vascularidad del dedo.

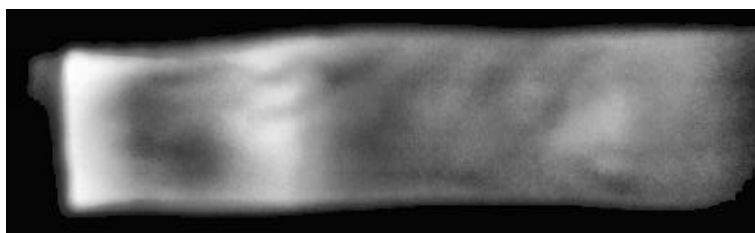


Ilustración 3-4: Resultado de igualación de histograma adaptativa

3.3.3 Filtrado en frecuencia

Con los pasos anteriores, la anatomía vascular del dedo se va viendo de forma más clara, sin embargo, aún debemos seguir procesando la imagen para resaltarlas de una manera más obvia antes de umbralizar. Para ello, podemos realizar un filtrado de alta frecuencia en la imagen. En el proceso de *OpenVein Toolkit* [12] se menciona el uso del filtro de énfasis en alta frecuencia. En este proyecto, además de implementar el mencionado filtro, también planteamos el uso del filtro gaussiano de paso alto, en sustitución del anterior filtro o para el uso conjunto de ambos. Más adelante compararemos los resultados obtenidos.

Para implementar ambos filtros, el proceso es totalmente similar, y, de hecho, únicamente cambia el valor de los parámetros, por lo que crearemos una función que sea capaz de ejecutar ambos tipos de filtrado. El primer paso por realizar es ejecutar la DFT de la imagen que se quiere filtrar, entonces, dependiendo si vamos a implementar un filtro HPF o HFE [13] [14], elegimos parámetros acordes. Primero, realizamos una función de transferencia que aplique un filtro de paso alto de la siguiente manera:

$$H_{HP}(u, v) = 1 - e^{-\frac{\left(u - \frac{N}{2}\right)^2 + \left(v - \frac{M}{2}\right)^2}{2 \cdot D_0^2}}$$

Donde (u, v) es un píxel cualquiera de la imagen, M y N son el número de filas y columnas de la imagen, respectivamente y D_0 es una cantidad específica no negativa [14].

A continuación, se realiza la operación $G = k_1 + k_2 \cdot H_{HP}$, operación por la cual se obtiene el espectro en frecuencia del filtro que se va a aplicar. A continuación, se aplica el filtro a la transformada de Fourier de la imagen que se desea filtrar, mediante multiplicación píxel a píxel. Al resultado se le realiza una FFTShift³, y por último, se le realiza la IDFT, se normaliza la salida, y se realiza una igualación de histograma.

Los cambios entre el filtro HPF y HFE son únicamente cambios en las constantes D_0 , k_1 y k_2 . Para el primer caso, $k_1 < 0$ y $k_2 > 0$. Sin embargo, para otro filtro, ambas constantes deben ser positivas. También es de mención que la constante D_0 debe ser positiva en ambos casos, pero no necesariamente la misma. En las figuras de a continuación se pueden observar los resultados obtenidos con ciertos parámetros tanto como para los filtros individuales como la combinación de ambos. El resultado más valioso parece ser la aplicación de un filtro de énfasis en alta frecuencia seguido de un filtro de paso alto gaussiano.

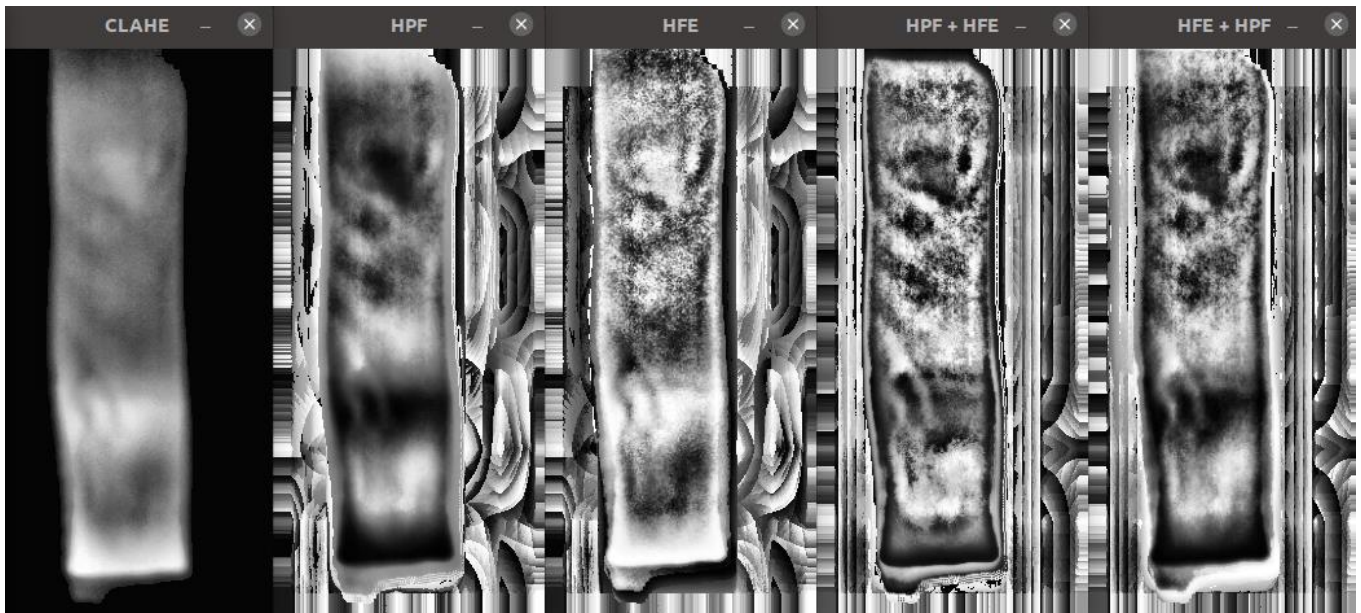


Ilustración 3-5: Aplicación de filtros en frecuencia

³ La operación de FFTShift recoloca una transformada de Fourier dada desplazando la componente de frecuencia cero al centro de la imagen.

3.3.4 Binarización de la imagen

Para convertir la imagen anterior en una imagen binaria, se debe realizar algún tipo de filtro o umbralizar mediante valores de gris. No obstante, como se puede apreciar, la imagen anterior tiene una cantidad notable de ruido, por lo que esta opción es rápidamente descartada. Finalmente, utilizaremos el filtro circular de Gabor [15] (CGF de ahora en adelante), una variante del filtro de Gabor, utilizado para separación de texturas en imágenes. Este filtro es idóneo, ya que nos separará las venas y arterias del resto mediante valor de gris y además, ruido (textura). Para la implementación, seguimos los pasos detallados en el siguiente artículo [16].

