



# Diseño y Evaluación de un Sistema IoT para la Estimación de la Señal Respiratoria con Video Analítica

**William Fernando Rodríguez Sarmiento**

Pontificia Universidad Javeriana  
Facultad de Ingeniería - Maestría en Ingeniería del Internet de las Cosas  
Bogotá D.C., Colombia  
2022

# Diseño y Evaluación de un Sistema IoT para la Estimación de la Señal Respiratoria con Video Analítica

**William Fernando Rodríguez Sarmiento**

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Magíster en Ingeniería del Internet de las Cosas**

Director(a):

Francisco Carlos Calderón Bocanegra, Ph.D

Énfasis de Profundización:

Diseño de Sistemas Embebidos para IoT

Pontificia Universidad Javeriana

Facultad de Ingeniería - Maestría en Ingeniería del Internet de las Cosas

Bogotá D.C., Colombia

2022

(Dedicatoria)

*A mi madre, quien fue la motivación de este proyecto*

Al amor, por apoyarme, ayudarme y acompañarme en cada momento.

# Agradecimientos

Inicialmente, agradezco a mis padres: Gloria Stella (QEPD) y Fernando por haber depositado en mí su amor incondicional, confianza infinita y la fuerza necesaria para continuar construyendo mi carrera profesional. También a mis hermanas, Merybel y Liliana, por apoyarme y acompañarme en cada uno de mis logros. Así mismo, quiero agradecer, a los profesores de esta Maestría y en especial al PhD. Francisco Calderon por sus aportes académicos y por llenarme de herramientas para seguir construyendo proyectos tecnológicos que aporten a la sociedad. Por último, pero no menos importante, a la Pontificia Universidad Javeriana, por abrirme sus puertas y darme la oportunidad de realizar esta Maestría.

## Resumen

La apnea obstructiva del sueño (AOS) es una enfermedad que la padecen más de cien millones de personas en el mundo. Para ser diagnosticada, se requiere de una valoración en donde las personas son monitoreadas durante toda una noche mientras duermen, estos exámenes son incómodos y su agendamiento es demorado. Este trabajo de grado desarrolla un sistema que permite el monitoreo e identificación de la frecuencia respiratoria de una persona en estado de sueño a partir de la técnica de magnificación de video por medio de video-analítica en la nube, para el apoyo en la valoración y diagnóstico de la AOS. En términos metodológicos, se realiza un análisis en un sistema remoto para el reconocimiento de la frecuencia respiratoria mediante la magnificación de video de la grabación de una persona en estado de sueño. Por su parte el estado del arte permite mostrar que existen trabajos previos de los cuales se ha implementado la video analítica para la detección de signos vitales. Las pruebas realizadas demuestran que el sistema tiene un grado de precisión del 97.87 % comparado con un sensor compuesto por dispositivos electrónicos comerciales. Finalmente, se concluye en términos generales que el sistema propuesto tiene el potencial para consolidarse como un sistema que contribuya en el área de la salud a la detección de la AOS.

**Palabras clave:** IoT, Apnea de sueño, Magnificación de video, Computación en la nube.

## Abstract

Obstructive sleep apnea (OSA) is a disease suffered by more than one hundred million people in the world. To be diagnosed, an assessment is required where people are monitored overnight while they sleep, these exams are uncomfortable and their scheduling is delayed. This degree work develops a system that allows the monitoring and identification of the respiratory frequency of a person in a dream state from the technique of video magnification through video-analytics in the cloud, for support in the assessment and OSA diagnosis. In methodological terms, an analysis is carried out on a remote system for the recognition of respiratory rate by means of video magnification of the recording of a person in a dream state. For its part, the state of the art allows us to show that there are previous works of which video analysis has been implemented for the detection of vital signs. The tests carried out show that the system has a degree of precision of 97.87 % compared to a sensor composed of commercial electronic devices. Finally, it is concluded in general terms that the proposed system has the potential to consolidate as a system that contributes to the detection of OSA in the health area.

**Keywords:** IoT, Sleep Apnea, Video Magnification, Cloud computing.

# Contenido

<b>Agradecimientos</b>	<b>iv</b>
<b>Resumen</b>	<b>v</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>2</b>
1.1 Introducción . . . . .	2
1.2 Objetivos . . . . .	4
1.2.1 Objetivo general . . . . .	4
1.2.2 Objetivos específicos . . . . .	4
<b>2 Estado del Arte</b>	<b>5</b>
<b>3 Sistema</b>	<b>9</b>
3.1 Arquitectura . . . . .	10
3.1.1 Adquisición de video . . . . .	10
3.1.2 Transmisión . . . . .	10
3.1.3 Video analítica . . . . .	10
3.1.4 Visualización . . . . .	11
<b>4 Desarrollos</b>	<b>12</b>
4.1 Infraestructura . . . . .	12
4.2 Etapa captura de video . . . . .	13
4.3 Envío por Streaming . . . . .	16
4.4 Procesamiento remoto de video . . . . .	16
4.5 Generación de reporte . . . . .	20
4.6 Evaluación . . . . .	22
<b>5 Experimentos y Análisis de Resultados</b>	<b>24</b>
5.1 Infraestructura . . . . .	24
5.2 Adquisición de video . . . . .	25
5.3 Envío por streaming . . . . .	26
5.4 Procesamiento remoto de video . . . . .	27
5.4.1 Magnificación de video . . . . .	27
5.4.2 Detección de Frecuencia respiratoria . . . . .	28

---

5.5	Evaluación . . . . .	31
5.6	Análisis de Madurez Tecnológica . . . . .	33
<b>6</b>	<b>Conclusiones y Trabajo Futuro</b>	<b>35</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>37</b>

# Lista de Figuras

2-1	Prueba de sueño domiciliaria ApneaLink ResMed. . . . .	5
2-2	Prueba de sueño domiciliaria Alice NigthOne Philips Respironics. . . . .	6
3-1	Diagrama de bloques del sistema. . . . .	9
3-2	Arquitectura detallada del sistema. . . . .	10
4-1	Cobertor no reflectivo y cámara con tripode portable . . . . .	12
4-2	Especificaciones técnicas cámara Bosh Dinion 5000 HD. . . . .	13
4-3	Diagrama de flujo captura de video . . . . .	15
4-4	Trama del nombre de los fragmentos de video generados . . . . .	16
4-5	Diagrama de flujo general procesamiento de video . . . . .	17
4-6	Diagrama de flujo proceso EVM . . . . .	18
4-7	Diagrama de flujo detección de frecuencia respiratoria . . . . .	19
4-8	Diagrama de flujo generación de reporte . . . . .	20
4-9	Reporte ejemplo con gráfica de comportamiento respiratorio . . . . .	21
4-10	Sensor para evaluación de frecuencia respiratoria . . . . .	22
4-11	Diagrama esquemático sensor para evaluación de frecuencia respiratoria . . . . .	23
5-1	Pruebas de reconocimiento con diferentes materiales y formas . . . . .	25
5-2	Plano de posición de la cámara . . . . .	26
5-3	Pruebas para elegir el método de EVM . . . . .	27
5-4	Pruebas de detección con cobertor blanco . . . . .	28
5-5	Pruebas de detección con cobertor negro . . . . .	29
5-6	Gráfica de frecuencia respiratoria obtenida del fragmento de 30 seg de la persona 1 . . . . .	30
5-7	Gráfica de frecuencia respiratoria obtenida del fragmento de 30 seg de la persona 2 . . . . .	30
5-8	Gráfica de frecuencia respiratoria obtenida del fragmento de 30 seg de la persona 3 . . . . .	31
5-9	Gráfica de frecuencia respiratoria obtenida del sensor de contacto . . . . .	32
5-10	Gráfica de frecuencia respiratoria obtenida del sistema de video analítica . . . . .	32

# Lista de Tablas

5-1	Tabla comparativa de frecuencia respiratoria entre el sistema de video analítica y el sensor de contacto . . . . .	33
-----	--	----

# 1 Introducción

## 1.1. Introducción

La cuarta revolución industrial se caracteriza por una gama de nuevas tecnologías que fusionan los mundos físico, digital y biológico, impactando todas las disciplinas, economías e industrias [1]. Dentro de estas tecnologías se encuentra el internet de las cosas (IoT), la computación en la nube, el machine learning, la minería de datos y la inteligencia artificial, que surgen a raíz de la importancia que tiene el “dato” y su incidencia tecnológica para la humanidad. Es así como en la actualidad, muchas de estas tecnologías se implementan en diferentes disciplinas asociadas al área de la salud como por ejemplo la telemedicina.

La apnea obstructiva del sueño (AOS), es un trastorno en el que se presentan alteraciones a nivel respiratorio, afectando la salud de un considerable número de personas alrededor del mundo, se estima que aproximadamente, más de cien millones de personas padecen dicho trastorno [2]. En este sentido, la AOS específicamente, hace referencia a una condición médica en la que existe una obstrucción de las vías respiratorias, toda vez que se relajan los músculos a nivel de la garganta durante el sueño. De acuerdo con algunos autores, por su complejidad clínica, es considerada como una enfermedad potencialmente riesgosa. Por su parte, en un estudio realizado en Colombia, se calcula que el 20% de adultos de edad media tiene al menos AOS leve y el 80% de los casos permanecen sin diagnosticar [3]. Como la mayoría de las condiciones médicas, constantemente se realizan estudios con el fin de diagnosticar sus causas y posibles tratamientos. En este sentido, el estándar más usado actualmente para la monitorización y evaluación del sueño se realiza mediante la polisomnografía nocturna (PSG) en una clínica del sueño. La PSG es un examen que se realiza con el fin de diagnosticar trastornos asociados al sueño y es uno de los exámenes ampliamente extendidos y utilizados en las clínicas o centros especializados en el estudio sueño para diagnosticar la AOS. Particularmente, el proceso implica conectar más de 20 sensores al durmiente para registrar continuamente ciertos signos vitales mediante estudios como el electroencefalograma, el electrocardiograma, el electromiograma, la saturación de oxígeno, el flujo nasal y el movimiento respiratorio de las paredes del tórax y el abdomen [4]. Por su complejidad, la monitorización clínica nocturna de la PSG es cara [5], los tiempos de espera son largos [6] y pueden resultar inconvenientes e incómodos.

Teniendo en cuenta los planteamientos anteriormente descritos, este trabajo de grado pro-

pone desarrollar un sistema que permita el monitoreo e identificación de la frecuencia respiratoria de una persona en estado de sueño, a partir de la técnica de magnificación de video (EVM), por sus siglas en inglés, por medio de video-analítica en la nube, para el apoyo en la valoración y diagnóstico de la AOS. En este sentido, es preciso integrar el hardware necesario para adquirir un stream de video durante el estado de sueño de una persona; de igual forma, se requiere implementar la técnica de EVM propuesta por el MIT para la detección de la frecuencia respiratoria durante el estado de sueño de una persona. [7]. Por otra parte, se evalúa el desempeño de las mediciones de frecuencia respiratoria obtenidas en el procesamiento de video con medidores comerciales de uso particular.

Este proyecto permite ejemplificar la fusión de distintos campos tecnológicos como el IoT, el procesamiento digital de imágenes y la analítica, para apoyar el avance del diagnóstico de pacientes en el área de la telemedicina, lo que podría aportar de manera significativa a la productividad y la experiencia de los usuarios que requieren de una valoración oportuna sobre la AOS. Dado que el proyecto está enfocado en la integración del IoT como alternativa para el diagnóstico de la AOS, presenta posibilidades como protección de datos sensibles, eficiencia con respecto al procesamiento, facilidad de trabajo desde cualquier lugar, control de documentos y seguridad [8]. Así mismo, brinda un mejor servicio a los pacientes [9]. También, se encuentra alineado con los siguientes objetivos de desarrollo sostenibles (ODS), propuestos por la ONU:

Salud y bienestar (3): Garantizar una vida sana y promover el bienestar de todos a todas las edades, ya que se enfoca en aumentar el acceso a servicios de salud esenciales de calidad [10]. Al ser un sistema que pretende agilizar los procedimientos para el diagnóstico de la AOS disminuyendo los tiempos de espera, además de ofrecer bienestar a los pacientes por ser un sistema no invasivo.

Industria innovación e infraestructura (9): Aumentar la investigación científica y mejorar la capacidad tecnológica de los sectores industriales de todos los países, en particular los países en desarrollo, entre otras cosas fomentando la innovación y aumentando considerablemente, de aquí a 2030, el número de personas que trabajan en investigación y desarrollo por millón de habitantes y los gastos de los sectores público y privado en investigación y desarrollo [10].

Así mismo, el trabajo de grado permite innovar en el área de la salud, particularmente en el ámbito del tediagnóstico, permitiendo que el profesional de la salud se conecte desde cualquier parte del mundo, pueda acceder a la nube y dar su concepto. Por otra parte, si con los resultados del proyecto, el sistema propuesto es complementado y ofrecido comercialmente, adicionalmente se puede alinear a los siguientes objetivos:

Energía asequible y no contaminante (7): De aquí a 2030, duplicar la tasa mundial de mejora de la eficiencia energética [10]. Ya que el sistema está conformado por dispositivos electrónicos de bajo consumo, ayudaría en el ahorro de consumo eléctrico comparado con el sistema de diagnóstico de AOS tradicional.

Vida submarina (14): De aquí a 2025, prevenir y reducir significativamente la contaminación marina de todo tipo, en particular la producida por actividades realizadas en tierra, incluidos los detritos marinos y la polución por nutrientes [10]. Ya que es un sistema inalámbrico tiene el potencial para disminuir el consumo de insumos desechables que actualmente se usan para conectar a los pacientes con el sistema de diagnóstico y que son una fuente de contaminación que llega a los océanos [11].

Específicamente, en este trabajo de grado se desarrolla el diseño y evaluación de un sistema para el diagnóstico de la AOS mediante EVM. En términos de su contenido se encuentra una revisión de las investigaciones realizadas previas a este trabajo y que se consideran como referentes o antecedentes comerciales y técnicos. De manera contigua, se detallan las especificaciones técnicas de la conformación del sistema y sus partes. Así mismo, se describe el proceso de desarrollo de programación que permite dar cuenta de los resultados y sus formas de obtención a partir de las pruebas realizadas. Finalmente, se exponen las conclusiones que derivan del trabajo y se traza una línea de referenciación para mejoras y trabajos futuros.

## 1.2. Objetivos

### 1.2.1. Objetivo general

Desarrollar un sistema que permita el monitoreo e identificación de la frecuencia respiratoria de una persona en estado de sueño a partir de la técnica de magnificación de video por medio de video-analítica en la nube, para el apoyo en la valoración y diagnóstico de la Apnea Obstructiva del Sueño.

### 1.2.2. Objetivos específicos

- Integrar el hardware necesario para adquirir un stream de video durante el estado de sueño de una persona.
- Implementar la técnica de magnificación de video propuesta por el MIT para la detección de la frecuencia respiratoria durante el estado de sueño de una persona [7].
- Evaluar el desempeño de las mediciones de frecuencia respiratoria obtenidas en el procesamiento de video con medidores comerciales de uso particular.

## 2 Estado del Arte

Dada la demanda de personas que requieren de un diagnóstico de la AOS y la poca disponibilidad para atender estos casos por parte de las clínicas del sueño, se ofrecen, en la actualidad, alternativas en las que es posible realizar exámenes domiciliarios. Por esta razón, en primera instancia la búsqueda de antecedentes se centra en productos comerciales existentes para la evaluación y diagnóstico domiciliario de la apnea del sueño. En este sentido, uno de los productos encontrados, refiere al sistema ApneaLink Air [12] de la marca ResMed, un equipo de estudio domiciliario para el comportamiento del sueño que mide el esfuerzo respiratorio, el pulso, la saturación de oxígeno, el flujo nasal y los ronquidos; para su uso, es necesario que la persona evaluada conecte los accesorios como cánula nasal, pulsioxímetro, banda de esfuerzo respiratorio, así como la asistencia posterior de un especialista que descargue los resultados para su análisis.