Para utilizar la máscara hallada con el proceso anterior, únicamente es necesaria una correlación, sin necesidad de utilizar el dominio de la frecuencia. Para esto, utilizaremos la parte real de la máscara, ya que se trata de una imagen en el dominio complejo. La parte real es la útil para nuestro propósito, mientras que la parte compleja sirve como detector de bordes. En la siguiente figura se puede observar la parte real y compleja de la máscara del CGF con unos parámetros específicos y de tamaño 40x40.

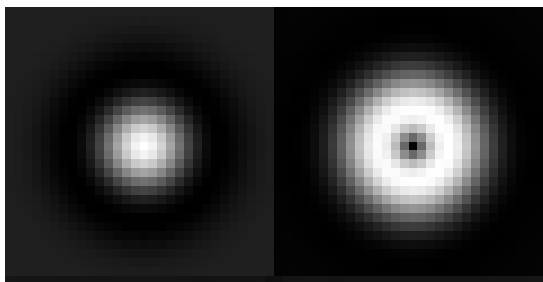


Ilustración 3-6: Máscara CGF: Partes real y compleja

El resultado obtenido, tras realizar una serie de ajustes, es muy prometedor, y mantiene en blanco tanto las venas y arterias, como los bordes del dedo, dejando el resto de la imagen a negro. Al resultado obtenido, se le realiza una operación de cerrado seguido de una de apertura, para corregir desperfectos del filtrado. Más adelante, se podrán obtener puntos característicos para identificar a las personas. En la siguiente imagen se puede observar el resultado obtenido para una configuración de preprocesamiento concreta:



Ilustración 3-7: Aplicación de CGF

3.4. Obtención de puntos característicos

Para la obtención de puntos notables en la imagen binaria anterior, primero vamos a realizar un estudio de cuál es el método que resulta más útil para la aplicación. Es por ello, que a continuación, compararemos entre la utilización de cuatro métodos distintos: SIFT, SURF, ORB y KAZE.

El inconveniente de utilizar el método SURF es que es un algoritmo patentado [17] y por lo tanto, su uso no es gratuito en aplicaciones comerciales. Por otro lado, la patente de SIFT [18] ha expirado recientemente, y por tanto, su uso es gratuito. Además, existen otras alternativas, como el detector y descriptor ORB de *OpenCV* [3] y el detector y descriptor KAZE.

Para la implementación de estos métodos en el código, necesitaremos hacer uso tanto de la librería *features2d.hpp* como de la librería *xfeatures2d.hpp* de *OpenCV* [3], que contienen los métodos de SIFT, SURF, ORB y KAZE. A continuación, creamos funciones para cada detector, muy similares entre ellas. Cada función devolverá una tupla de vector de puntos clave y matriz descriptora, con la única entrada de la imagen de la que se quieren detectar los puntos notables. Internamente, se crea un puntero del método a utilizar y se configura para encontrar alrededor de 1000 puntos. Entonces, se detectan y computan estos puntos y se devuelven en una tupla. En el caso de SURF, utilizaremos un hessiano mínimo de 5000, y en el caso del descriptor KAZE, utilizaremos la configuración por defecto, a la que únicamente le cambiaremos el parámetro *upright* de *false* a *true*.

Pero antes de aplicar estos métodos a la imagen, debemos tener en cuenta que los extremos de ésta contienen o pueden contener información errónea, debido a una mala umbralización o incorrecta iluminación. Es por esto por lo que eliminaremos estas zonas con una máscara binaria, de manera que las partes no útiles se convertirán a un valor 0, es decir, negro. Es necesario recalcar que la imagen no se recorta; el tamaño de la imagen es el mismo que antes de aplicar la máscara. Este proceso se realiza de esta manera para que el detector pueda incluir puntos en los bordes exteriores del dedo, que sí es información valiosa.

Para poder verificar si los resultados obtenidos con los detectores y descriptores anteriores son válidos y mejores que los demás, necesitamos además implementar un comparador de características para comprobar la correspondencia de los puntos hallados entre dos imágenes. Debido a la variedad de descriptores utilizados, necesitaremos dos comparadores distintos, un comparador de fuerza bruta para el método ORB que utilice la distancia de *Hamming* como parámetro, ya que ORB es un descriptor binario y por tanto esta distancia es la adecuada. Para el resto de los métodos, también podría utilizarse un descriptor de fuerza bruta que funcionara con la distancia euclídea; sin embargo, utilizaremos un comparador FLANN, al ser más rápido que el caso anterior. Además, en todos los casos filtraremos las correspondencias halladas con la prueba de relación de distancia propuesta por David G. Lowe [19] con un ratio umbral de 0.72. Tras esto, sólo resta crear una imagen con la correspondencia de puntos y mostrarla en pantalla.

Además de utilizar el ratio de Lowe, implementamos un método que descarte los emparejamientos que superen una inclinación umbral, ya que si es el mismo dedo, los emparejamientos deberían realizarse en línea recta. Para ello, a cada emparejamiento considerado válido por las normas descritas anteriormente, le calculamos el ángulo de inclinación con respecto a $y = 0$ mediante la arcotangente.

Por lo tanto, el proceso seguido es el siguiente: Primero se leen las imágenes que se van a comparar y se preprocesan para conseguir la imagen binaria. Entonces, se obtienen los puntos notables y descriptores en el par de imágenes con todos los métodos descritos anteriormente. Tras esto, únicamente resta aplicar los comparadores; de fuerza bruta en el caso del descriptor ORB y comparadores basados en FLANN para el resto de los métodos. A continuación, en las siguientes figuras, se muestran los resultados obtenidos para los cuatro métodos probados.

Como se puede observar en las ilustraciones de más adelante, el método que otorga el mejor resultado se trata del detector y descriptor KAZE [4], seguido de ORB. En la figura es capaz de encontrar 76 emparejamientos de aproximadamente 850 puntos en cada imagen, ORB empareja 33 puntos y tanto SIFT como SURF, únicamente 13 puntos característicos. Los métodos SIFT y SURF se quedan muy atrás respecto a sus rivales, aunque si no hubiéramos decidido validar emparejamientos por inclinación, el método ORB quedaría sin duda en el último puesto, debido a la enorme cantidad de falsos emparejamientos que encontraría. En conclusión, de ahora en adelante el detector de puntos característicos y descriptor utilizado será el método KAZE.

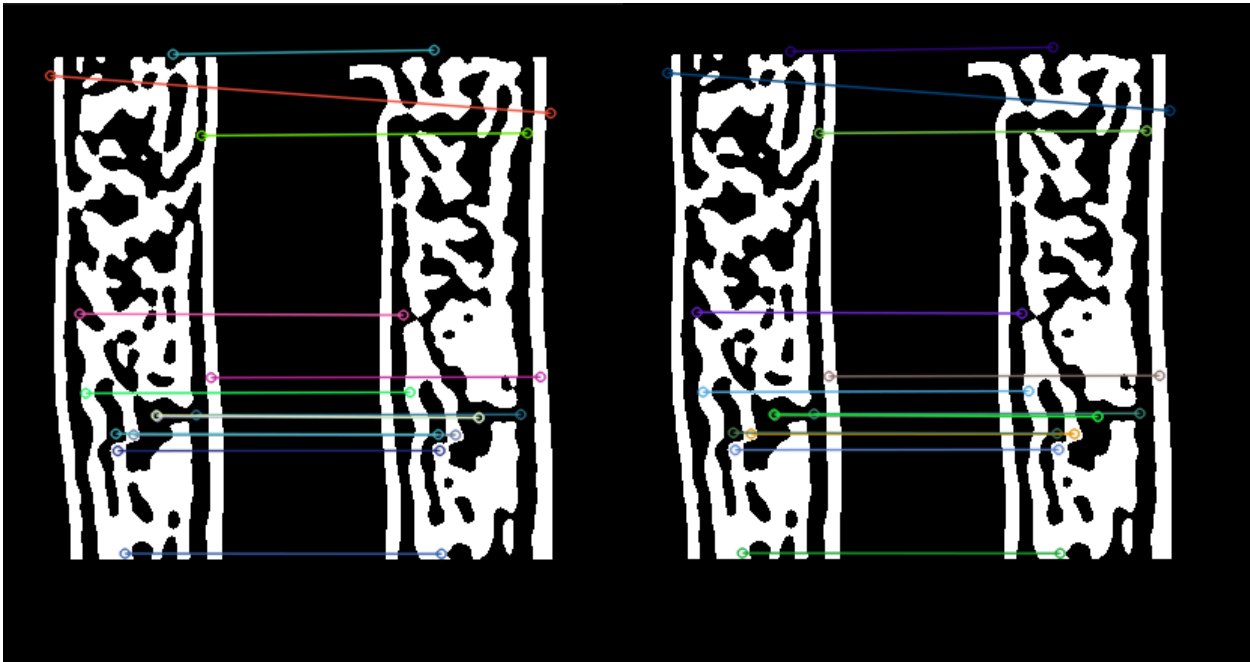


Ilustración 3-11: Comparación características SIFT

Ilustración 3-10: Comparación características SURF

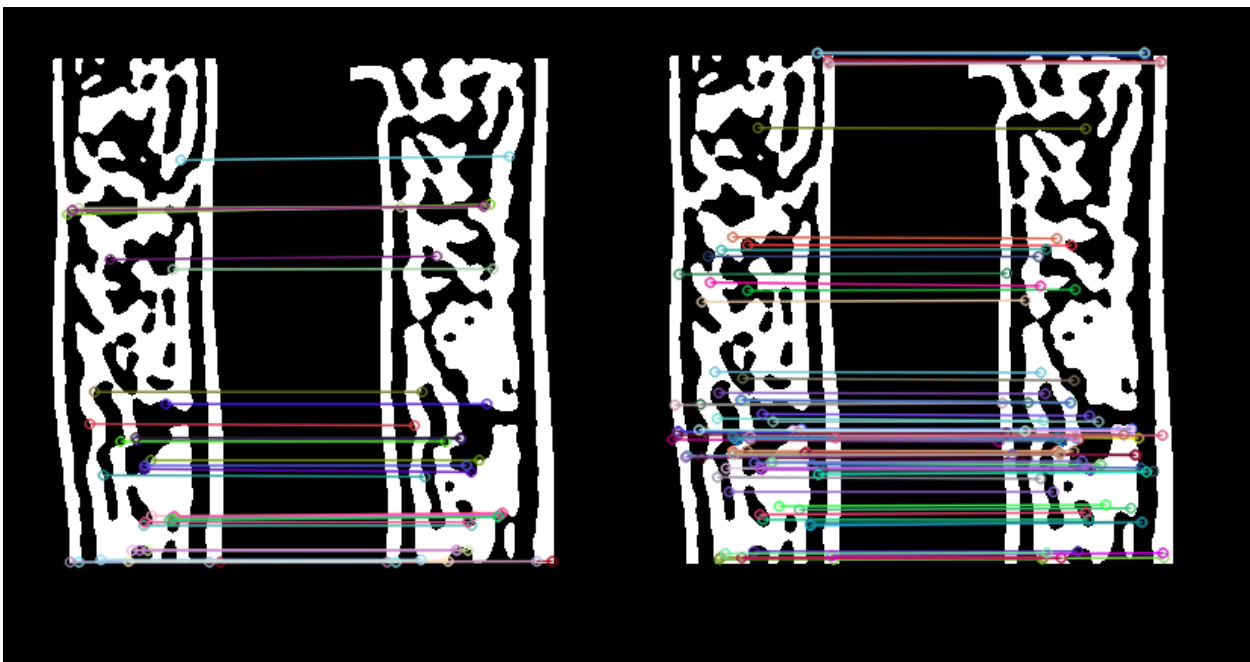


Ilustración 3-8: Comparación características ORB

Ilustración 3-9: Comparación características KAZE

3.5. Base de datos

Una vez obtenidas las características del dedo de una persona, necesitamos compararlas con otras para medir el parecido entre ellas. Para poder conseguir esto, es necesario almacenar de alguna manera las características del dedo de los usuarios habilitados. La solución más lógica es crear una base de datos, que de alguna manera, contenga la información del usuario tal como su nombre y características de anatomía vascular.

La solución más sencilla consistiría en crear una tabla que contuviera únicamente tres entradas: un número de identificación único, el nombre de dicha persona y la imagen binarizada de su anatomía vascular. Posteriormente, al recuperar los datos en el programa, únicamente habría que volver a obtener las características a partir de la imagen. No obstante, esto puede representar un problema de seguridad, ya que en caso de robo de la base de datos, el criminal tendría en su poder las imágenes de la anatomía vascular de las personas registradas. Es por ello por lo que optaremos por otra solución más compleja.