**Figura 2-1:** Prueba de sueño domiciliaria ApneaLink ResMed.

Por otra parte, Philips respironics, tiene dentro de su portafolio, un sistema para el estudio domiciliario del sueño, el Alice NighthOne, consiste en un dispositivo diseñado para analizar distintos patrones de sueño nocturno. De acuerdo con su creador, Alice NightOne utiliza la tecnología recomendada por la Academia Estadounidense de Medicina del Sueño (AASM) para estudios en el laboratorio. Tres sensores externos (esfuerzo, flujo y oximetría) conectados al paciente, proporcionan siete canales de datos de parámetros del sueño. El sistema cuenta con un software que permite descargar la data después de terminado el examen. [13]



**Figura 2-2:** Prueba de sueño domiciliaria Alice NighthOne Philips Resironics.

Así mismo, existe un dispositivo llamado MonBaby [14] que se encuentra interconectado a un aplicativo móvil, este dispositivo consta de un sensor integrado en un botón que es instalado a nivel del pecho de un bebé para monitorear tanto su movimiento torácico como los momentos en los que deja de respirar por más de 15 segundos para posteriormente, enviar al aplicativo móvil las alarmas correspondientes.

Hasta el momento, estos dispositivos comerciales, requieren de la instalación de sensores en distintas partes del cuerpo, lo cual podría estar relacionado con procedimientos que son incómodos para quien toma el examen, y la posible alteración de la calidad del sueño, puesto que es necesario que la persona esté en posiciones específicas durante la toma del mismo; esto puede ocasionar una alteración del ambiente habitual de descanso.

Dadas estas implicaciones, se expone a continuación una revisión documental de artículos relacionados con aplicaciones que detectan señales vitales por medio de procesamiento de video, los cuales se pueden considerar como sistemas que no representan intervenciones categorizadas como invasivas.

Uno de los artículos revisados, inicialmente, corresponde al trabajo realizado por el Instituto Técnico de Massachusetts (MIT) en el que se desarrolla un método de EVM, que en el caso particular dirige pruebas para el análisis del flujo de sangre y pequeños movimientos corporales de una persona. Para ello, el método revela variaciones temporales en videos (movimientos, color, entre otros), que son difíciles de percibir por el ojo humano. Para analizar dichas variaciones, toman una secuencia de video estándar y le aplican una descomposición espacial, seguida de un filtrado temporal a los fotogramas; el cual permite visualizar el flujo de sangre a medida que pasa por el rostro y también amplificar y revelar movimientos como el movimiento torácico subyacente a la respiración. [7]

De manera similar, el Departamento de Informática de la Universidad Federal de Tecnología Paraná, presentan un método para monitoreo sin contacto de la saturación de oxígeno. Así,

---

mediante la EVM amplifican los cambios de color de una persona a nivel facial, para después analizar dichos cambios mediante fotopleletismografía de imágenes. Los resultados del estudio tienden a ser precisos en tanto que son comparados con un pulsioxímetro, obteniendo una diferencia menor a un 2%. [15]

Así mismo, el Politécnico Electrónico del Estado de Surabaya, Indonesia, desarrolla un sistema de monitoreo de frecuencia cardíaca y respiratoria de base visual, utilizando una cámara de video estándar de 30 cuadros por segundo (fps) como sensor principal. En este trabajo, emplean la magnificación del color y el movimiento de la piel de para obtener señales cardíacas y respiratorias. Así los resultados derivados de 28 personas participantes del estudio, proporcionaron un nivel de aceptación del 95% en comparación con el sensor de contacto, que usaron como herramienta de validación. [16]

En cuanto a los antecedentes relacionados con el análisis de vídeo para la detección específica de la apnea del sueño, se identifican los siguientes trabajos:

La universidad de Toronto propone un método no invasivo para rastrear la frecuencia cardíaca y respiratoria para mejorar el monitoreo y la detección de la apnea del sueño, por medio del análisis de movimiento de grabaciones de video infrarrojas. Este método puede resultar adecuado para la monitorización nocturna sin contacto de la frecuencia respiratoria [4]. En esta misma línea, la universidad Técnica Europea de Eindhoven, valida un sistema de monitoreo sin contacto de la AOS; en el que, por medio de varias horas de grabaciones de video, su sistema puede detectar el pulso y la frecuencia respiratoria con una precisión del 92% y el 91% respectivamente [8]. [17]

Otro de los trabajos identificados, es realizado por universidades de Beijing, quienes diseñan e implementan un sistema sin contacto para monitoreo de sueño, con el que detectan el movimiento respiratorio de una persona en estado de sueño por medio de una cámara infrarroja que procesa la grabación con el método de EVM, e integra, además una cámara de movimiento Kinet para determinar posiciones y movimientos del cuerpo. [18]

Por otra parte, un grupo de universidades europeas proponen un método para detectar la señal de respiración en el área del tórax, por medio de una cámara 3D y la saturación de oxígeno con un pulsioxímetro, para disminuir la cantidad de sensores conectados en el proceso de evaluación de la AOS [19]. Paralelamente, el Departamento de Física Médica y la Universidad de Lincoln, presentan una técnica de monitoreo de video infrarrojo automatizado en tiempo real para la detección de anomalías respiratorias y su aplicación en el diagnóstico de la AOS. Esta técnica evita imponer restricciones posicionales al paciente, lo que permite que los pacientes duerman boca arriba o de costado. Los resultados experimentales muestran que la técnica desarrollada logra una precisión del (94% para los datos clínicos) en el reconocimiento de episodios de apnea. [20]

Finalmente, el Laboratorio de Sistemas Móviles de Salud, con sede en Zúrich, presenta un sistema para monitorear la actividad respiratoria basado en la fusión de videos multiespec-

trales. En este sistema se extraen múltiples señales respiratorias de videos independientes y los combinan estratégicamente para abordar la estimación de frecuencia respiratoria y la detección de apnea. Sus hallazgos demostraron que la fusión de múltiples señales respiratorias de cámaras multispectrales aumenta la precisión de la actividad respiratoria en comparación con las modalidades de una sola cámara. [21]

Llegados a este punto, para este trabajo de grado es claro que la EVM es una herramienta que aporta un adecuado análisis de señales vitales a partir de una grabación. En este sentido, una vez revisados los trabajos previos a este, y que han desarrollado estudios asociados a las aplicaciones que detectan señales vitales por medio de procesamiento de video; se considera que algunos de sus aportes en términos metodológicos y de fundamentación experimental, derivan en la configuración de algoritmos asociados a la video analítica, para dar cuenta de procesos fisiológicos que pueden ser rastreados mediante la EVM. Otros de los aportes, radica en los aspectos de orden estructural en términos de la construcción de sistemas no invasivos para la detección de la AOS.

En consecuencia, con la revisión de antecedentes y dado la necesidad de que existan sistemas no invasivos y que permitan tomar las señales de una persona con problemas de AOS para la detección y diagnóstico de esta afectación; se considera que uno de los aportes de este trabajo de grado, consiste en la obtención de señales vitales mediante el análisis de video procesado en la nube a partir de la EVM, esto con el fin de que sea un sistema eficiente y que aporte a la emisión de un diagnóstico aproximado a la detección de la AOS. Por esta razón, el sistema usa el método de EVM propuesto por el MIT, para obtener la frecuencia respiratoria del comportamiento de sueño de una persona, esta información es procesada en un servidor en la nube con lo que se logra una optimización en los tiempos de valoración y diagnóstico ya que estará disponible para que pueda ser vista por un profesional de salud.

### 3 Sistema

La propuesta para abordar el problema anteriormente descrito se puede observar en el diagrama de bloques en la figura 3-1. Dicho diagrama, se compone por dos partes principales, locación y remoto respectivamente; la locación hace referencia al dormitorio o lugar donde el usuario duerme; en la primera parte, para viabilizar la detección de la frecuencia respiratoria del usuario, es necesario que el sistema cuente con un cobertor de tela no reflectiva al modo infrarrojo de la cámara, por esta razón se opta por una tela oscura en la que, de manera equidistante, se distribuyen una serie de círculos blancos los cuales funcionan como indicadores de movimiento para la cámara; allí, se instala un sistema portable conformado por una cámara de vídeo con visión infrarroja la cual está conectada a un computador portátil que sirve como dispositivo para el almacenamiento y transmisión de las grabaciones realizadas mientras el usuario se encuentra durmiendo; por su parte, el computador portátil sirve como transmisor de la data recolectada por streaming hacia el servidor Cratos de la PUJ. Este proceso se lleva a cabo en la parte remota del sistema, aquí se realiza el proceso de EVM, seguido de la detección y análisis de la frecuencia respiratoria, este proceso finaliza en la generación de un reporte grafico en formato PDF.