Una posible solución podría consistir en encriptar las imágenes de la base de datos anterior, sin embargo, esta puede ser una solución enormemente compleja, por lo que optaremos por almacenar directamente las características de la persona en lugar de una imagen. De esta manera, eliminamos el problema de seguridad, ya que el vector de puntos clave y descriptor de las características no suponen ningún dato sensible para el usuario, debido a que no es posible obtener la anatomía vascular a partir de estos datos. Por tanto, crearemos una tabla que contenga los siguientes campos: Número de identificación único, nombre del usuario, número de puntos clave, los puntos notables codificados en binario y, por último, el descriptor codificado en binario.

Para el manejo de la base de datos, utilizaremos un motor de bases de datos SQL⁴. Para su implementación, utilizaremos la conocida librería de SQLite [20], en su versión 3.36.0. Para ello, se instala desde la consola de Linux con el siguiente comando:

```
$ sudo apt-get install sqlite3 libsqlite3-dev sqlitebrowser
```

Posteriormente, tendremos que incluir la librería en el código mediante `#include "sqlite3.h"` y añadir el parámetro `-lsqlite3` a las *flags* del compilador de C++. Tras estos pasos, la librería queda instalada y está totalmente lista para su uso.

3.5.1 Creación de DB

El primer paso consiste en crear la base de datos desde la aplicación *DB Browser for SQLite* instalada en el comando anterior. Una vez dentro de este programa, crearemos una nueva base de datos dándole al botón *New Database*. Entonces, le asignaremos un nombre (*database.db* en este caso) e inmediatamente tras crearla, procederemos a crear una tabla. En este caso, le daremos el nombre de *data* a la tabla y crearemos cinco campos mediante el botón *Add*. El primer campo lo llamaremos "id", será de tipo INTEGER y además, marcaremos las flags de NOT NULL(NN), PRIMARY KEY(PK) y AUTO INCREMENT(AI). El segundo campo lo llamaremos "name" y será de tipo TEXT. El tercer campo lo denominaremos "nKeypoints", será de tipo INTEGER y lo utilizaremos para almacenar el número de puntos clave que hay almacenados en el siguiente campo, que llamaremos "keypoints" y asignaremos un tipo BLOB. El último campo, lo denominaremos "descriptor" y también será de tipo BLOB. Entonces, pulsaremos el botón *Ok* y tendremos la tabla creada y por tanto, la base de datos lista.

Repasando lo que acabamos de realizar, el campo "id" será un número entero no nulo que se irá incrementando automáticamente con cada entrada que realicemos a la base de datos y será el principal identificador de cada entrada en la tabla. El campo "name" almacenará únicamente el nombre del usuario. El campo "nKeypoints" almacenará el número entero de puntos clave hallados mediante el programa, número muy importante para recuperar el resto de los datos. Por último, los dos últimos campos serán de tipo BLOB, ya que es un tipo que se utiliza para almacenar datos binarios y es exactamente lo que necesitamos para guardar los puntos clave y descriptor serializados.

⁴ El Structured Query Language (SQL) es un lenguaje de dominio específico diseñado para administrar y recuperar información de sistemas de gestión de bases de datos relacionales. [25]

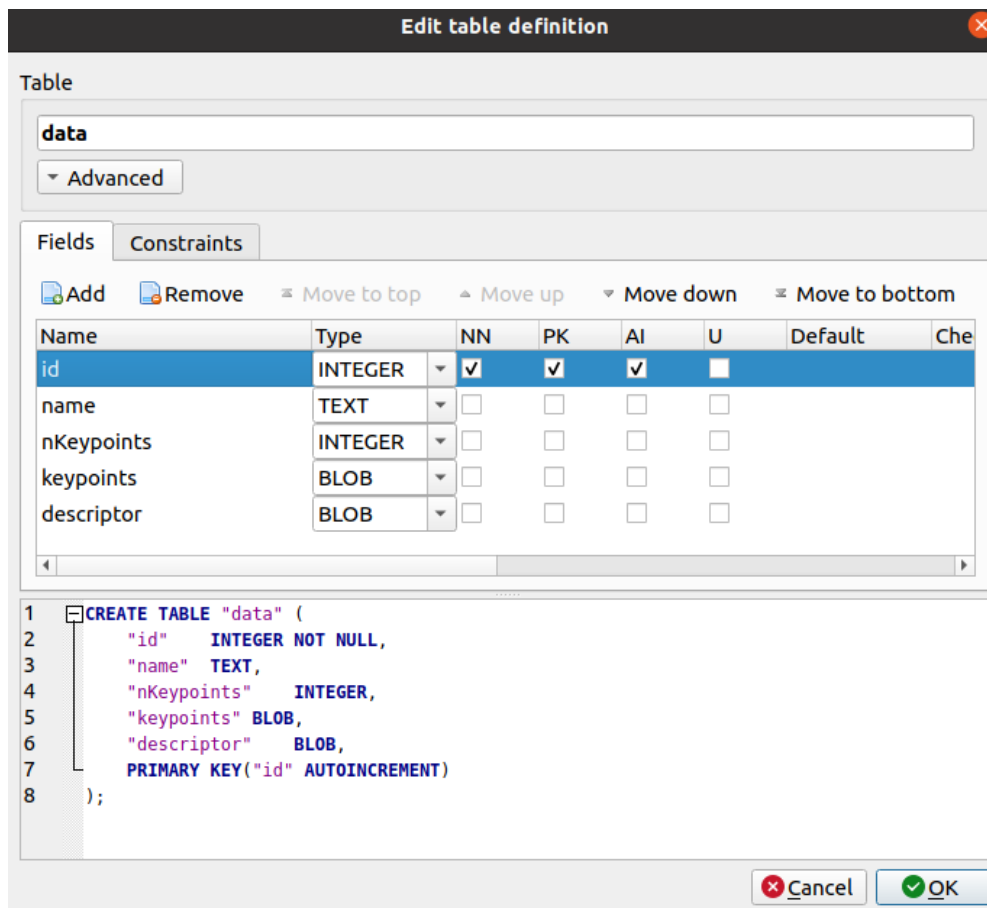


Ilustración 3-12: Creación de una tabla en DB Browser for SQLite

3.5.2 Escritura de datos

Para la escritura de datos, primero debemos solucionar el problema más complejo, serializar el descriptor. OpenCV [3] ya incluye una función para codificar imágenes en formatos conocidos. Sin embargo, sólo permite imágenes tipo *unsigned char*, es decir, imágenes cuyos píxeles tengan valores enteros comprendidos entre 0 y 255. Sin embargo, el descriptor de las características se trata de una imagen de tipo *float*. Es decir, que sus píxeles son valores decimales no necesariamente positivos y en este caso, cada píxel se corresponde con 4 bytes, tamaño del tipo *float*, a diferencia del caso anterior, que únicamente utiliza un byte por píxel. Por tanto, tendremos que hallar una manera propia de serializar la imagen para poder escribirla como una cadena de bytes en la base de datos.