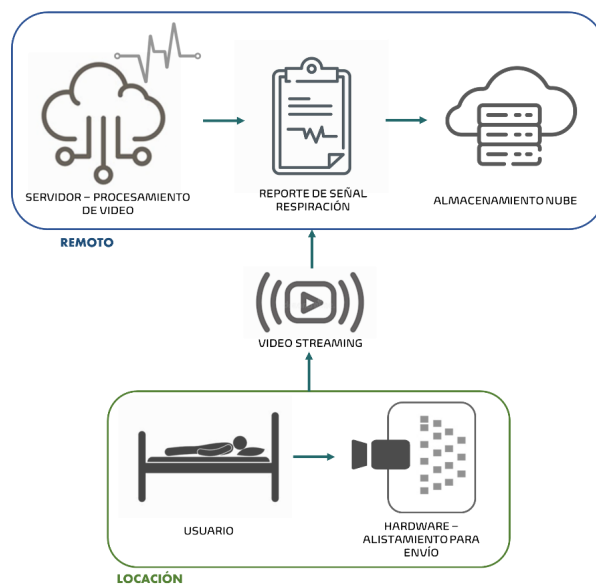


Figura 3-1: Diagrama de bloques del sistema.

### 3.1. Arquitectura

Una arquitectura detallada del sistema es mostrada en la figura 3-2, donde se evidencian las fases principales de un sistema IoT: adquisición, transmisión, análisis y visualización

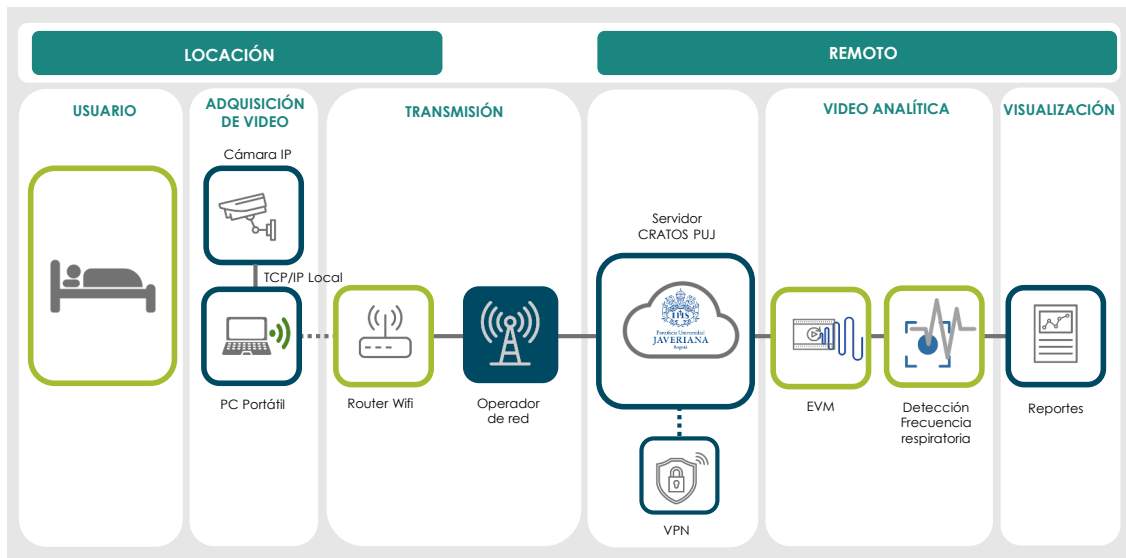


Figura 3-2: Arquitectura detallada del sistema.

#### 3.1.1. Adquisición de video

Esta etapa está conformada por una cámara IP Dinion 5000 HD de la marca Bosch, conectada de manera alámbrica hacia el puerto ethernet de un computador portátil por medio de TCP/IP al que se le ha asignado una configuración de IP fija.

#### 3.1.2. Transmisión

La etapa de transmisión está conformada por el módulo WiFi del computador portátil conectado a un modem del servidor de red, este a su vez, se conecta por medio de una VPN hacia el servidor Cratos de la PUJ.

#### 3.1.3. Video analítica

La etapa de video analítica se realiza en el servidor Cratos y está conformada los módulos de recepción de video, el procesamiento por EVM y por el módulo de detección de la frecuencia respiratoria.

### **3.1.4. Visualización**

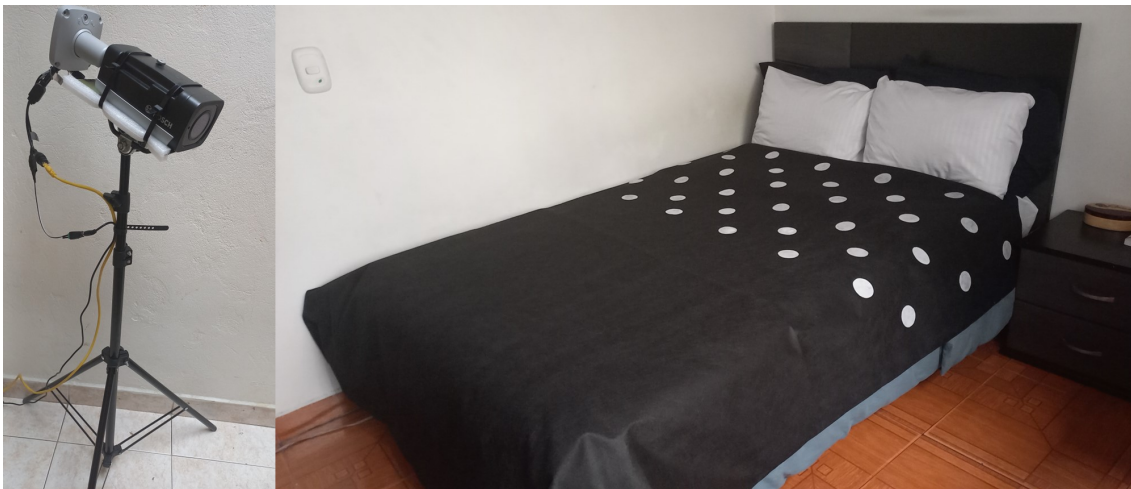
Esta etapa al igual que la anterior, se lleva a cabo en la parte remota del sistema, la cual está conformada por el módulo de visualización que genera los reportes de la frecuencia respiratoria en formato PDF.

## 4 Desarrollos

### 4.1. Infraestructura

Como se mencionó anteriormente, para facilitar la detección de movimiento en el video, se diseñó un cobertor con tela negra no refractante para la visión IR de la cámara, con una red de círculos de color blanco y equidistantes con una separación de 25 cm entre círculos, ubicados a nivel del torso de una persona acostada en posición horizontal, estos círculos actúan como sensores al ser reconocidos por el sistema de captación de video. Así mismo, dicha red favorece el reconocimiento del movimiento respiratorio.

Con respecto a la instalación de la cámara y teniendo en cuenta requerimientos de portabilidad en espacios domiciliarios, el sistema cuenta con un trípode de aluminio que permite ajustar tanto su altura como su grado de inclinación en relación a la cobertura de la cámara mostrados en la figura4-1.