La función de codificación consta únicamente de un *buffer* para el cual reservamos la memoria necesaria mediante *malloc*, para así liberar la memoria con *free* o *delete* más adelante. Entonces, recorremos cada píxel del descriptor individualmente y convertimos el valor *float* obtenido en una cadena de bytes de longitud cuatro. Entonces, recorremos esta cadena valor a valor y almacenamos los valores leídos en el *buffer* en orden. Tras estos bucles, únicamente resta devolver el *buffer* creado, quedando la imagen codificada en él.

Una vez solucionado el problema anterior, también necesitamos serializar el vector de puntos clave, la cual realizaremos de manera similar. Primero crearemos un *buffer* al cual le asignaremos tamaño para contener todos los puntos, entonces convertimos individualmente cada *Keypoint* a una cadena de bytes y, al igual que en el caso anterior, la recorremos añadiendo los valores leídos en orden al *buffer*. Entonces, ya en este punto, hemos resuelto ambos problemas de serialización⁵ y por tanto, podemos escribir los datos en una nueva entrada de la base de datos.

⁵ La serialización es el proceso de convertir un objeto en una secuencia de bytes para almacenarlo o transmitirlo a la memoria, a una base de datos o a un archivo. El proceso inverso se denomina deserialización. [27]

Para escribir los datos en la base de datos, debemos realizar ahora una serie de procesos, tales como abrir la misma en el programa, mediante el uso de la función `sqlite3_open_v2`. Una vez abierta la base de datos, antes de escribir una nueva entrada debemos comprobar si el usuario que se quiere introducir ya se encuentra en la base de datos. Para ello, crearemos una consulta que extraiga todas las entradas de la *database*. La *query* que necesitamos para esto es la siguiente:

```
SELECT * FROM data
```

Entonces, tras ejecutar la consulta, iteramos a través de todas las filas devueltas y comprobamos si el nombre de la entrada que se quiere introducir coincide con alguna de las existentes, devolviendo el número 1 en caso afirmativo. Si, por el contrario, el usuario no existía en la base de datos, termina la ejecución de la consulta y entonces se prepara para escribir los datos.

El primer paso para escribir los datos es serializar el vector de puntos clave y descriptor tal y como se ha descrito anteriormente. Una vez tenemos ambos *buffers*, continuamos y creamos una nueva consulta SQL para introducir los datos en una nueva columna. Esta nueva consulta contendrá parámetros representados por signos de interrogación para más adelante, introducir los datos antes de ejecutarla. La *query* es la siguiente:

```
INSERT INTO data(id, name, nKeypoints, keypoints, descriptor) VALUES(NULL, ?, ?, ?, ?)
```

Tras enlazar correspondientemente los datos a los parámetros anteriores, ejecutamos la consulta y si no devuelve error, terminamos la ejecución y cerramos la base de datos. En este punto, la nueva entrada ha sido introducida en la base de datos y sólo resta liberar la memoria utilizada para los *buffers*. En todo momento, si ocurre un error en cualquier paso, la función devolverá error, deteniendo la ejecución del programa. Si la función sale correctamente, devuelve el valor 0 indicando que no ha ocurrido error alguno.

3.5.3 Lectura de datos

Previamente hemos observado que hemos necesitado serializar los datos para poder escribirlos en la base de datos, por lo tanto, ahora que tenemos que leer esos datos escritos previamente, vamos a necesitar deserializarlos para poder almacenarlos en los tipos correspondientes. El proceso seguido es estrictamente el inverso y una vez comprendido el anterior, este procedimiento es simple. Comenzamos explicando la deserialización del descriptor.

La función encargada de convertir la cadena de bytes del descriptor a una imagen necesitará dos parámetros. El *buffer* de datos obtenido de la base de datos y el número de puntos clave, también obtenido de la base de datos. Entonces, crearemos una imagen en negro de tipo *float* que tenga como filas el número de puntos notables y 64 columnas, longitud de la cadena descriptora. Entonces, recorreremos individualmente cada píxel de la nueva imagen y para cada uno, vamos sacando cuatro bytes del *buffer*, los cuales reinterpretaremos como *float* e introduciremos el valor obtenido en el píxel de la imagen. Entonces, destruimos el vector temporal utilizado para almacenar los cuatro bytes que componen el número flotante. El proceso se repite hasta que la imagen ha sido completada y entonces, se devuelve, obteniendo correctamente el descriptor.

Para deserializar el vector de puntos clave, primero obtenemos cuántos hay y el *buffer* de datos escrito en la base de datos. Entonces, creamos un vector de *KeyPoint* vacío y creamos un bucle que se repetirá tantas veces como puntos notables haya. Dentro de este bucle, crearemos un vector temporal en el que almacenaremos los 28 bytes que componen un punto clave y los reinterpretaremos a su tipo correcto, entonces, lo introducimos en el vector de puntos notables y destruimos el vector temporal. Seguimos repitiendo el bucle hasta que no haya más puntos que leer en el *buffer*. De esta manera, al terminar el bucle, tendremos un vector con todos los puntos clave originales.

Una vez conocemos como reinterpretar estos *buffers* para obtener los tipos de datos adecuados, podemos leer la entrada deseada de la base de datos. Para ello, crearemos una función que devuelva en una tupla el nombre del usuario, su vector de puntos clave y su descriptor, con el único parámetro del número de identificación de la entrada (*id*). Además, añadiremos un parámetro adicional optativo con el que se da la posibilidad de pasar un puntero a una base de datos abierta, de manera que esta función se podría llamar desde otra función que, a su vez, está haciendo ya uso de la base de datos. Más adelante se explicará en que caso utilizamos esta posibilidad de la función.

El procedimiento que seguir en la función es similar a la de escritura de datos, siendo el primer paso abrir la base de datos. No obstante, en este caso puede no ser necesario abrir la base de datos. Si se detecta que se ha pasado un puntero a una base de datos, ésta no se volverá a abrir de nuevo, ya que en ese caso, devolvería un error. Entonces, creamos una consulta para obtener los datos de una entrada específica con el único parámetro de *id*. La consulta queda de la siguiente manera:

```
SELECT * FROM data WHERE id=?
```

Tras preparar la consulta anterior, enlazamos el parámetro de la consulta con el valor de *id* introducido en los parámetros de la función. Una vez realizado este proceso, ejecutamos la consulta y leemos la fila devuelta si la hay. En caso de que no exista la fila, la función devolverá un error. Si por el contrario, sí existe una fila con ese número de identificación, se leen todas las columnas (excepto la de *id*) y se deserializan el vector de puntos clave y el descriptor. Entonces, terminamos la consulta, cerramos la base de datos, limpiamos la memoria de los *buffers* y devolvemos una nueva tupla con el nombre, vector de puntos notables e imagen descriptora de la anatomía vascular del dedo de la persona con el *id* introducido.