**Figura 4-1:** Cobertor no reflectivo y cámara con tripode portable

## 4.2. Etapa captura de video

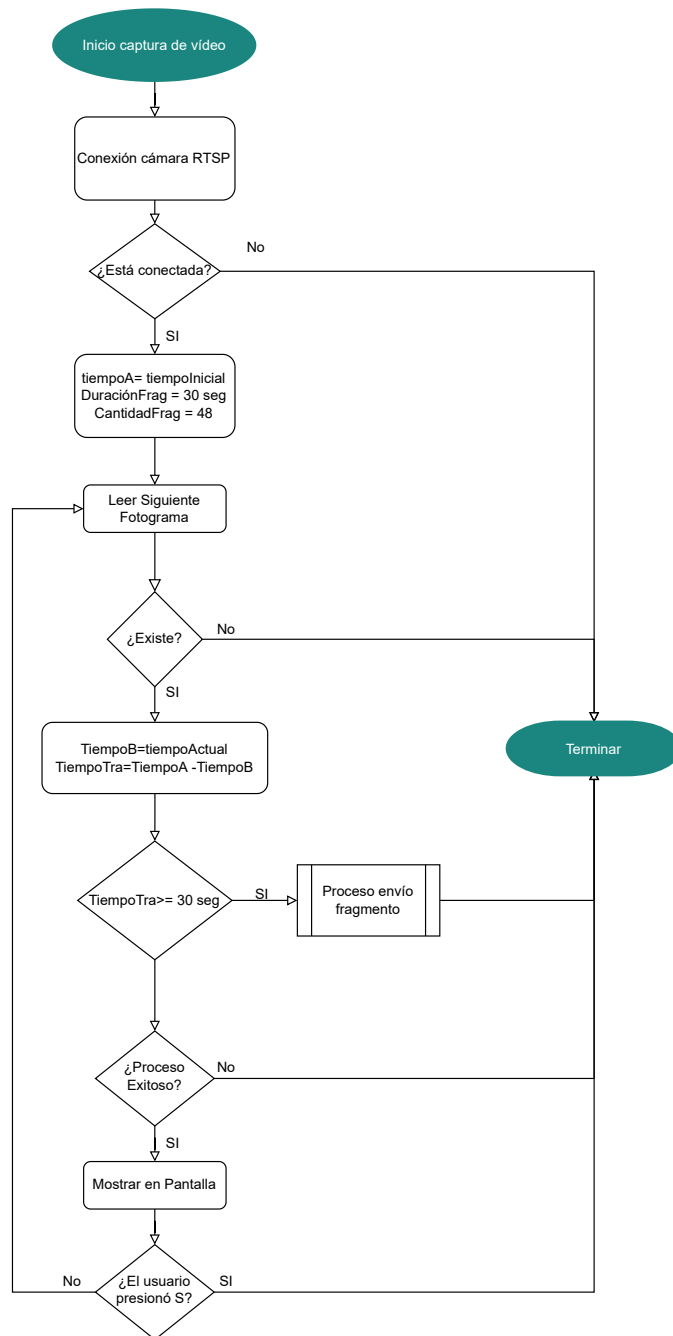
Para llevar a cabo esta etapa, se emplea una cámara IP marca Bosh Dinion 5000HD [22] conectada por UTP hacia un computador portátil. Así, pensando en la comodidad del usuario, se realizó la búsqueda de cámaras especializadas en captura de video o visión nocturna cuyos sistemas de software puedan ser configurables. En este sentido, se eligió una cámara tipo bullet, que permite cubrir una zona fija sin que la captura de la imagen se disperse. Esta cámara cuenta con las características mostradas en la figura 4-2, que fueron ajustadas en los aspectos de direccionamiento IP fijo, intensidad de iluminación infrarroja a 10 % y un modo de captura ajustado a 30 cuadros por segundo (FPS).

Bosch Technical Specification	
<b>Make</b>	Bosch
<b>Manufacturer</b>	Bosch Security Systems
<b>Category</b>	Video Surveillance>IP cameras
<b>Model code</b>	Dinion IP 5000 HD
<b>Chip Inch Size</b>	1/3
<b>Color Type</b>	True Day / Night
<b>Resolution</b>	1920 x 1080
<b>Digital (DSP)</b>	Yes
<b>Specialist Type</b>	Infrared
<b>Sensitivity Lux</b>	0.0
<b>Auto Iris</b>	Yes
<b>Electrical Specifications</b>	Voltage: 12 V DC
<b>Power Consumption:</b>	9.2 W
<b>Motion Activated</b>	Yes
<b>Focal Length mm</b>	3 - 10
<b>Picture Elements HxV</b>	1920 x 1080
<b>Network Properties</b>	Image Frame Rate: 30 fps Control: ePTZ Interface: 10/100 Base-T, auto-sensing, half/full duplex  Network Protocols: IPv4, IPv6, UDP, TCP, HTTP, HTTPS, RTP/RTCP, IGMP V2/V3, ICMP, ICMPv6, RTSP, FTP, Telnet, ARP, DHCP, SNMP, SNMP (V1, MIB?II), 802.1x, DNS, DNSv6, DDNS, SMTP, iSCSI, UPnP (SSDP), DiffServ (QoS), LLDP, SOAP, Dropbox, CHAP, Digest Authentication
<b>Software</b>	Surveillance software
<b>Back Light Compensation</b>	Yes
<b>White Balance</b>	Yes
<b>Electronic Shutter Range</b>	1/30 [1/25] - 1/15000
<b>Signal Mode</b>	NTSC
<b>Zoom</b>	Yes
<b>V/C (Video Output)</b>	BNC connector (1 Vpp CVBS)
<b>Compression Type</b>	H.264 MP (Main Profile); M-JPEG
<b>Physical Specifications</b>	Weight g: 1,600
<b>Dimensions mm</b>	103 x 100 x 252
<b>Environmental Specifications</b>	Protection: IP66, IK08
<b>Operating Temperature oC</b>	-30 ~ +50 C (-22 ~ +122 F)
<b>Operating Humidity %</b>	20 ~ 90
<b>HD</b>	Yes
<b>Additional info</b>	Bosch Dinion IP 5000 HD true day/night outdoor IR IP camera provides high quality HD images for demanding security and surveillance network requirements. The camera uses intelligent Dynamic Noise Reduction (iDNR) which actively analyzes the contents of a scene and reduces noise artifacts accordingly. The low-noise image and the efficient H.264 compression technology provide clear images while reducing bandwidth and storage by up to 30%. The built-in infrared LEDs provides quality night time monitoring. The remote E-PTZ control allows to select specific areas of the parent image.

Figura 4-2: Especificaciones técnicas cámara Bosh Dinion 5000 HD.

La cámara es conectada por conexión alámbrica UTP según la normativa EIA/TIA 568A [23] al computador portátil vía Ethernet, en una configuración de red IP local por medio del protocolo IEEE 802.1w Rapid Spanning Tree Protocol ( RSTP ). [24].

Por su parte, el almacenamiento de video se realizó por medio de un Script de Python basado principalmente en la librería openCV [25]. En una primera instancia, el programa verifica si la cámara se encuentra disponible en la dirección de IP fija asignada, al validar la conexión, inicializan las variables que corresponden a tiempo y cantidad de fragmentos; con respecto a la variable del tiempo se inicializa en 30 segundos, este tiempo corresponde a la división de cada fragmento de la grabación. Así mismo, a la variable de cantidad, se asigna a 48 fragmentos para un tiempo total de 24 minutos. De manera continua, se toma el tiempo de referencia inicial que corresponde al instante en que se inicia el script. En segunda instancia, el programa entra a un bucle que permite leer cada fotograma del video para almacenarlo en un archivo. Dicho bucle se ejecuta de la siguiente manera: el programa almacena cada uno de los fotogramas durante 30 segundos, después este video se almacena en formato Audio Video Interleave (.AVI) y es codificado con el formato multimedia MJPG; finalmente el archivo es enviado por medio del script de transmisión; este bucle se repite hasta que se hayan generado 48 fragmentos de video o el usuario realice una interrupción del mismo. El diagrama de flujo de este proceso es mostrado en la figura **4-3**.



**Figura 4-3:** Diagrama de flujo captura de video

Con respecto a la transmisión, para facilitar el envío de los archivos de video hacia el servidor, como se especificó anteriormente, se realizó una fragmentación automática de la grabación cada 30 segundos con el fin de crear un archivo de video por fragmento; es decir, la grabación está compuesta por diversos fragmentos de video, los cuales tienen un tamaño en promedio de

90 Mb. Los videos son almacenados con un nombre de archivo para facilitar su identificación en cada una de las etapas del proceso, mostradas en la figura 4-4, así el nombre contiene (Fecha y hora de creación según ISO 8601 [26]-Etiqueta: videoApnea-número de fragmento de video-Carácter de parada-formato de video).



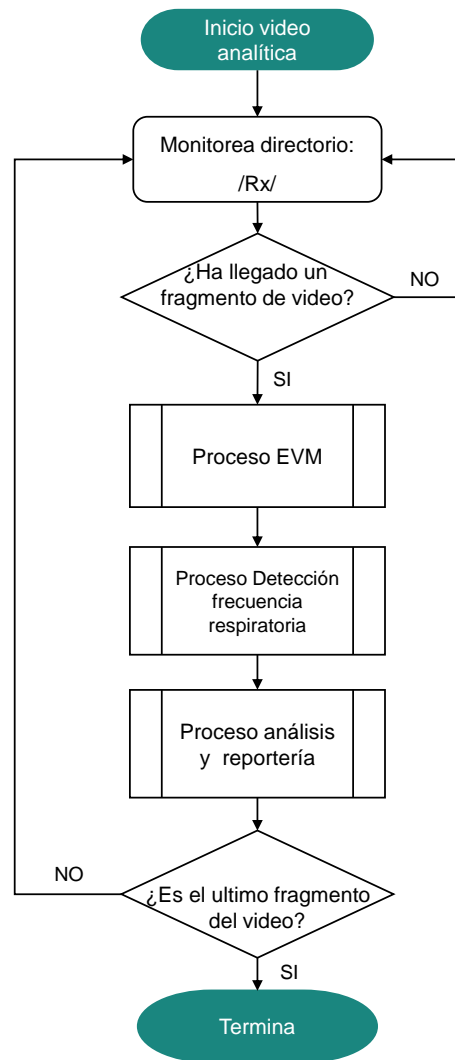
**Figura 4-4:** Trama del nombre de los fragmentos de video generados

### 4.3. Envío por Streaming

Para realizar el envío de video por streaming hacia el servidor Cratos de la Universidad Javeriana se establece una conexión de red privada VPN, al computador local en donde se realiza la transmisión de archivos por medio de wifi, usando el protocolo SSH, de esta manera, el código de envío de archivos es realizado en el lenguaje de programación Python con la librería Paramiko [27]. Este envío es realizado cada vez que se genera un fragmento de video que posteriormente será procesado en dicho servidor.

### 4.4. Procesamiento remoto de video

El diagrama de flujo general del procesamiento de video es mostrado en la figura 4-5 y es explicado en los párrafos siguientes:

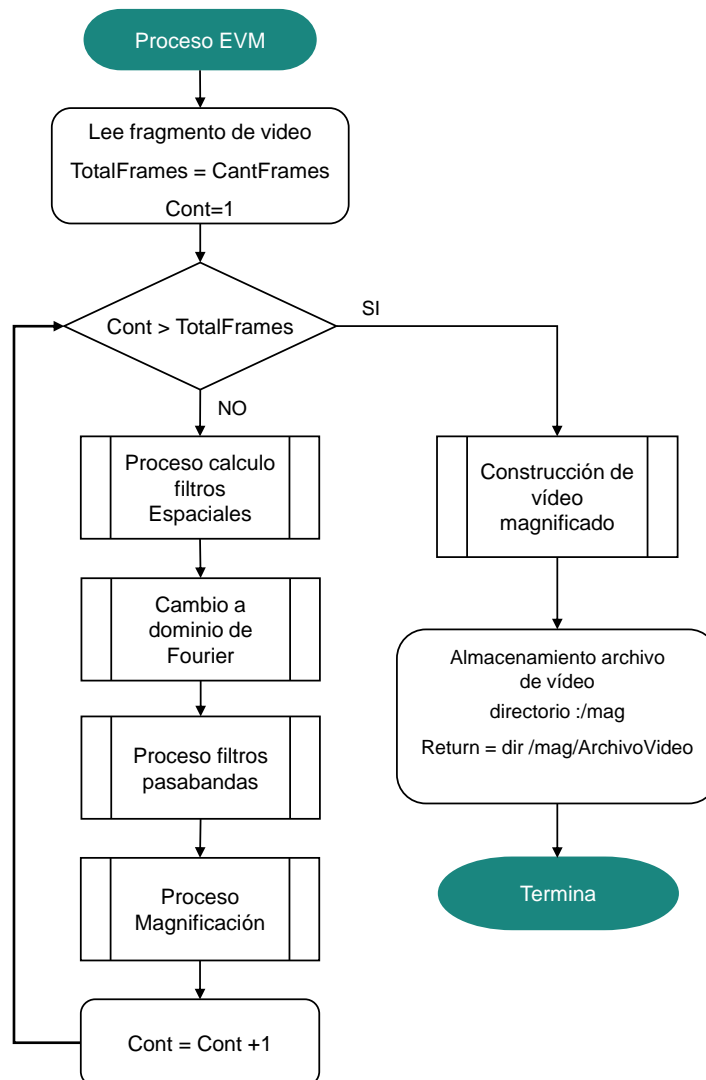


**Figura 4-5:** Diagrama de flujo general procesamiento de video

Inicialmente, el procesamiento remoto de los archivos de video es realizado por un script de Python empujando la librería Watchdog [28], dicho script monitorea constantemente el directorio ./Rx, cuando un archivo es recibido, posteriormente, se realiza un proceso de validación del nombre y número de fragmento, así como el carácter F que indica que es el fragmento final de video de una grabación. En este momento se inicia la EVM mediante el software Matlab, es importante tener en cuenta que el proceso de magnificación es retomado de la propuesta realizada por el por el MIT.

Esta EVM manipula el movimiento en los videos mediante el análisis de las señales de la fase local a lo largo del tiempo en diferentes orientaciones y escalas espaciales. Usa pirámides orientables complejas para descomponer el video y separar la amplitud de las ondas locales

de su fase. Luego filtra temporalmente las fases de forma independiente en cada ubicación, orientación y escala. Opcionalmente, aplica un suavizado espacial ponderado en amplitud para aumentar la relación señal a ruido de fase. Luego amplifica o atenúa las fases con paso de banda temporal y reconstruye el video en formato .AVI codificado en MJPG [29]. En este sentido, la EVM está conformada por varias etapas, la primera de ellas es un proceso de cálculo matemático de niveles que son requeridos para magnificar; seguido a esto, se realiza un proceso de filtrado por medio de filtros pasa bandas. A continuación, el algoritmo usa la transformada de Fourier y filtros gaussianos para aplicar los procesos de amplificación de movimiento, finalizando en la creación de un video. Este proceso es mostrado en el diagrama de flujo de la figura 4-6.



**Figura 4-6:** Diagrama de flujo proceso EVM

Al finalizar el proceso de EVM, el fragmento del video generado es sometido a un proceso de detección de movimiento para identificar la frecuencia respiratoria, este proceso fue realizado con un Script en Python que usa la librería OpenCV [30]. De modo que, a cada uno de los cuadros del video se le realiza un reconocimiento de áreas geométricas (círculos blancos) para detectar los círculos del cobertor. Una vez reconocidas las áreas se calculan los respectivos centros y se almacenan las posiciones X y Y en el archivo Data en formato csv. Este procesamiento es cíclico hasta que haya procesado la cantidad de cuadros que tiene el video tal como se muestra en el diagrama de flujo de la figura 4-7.

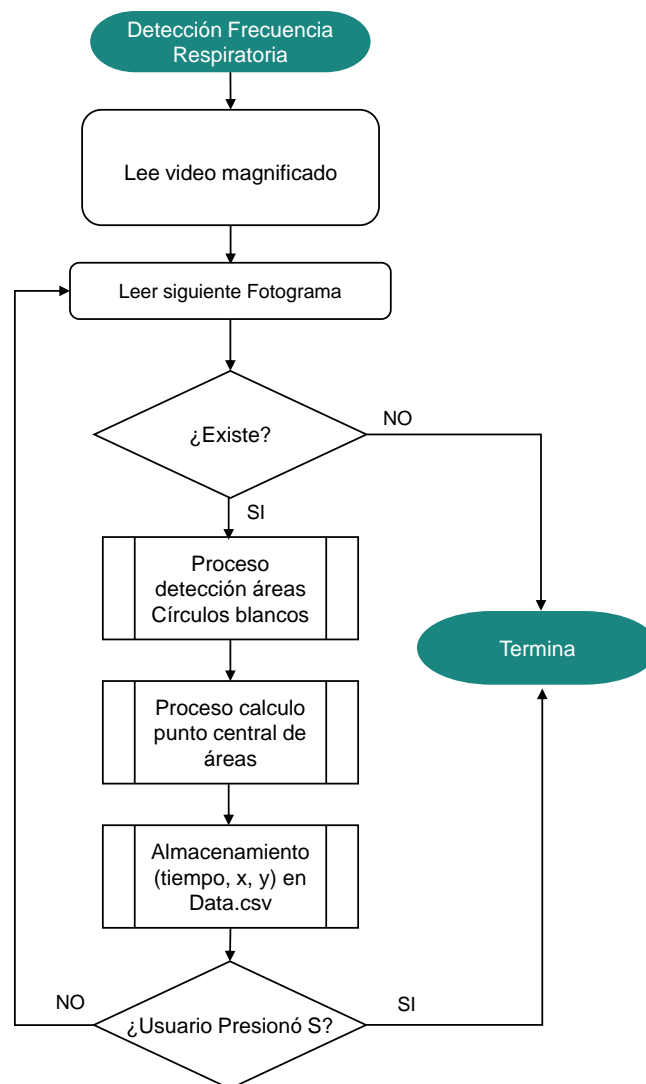


Figura 4-7: Diagrama de flujo detección de frecuencia respiratoria

## 4.5. Generación de reporte

Para la generación de reporte, se hace un proceso de análisis del archivo data, en el cual se identifican las distintas señales obtenidas de cada círculo detectado en la etapa anterior, de estas señales se identifican las de mayor amplitud y posteriormente se promedian para hallar una señal resultante como se muestra en la figura x.