3.5.4 Búsqueda de la mejor coincidencia

Realmente, lo que nos interesa para el funcionamiento del programa, es que éste sea capaz de encontrar la mejor coincidencia entre todas las entradas de la base de datos, devolviendo la entrada con la que tenga mayor similitud. Esto lo haremos en base al número de puntos que el dedo introducido es capaz de emparejar con las entradas de la base de datos. Para ello, crearemos una función que obtenga todas las filas de la base de datos y realice esta comprobación para cada una de ellas, devolviendo finalmente la entrada con la que el usuario tenga mayor correspondencia de puntos.

La función creada devolverá una tupla que contenga el nombre del usuario de la entrada, su vector de puntos clave y su descriptor, mientras que el único parámetro de entrada será una tupla que contenga las características del usuario que introduce el dedo, es decir, su vector de puntos notables y su descriptor. A continuación realizaremos una descripción del funcionamiento de esta rutina.

El primer paso que debemos realizar es la apertura de la base de datos y preparar una consulta para obtener todas las filas y columnas de la base de datos, tal como la primera *query* del punto 3.5.2. Entonces, creamos una tupla del tipo de salida de función para contener la mejor coincidencia y una variable de tipo entero para almacenar el número de correspondencias de la mejor coincidencia, inicialmente cero. En este momento, comenzamos a leer todas las entradas de la base de datos individualmente. Esto lo conseguimos leyendo el *id* de la fila y utilizando la función del punto 3.5.3, a la que le pasaremos el parámetro opcional de puntero a la base de datos, ya que la tenemos abierta en esta función. Esto nos devolverá una entrada de la base de datos y la compararemos con nuestro comparador de tipo FLANN con los *features* introducidos en la función. Ahora, si la cantidad de puntos emparejados es mejor que la actual, actualiza tanto el valor de esta variable como la variable de entrada de mejor coincidencia. Este proceso se repite hasta que no haya más entradas que leer y cuando termine el bucle, se devuelve la entrada de mejor coincidencia o un error en caso de que no se haya conseguido emparejar ningún punto.

Para comprender de manera más sencilla el funcionamiento de la rutina anterior, en la figura de más adelante se muestra un diagrama de flujo del proceso seguido por la función.