El script de análisis de señales mostrado en la figura 4-8, se realizó en Python usando la librería Numpy [31], en este análisis, se identifica la cantidad de registros con fecha y hora repetidos y se eligen aquellos con el menor número de registros, esto indica la cantidad de áreas detectadas por cuadro de vídeo, cuando fue procesado en la etapa de detección.

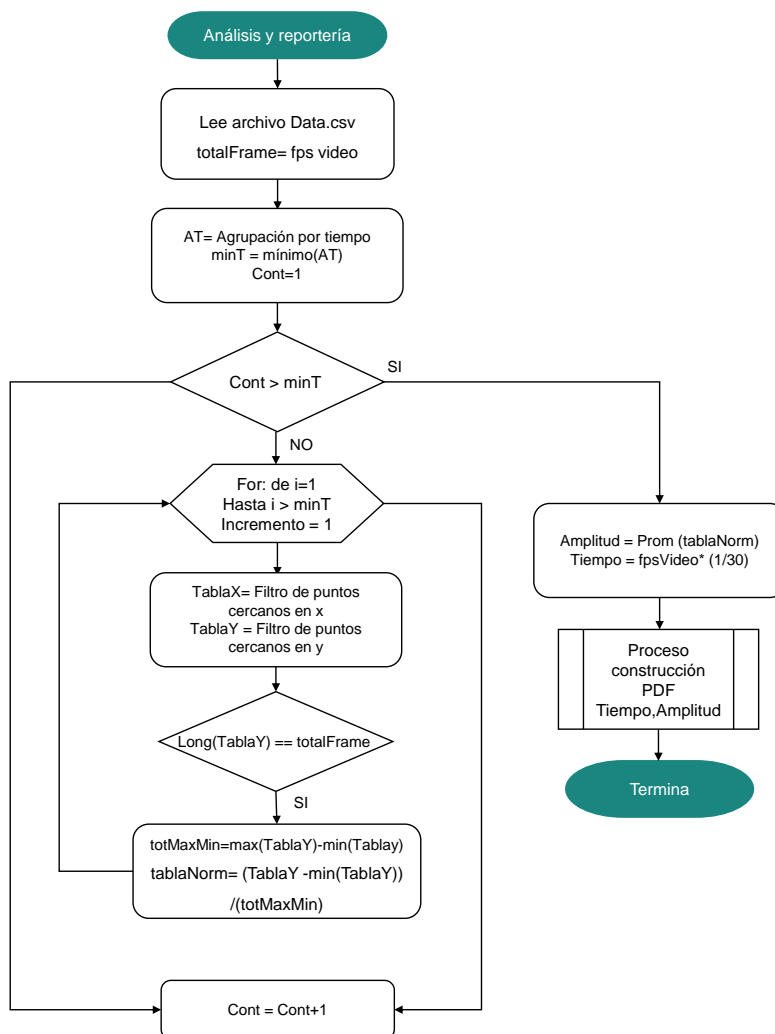
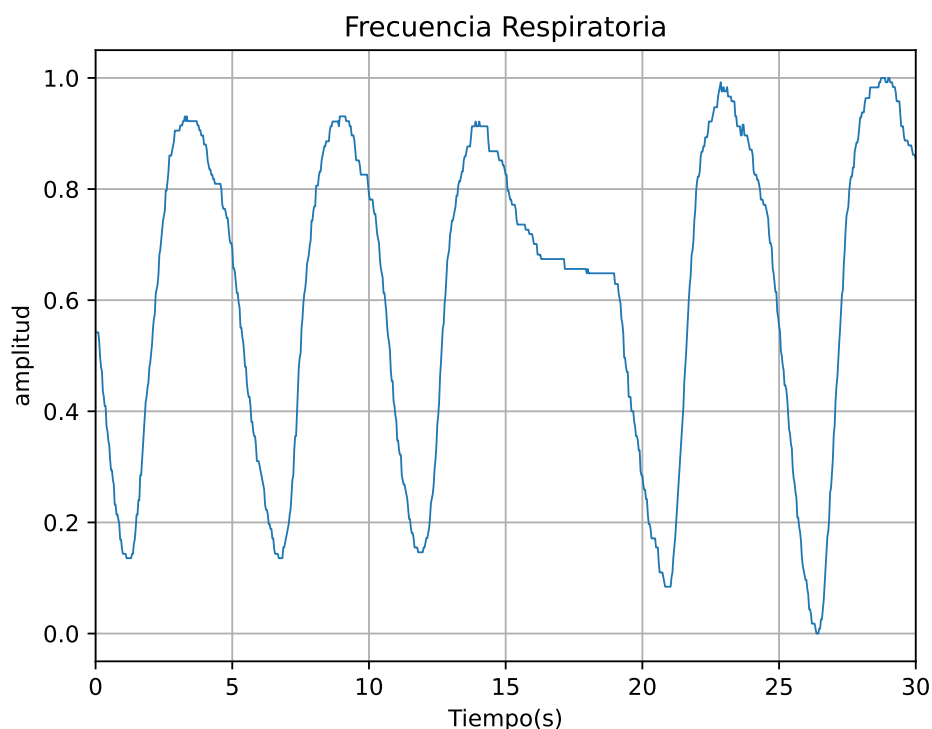


Figura 4-8: Diagrama de flujo generación de reporte

Después de seleccionar cada una de las áreas, posteriormente, se identifican dentro del grupo los coordenadas (X,Y) es decir la posición de las áreas con respecto al cuadro del video analizado y posterior a esto, se seleccionan aquellos registros que son iguales a la totalidad de cuadros que conforman la grabación, al hacer este proceso se logran identificar y reagrupar todas las distintas señales generadas en cada área detectada, seguido, se realiza un proceso de filtrado de aquellas señales que tienen una mayor amplitud , también se descartan aquellas que presentan un bajo movimiento ya que son señales que no aportan a la señal resultante, a continuación, las señales son normalizadas con respecto a la ecuación 4-1, en donde el valor a normalizar es restado por el valor mínimo de toda la señal y después es dividido por la diferencia entre el valor máximo y el valor mínimo de la señal a normalizar, de esta manera se obtiene una señal entre 0 y 1. Posteriormente, todas las señales normalizadas son promediadas para obtener la señal resultante con el comportamiento de la respiración de una persona como se muestra en la figura 4-9.

$$ValorNorm = \frac{ValorActual - ValorMin}{ValorMax - ValorMin} \quad (4-1)$$



**Figura 4-9:** Reporte ejemplo con gráfica de comportamiento respiratorio

Seguido a esto, se realiza un proceso de detección de picos de la señal resultante apoyados

de la librería de Python `scipy.signal` con la función `find peaks` [32], ajustando los parámetros como la altura de referencia a 0.7 y la distancia de la muestra a 30 debido a que las grabaciones de los video se realizan a 30 cuadros por segundo (FPS). A su vez se calculan la cantidad de picos detectados que permiten identificar la frecuencia de las respiraciones en el tiempo del fragmento del video analizado, es decir cada 30 segundos.

## 4.6. Evaluación

Para la etapa de evaluación, se implementó el sistema de detección de frecuencia respiratoria mostrado en la figura 4-10, realizado con una raspberry pi pico [33], un acelerómetro ADXL345 [34] y una tarjeta de comunicación serial con transmisión por Bluetooth JY-MCU [35] conectados como se muestra en el esquema de la figura 4-11.