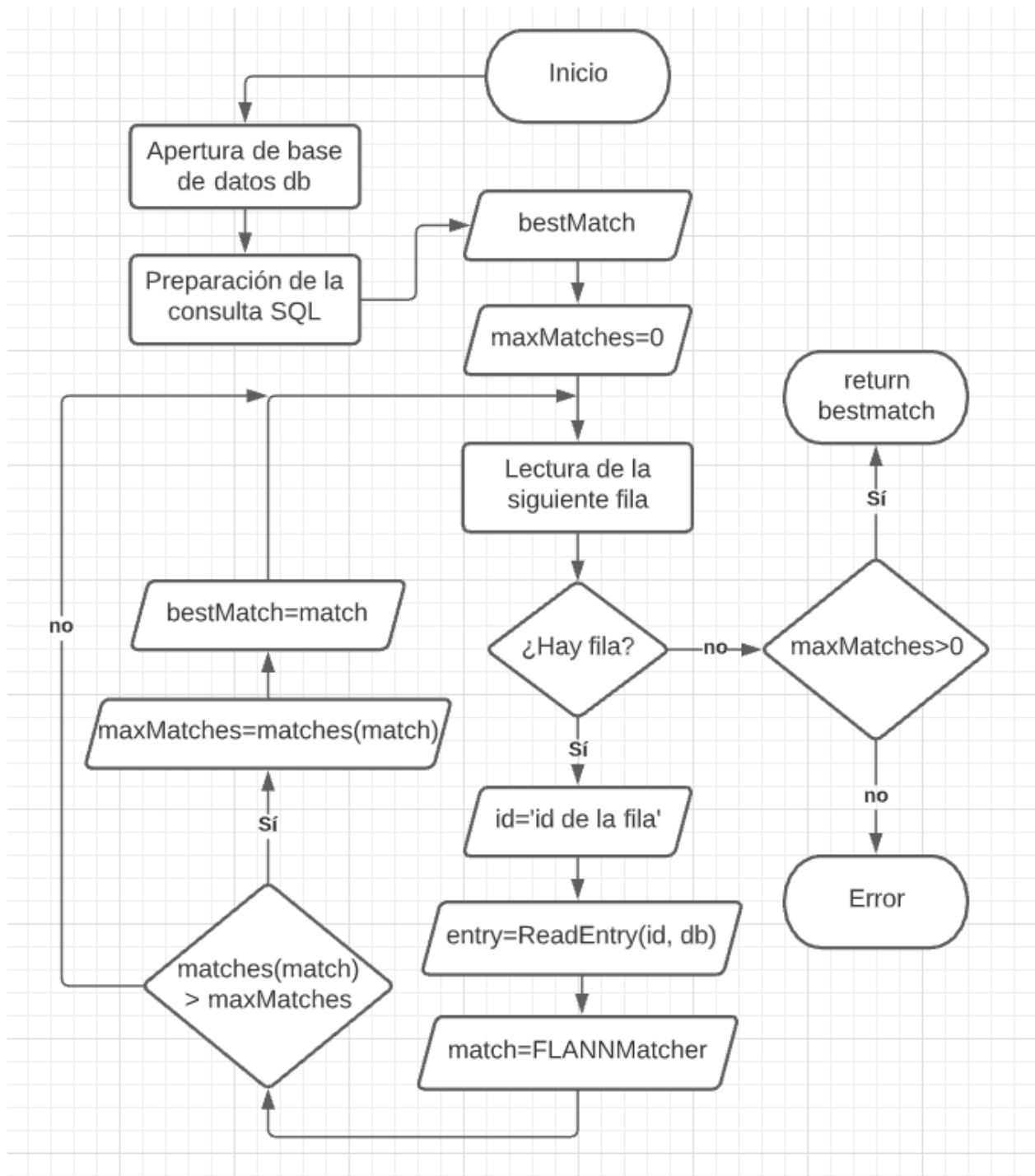


Ilustración 3-13: Diagrama de flujo de función de búsqueda de mejor coincidencia

REFERENCIAS

- [1] N. Miura, A. Nagasaka and T. Miyatake, "Personal identification device and method". Japan Patent JP2000274987A, 6 September 2000.
- [2] J. Rice, "Method and apparatus for the identification of individuals". France Patent WO1985004088A1, 20 March 1984.
- [3] Intel Corporation, «OpenCV,» June 2000. [En línea]. Available: <https://opencv.org>.
- [4] P. F. Alcantarilla, A. Bartoli y A. J. Davison, «KAZE Features,» de *European Conference on Computer Vision (ECCV)*, Firenze, Italy, 2012.
- [5] VISHAY, «Farnell,» 13 March 2014. [En línea]. Available: <https://www.farnell.com/datasheets/2049675.pdf>.
- [6] FAIRCHILD, «Farnell,» February 2016. [En línea]. Available: <https://www.farnell.com/datasheets/2304818.pdf>.
- [7] Texas Instruments, «Texas Instruments,» August 2019. [En línea]. Available: https://www.ti.com/lit/ds/symlink/ulq2004a.pdf?HQS=TI-null-null-alldatasheets-df-pf-SEP-ww&ts=1627562157184&ref_url=https%253A%252F%252Fpdf1.alldatasheet.es%252F.
- [8] NVIDIA, «NVIDIA DEVELOPER,» NVIDIA, [En línea]. Available: <https://developer.nvidia.com/embedded/jetson-nano-developer-kit>.
- [9] Orange Pi, «Orange Pi,» Orange Pi, [En línea]. Available: <http://www.orangepi.org/Orange%20Pi%204B/>.
- [10] Beagleboard Org, «Beagleboard,» 2 February 2018. [En línea]. Available: <https://beagleboard.org/x15>.
- [11] F. J. G. Flores, «Github,» 2021. [En línea]. Available: <https://github.com/fraciscoestar/TFG>.
- [12] Multimedia Signal Processing and Security Lab, «PLUS OpenVein Finger- and Hand-Vein Toolkit,» 21 July 2021. [En línea]. Available: <http://wavelab.at/sources/OpenVein-Toolkit/>.
- [13] B. Nevils, T. Mimbs, N. Naheed y A. Sailesh, «High Frequency Emphasis Filter Instead of Homomorphic Filter,» de *2018 International Conference on Computational Science and Computational Intelligence (CSCI)*, Las Vegas, NV, USA, 2018.
- [14] J. Zhao, H. Tian, W. Xu y X. Li, «A New Approach to Hand Vein Image Enhancement,» de *2009 Second International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation*, Changsha, China, 2009.
- [15] J. Zhang, T. Tan y L. Ma, «Invariant texture segmentation via circular Gabor filters,» de *2002 International Conference on Pattern Recognition*, Quebec City, QC, Canada, 2002.
- [16] J. Zhang y J. Yang, «Finger-Vein Image Enhancement Based on Combination of Gray-Level Grouping

and Circular Gabor Filter,» de *2009 International Conference on Information Engineering and Computer Science*, Wuhan, China, 2009.

- [17] R. Funayama, H. Yanagihara, L. Van Gool, T. Tuytelaars y H. Bay, «ROBUST INTEREST POINT DETECTOR AND DESCRIPTOR». US Patente US20090238460A1, 24 September 2009.
- [18] D. G. Lowe, «Method and apparatus for identifying scale invariant features in an image and use of same for locating an object in an image». US Patente US6711293B1, 23 March 2004.
- [19] D. G. Lowe, «Distinctive Image Features from Scale-Invariant Keypoints,» *International Journal of Computer Vision*, n° 60, pp. 91-110, 2004.
- [20] S. Y. Sharma, «Techawarey,» 25 April 2020. [En línea]. Available: <http://techawarey.com/programming/install-opencv-c-c-in-ubuntu-18-04-lts-step-by-step-guide/>.
- [21] Q-engineering, «Q-engineering,» 30 July 2021. [En línea]. Available: <https://qengineering.eu/install-opencv-4.5-on-raspberry-pi-4.html>.
- [22] G. Webster, «CNN,» 5 July 2010. [En línea]. Available: <https://edition.cnn.com/2010/WORLD/europe/07/05/first.biometric.atm.europe/index.html>.
- [23] J. Hashimoto, «Finger Vein Authentication Technology and Its Future,» de *2006 Symposium on VLSI Circuits, 2006. Digest of Technical Papers*, Honolulu, HI, USA, 2006.
- [24] «Wikipedia,» 4 February 2021. [En línea]. Available: https://es.wikipedia.org/wiki/ARM_big.LITTLE.

ANEXO A: INSTALACIÓN DE OPENCV 4

Para comenzar, en este anexo primero debemos diferenciar entre la instalación realizada en el sistema, es decir, sobre la *Raspberry Pi 4* en un OS Raspbian y la instalación realizada sobre un sistema Ubuntu utilizado para programar de manera más rápida y efectiva. La instalación se realiza de manera distinta dependiendo del sistema. En este apéndice se explicará la instalación de la API en ambos sistemas.

Comenzando por la instalación sobre el sistema Ubuntu [20], empezamos por actualizar el sistema e instalar unas aplicaciones que nos ayudarán más adelante. Esto se realiza con los siguientes comandos:

```
$ sudo apt-get update && sudo apt-get upgrade
$ sudo apt install software-properties-common
$ sudo apt install apt-file
```

A continuación, hay que instalar todas las dependencias de las librerías con los siguientes comandos:

```
$ sudo apt-get install build-essential cmake git libgtk2.0-dev pkg-config
libavcodec-dev libavformat-dev libswscale-dev
$ sudo apt-get install python3.5-dev python3-numpy libtbb2 libtbb-dev
$ sudo apt-get install libjpeg-dev libpng-dev libtiff5-dev libjasper-dev
libdc1394-22-dev libeigen3-dev libtheora-dev libvorbis-dev libxvidcore-
dev libx264-dev sphinx-common libtbb-dev yasm libfaac-dev libopencore-
amrnb-dev libopencore-amrwb-dev libopenexr-dev libgstreamer-plugins-
base1.0-dev libavutil-dev libavfilter-dev libavresample-dev
```

Ahora, necesitamos descargar todo el código fuente de *OpenCV* [3] para compilarlo posteriormente, para ello hay varias maneras, pero la más sencilla es desde la consola:

```
$ sudo -s
$ cd /opt
$ wget https://github.com/opencv/opencv/archive/4.5.2.zip
$ unzip 4.5.2.zip
$ mv opencv-4.5.2/ opencv/
$ rm 4.5.2.zip
$ wget https://github.com/opencv/opencv_contrib/archive/4.5.2.zip
$ unzip 4.5.2.zip
$ mv opencv_contrib-4.5.2/ opencv_contrib/
$ rm 4.5.2.zip
```

El siguiente paso es la compilación del código, que se realiza de la siguiente manera:

```
$ cd opencv
$ mkdir release
$ cd release
$ cmake -D BUILD_TIFF=ON -D WITH_CUDA=OFF -D ENABLE_AVX=OFF -D
WITH_OPENGL=OFF -D WITH_OPENCL=OFF -D WITH_IPP=OFF -D WITH_TBB=ON -D
BUILD_TBB=ON -D WITH_EIGEN=OFF -D WITH_V4L=OFF -D WITH_VTK=OFF -D
BUILD_TESTS=OFF -D BUILD_PERF_TESTS=OFF -D OPENCV_ENABLE_NONFREE=ON -D
OPENCV_GENERATE_PKGCONFIG=ON -D CMAKE_BUILD_TYPE=RELEASE -D
CMAKE_INSTALL_PREFIX=/usr/local -D OPENCV_EXTRA_MODULES_PATH=
/opt/opencv_contrib/modules /opt/opencv/
$ make -j8
$ make install
$ ldconfig
$ exit
```

El único paso restante es mover el archivo de *pkg-config* de *OpenCV* a la ubicación correcta. Esto se realiza de la siguiente manera:

```
$ cd /usr/local/lib/pkgconfig/
$ sudo cp opencv4.pc /usr/lib/x86_64-linux-gnu/pkgconfig/opencv.pc
$ pkg-config --modversion opencv
```

Sabremos si la instalación se ha realizado de manera correcta si el último comando nos devuelve el valor de 4.5.2. Para compilar los programas con *OpenCV* tendremos que añadir a los argumentos de compilación las flags:

```
-std=c++17 `pkg-config --cflags --libs opencv`
```

En este punto, ya hemos terminado con la instalación en un sistema *Ubuntu*. A continuación, se explicará el mismo proceso para un sistema *Raspbian* funcionando sobre una *RP4* [21]. Al igual que antes, es necesario actualizar el sistema e instalar las dependencias descritas anteriormente. Además, tendremos que actualizar el *Firmware* de la EEPROM de la placa de la siguiente manera:

```
$ sudo rpi-eeprom-update -a
$ sudo reboot
```

Antes de compilar las librerías, necesitamos asegurarnos de que hay suficiente memoria para la compilación. Como la *RP4* tiene características reducidas con respecto al sistema anterior, debemos aumentar la memoria *swap* del OS. Para ello, debemos modificar la propiedad *CONF_MAXSWAP* de un archivo, cambiando su valor a 4096. Para editar este archivo se hace de la siguiente manera:

```
$ sudo nano /sbin/dphys-swapfile
$ sudo reboot
```

Aparte de las dependencias descargadas anteriormente, en este caso, se necesitan descargar algunas dependencias extras:

```
$ sudo apt-get install gfortran libgif-dev libcanberra-gtk* libgtk-3-dev
libv4l-dev libopenblas-dev libatlas-base-dev libblas-dev liblapack-dev
libhdf5-dev protobuf-compiler qt5-default
```

Ahora, al igual que antes, descargamos las librerías de *OpenCV*, pero lo haremos en una ubicación distinta. En lugar de descargar el código fuente en */opt*, lo haremos en *~*. Entonces, procedemos a la instalación:

```
$ cd opencv
$ mkdir build
$ cd build
$ cmake -D CMAKE_BUILD_TYPE=RELEASE -D CMAKE_INSTALL_PREFIX=/usr/local -D
OPENCV_EXTRA_MODULES_PATH=~/.opencv_contrib/modules -D ENABLE_NEON=ON -D
ENABLE_VFPV3=ON -D WITH_OPENMP=ON -D WITH_OPENCL=OFF -D BUILD_ZLIB=ON
-D BUILD_TIFF=ON -D WITH_FFMPEG=ON -D WITH_TBB=ON -D BUILD_TBB=ON -D
BUILD_TESTS=OFF -D WITH_EIGEN=OFF -D WITH_GSTREAMER=OFF -D WITH_V4L=ON
-D WITH_LIBV4L=ON -D WITH_VTK=OFF -D BUILD_EXAMPLES=OFF -D WITH_QT=ON
-D OPENCV_ENABLE_NONFREE=ON -D INSTALL_C_EXAMPLES=OFF -D
INSTALL_PYTHON_EXAMPLES=OFF -D BUILD_opencv_python3=TRUE -D
OPENCV_GENERATE_PKGCONFIG=ON ..
$ make -j4
$ sudo make install
$ sudo ldconfig
$ make clean
$ sudo apt-get update
```

De esta manera, completamos la instalación para la *RP4*. El proceso de compilación puede tardar alrededor de una hora y media y una vez esté instalado, los argumentos que necesitamos añadir al compilador son similares. Por último, debemos regresar la configuración *CONF_MAXSWAP* a su valor original, de la misma manera que fue cambiada en pasos anteriores. El valor por defecto es 100.

ANEXO B: CÓDIGO DE WEBCAM.CPP

Este fichero *webcam.cpp* se trata de un archivo de código fuente escrito en C++ expresamente para su uso sobre el sistema *Raspberry Pi 4* con la placa de iluminación conectada. El ejecutable resultado de la compilación del siguiente código se dedicará a tomar imágenes en bucle mientras que la luz está encendida. De esta manera, la aplicación actúa de webcam con iluminación infrarroja, para poder comprobar si tanto la cámara como la iluminación funcionan de forma correcta y esperada. El código fuente se muestra a continuación:

```
#include <iostream>
#include <opencv2/highgui.hpp>
#include <opencv2/imgproc.hpp>
#include <opencv2/imgcodecs.hpp>
#include <wiringPi.h>

using namespace std;
using namespace cv;

int main(int argc, char const *argv[])
{
    Mat img;
    VideoCapture vc(0);

    while (true)
    {
        // Activate Lights //////////////////////////////////
        wiringPiSetup();
        pinMode(4, OUTPUT);
        pinMode(5, OUTPUT);

        digitalWrite(4, HIGH); //980nm
        digitalWrite(5, HIGH); //850nm
        //////////////////////////////////

        // Take image //////////////////////////////////
        vc.read(img);
        imshow("Img", img);
        //////////////////////////////////

        // Deactivate Lights //////////////////////////////////
        digitalWrite(4, LOW);
        digitalWrite(5, LOW);
        //////////////////////////////////

        waitKey(1);
    }

    return 0;
}
```


ANEXO C: CÓDIGO DE MAIN.CPP (UBUNTU)