**Figura 4-10:** Sensor para evaluación de frecuencia respiratoria

El acelerómetro actúa como un sensor que identifica el movimiento de la respiración de una persona ubicada en posición horizontal, este sensor transmite tres ejes (X,Y,Z) donde los datos son capturados por medio del software `serial plot` [36] en un archivo CSV. Posteriormente, se analiza la data recolectada y se selecciona el eje que presenta una mayor amplitud y a continuación la señal es procesada con un filtro pasabajos digital usando la librería `Scipy` con la función de filtrado `Butter` [37], se asignaron parámetros de entrada como el orden del filtro en 10, la frecuencia de Nyquist en 20 Rad/s y la frecuencia de corte 2.614 Rad/s, esta última, es basada en el promedio de las respiraciones máximas que tiene una persona adulta y mayor según lo mencionado por la fundación del sueño, [38], siendo estas 25 respiraciones por minuto.

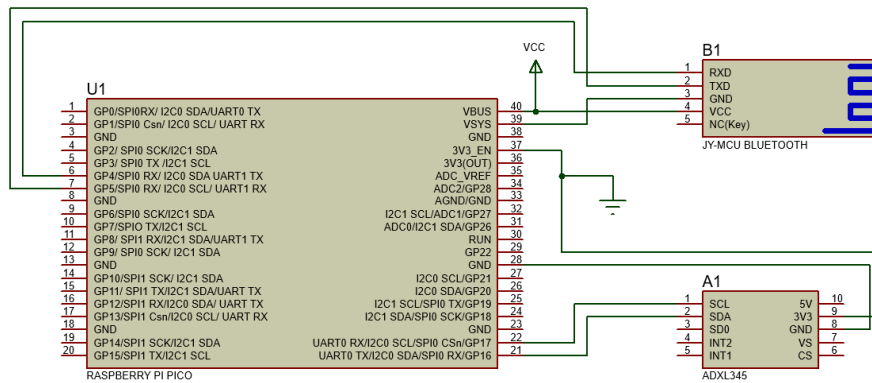


Figura 4-11: Diagrama esquemático sensor para evaluación de frecuencia respiratoria

# 5 Experimentos y Análisis de Resultados

De acuerdo con las fases descritas anteriormente en la sección de desarrollo, se describen los experimentos y exponen los análisis de resultados para cada una de ellas:

## 5.1. Infraestructura

Uno de los primeros experimentos realizados, surge a partir de la necesidad de brindar la mayor comodidad al usuario sin alterar su ambiente habitual ni su comportamiento a la hora de dormir, para ello se requería de un sistema de video que funcionara en ambientes de poca o ninguna iluminación, por eso se determinó el uso de cámaras de video con visión IR; en harás de estandarizar los exámenes se requiere que el ambiente fuera similar sin importar la habitación donde se realizan las pruebas; por ello se pensó en cubrir al usuario con algún tipo de material que permitiera reconocer el movimiento.

Los primeros experimentos se realizaron con telas con patrones cuadriculados, estas realizaban el movimiento en la grabación de video y en la etapa de magnificación, sin embargo, en la etapa de detección, aumentaban las áreas a detectar, incrementando el ruido y haciendo difícil de reconocer el patrón de la respiración en el sistema.

Un segundo experimento fue realizado con un material de color blanco con una franja vertical color negro, este debía ser de un material que no reflejara la luz infrarroja para generar un contraste. Para ello, se usó un material con base de nylon negro, la magnificación se observaba claramente, sin embargo, en la detección se hacía difícil la detección de áreas geométricas y los resultados de la detección de la frecuencia respiratoria no se podían calcular.

Para corregir la detección de las áreas, se optó por cambiar la franja vertical por una figura geométrica, se eligió el círculo ya que su geometría permite generar una forma uniforme independiente de su inclinación. Para este caso, se usaron círculos de color negro de 5 centímetros, ya que es preciso generar un patrón reconocible para el algoritmo; así, en la etapa de detección se empezaron a reconocer las geometrías, sin embargo, el color blanco del cobertor en ocasiones interfería en el reconocimiento y afectaba en la precisión de los resultados.

Por su parte, para corregir estos problemas, se optó por usar para el caso del cobertor un color negro y para los círculos geométricos el color blanco, para ello se usó tela de polipropileno, aprovechando sus propiedades de baja reflexión, según pruebas de detección de materiales que

se realizó con la visión de la cámara en modo nocturno. En este caso, la etapa de adquisición identificaba claramente la geometría de los círculos blancos, mejorando notablemente la precisión de los resultados.

Por último, se enfocó el área de detección al área superior del cuerpo de una persona, razón por la cual se generó una franja con una trama de círculos blancos equidistantes en la zona superior del cobertor. En la figura 5-1 se muestra el desarrollo experimental de los pasos descritos en esta sección.



**Figura 5-1:** Pruebas de reconocimiento con diferentes materiales y formas

## 5.2. Adquisición de video

Para la adquisición de video, los experimentos se enfocaron en dos partes, una en la calidad de la grabación y la otra en la posición de la cámara. En cuanto a la calidad, uno de los primeros experimentos se realizó aprovechando que la cámara Dinion 5000 HD cuenta con un slot para memoria microSD, en esta se almacenaban los videos con resolución de 2 Mpx, su calidad era buena, sin embargo, dificultaba el proceso del envío de video ya que se debía descargar manualmente al computador y después realizar el envío para su posterior procesamiento.

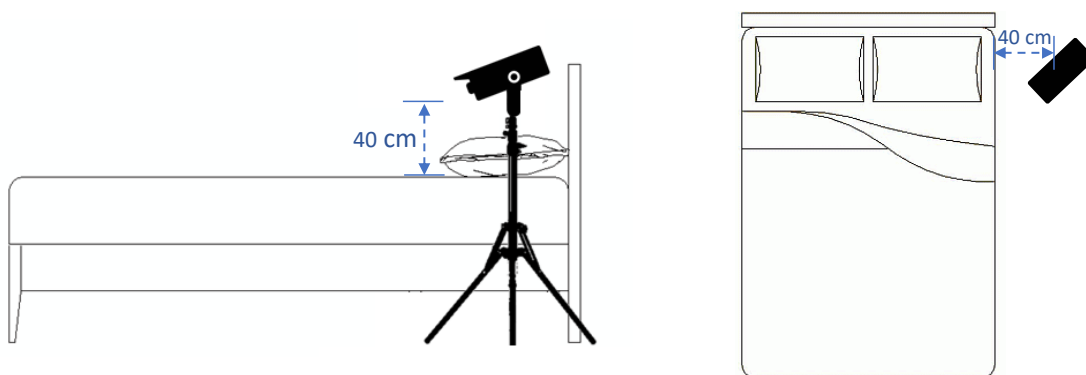
Otra de las pruebas realizadas, se enfocó en almacenar el video como si fuera un sistema de circuito cerrado de televisión (CCTV) por medio del software PSS-Smart de la marca Dahua, este software permite que un computador pueda almacenar videos de una cámara como si fuera un grabador de video en red (NVR), sin embargo, debido a la incompatibilidad con la marca de la cámara no fue viable integrar los sistemas.

Posterior a estas pruebas se optó por la adquisición en red conectando la cámara a un switch, en este caso se aprovechó la conexión que tiene el software VLC por RTSP, para este caso la calidad de video se veía afectada por el ancho de banda de la red haciendo que el video perdiera definición.

Por último, se realizó una conexión directa entre el PC y la cámara por medio de ethernet con una configuración local de IP fija, la grabación se realizó en Python por medio de la librería OpenCV por el protocolo RTSP, como se describió anteriormente en la etapa de desarrollo. Esto permitió que el video se almacenara en el pc, manteniendo su calidad y

haciendo manejable su manipulación.

En cuanto a la posición de la cámara, se realizaron pruebas con el fin de establecer las condiciones técnicas más adecuadas, esto es: cobertura, distancia de enfoque, altura e inclinación. Luego de realizar estas pruebas, se considera que la mejor posición para ubicar la cámara corresponde al lado de la cama a 40 centímetros, en el borde más cercano donde el usuario duerme, ésta debe estar en la cabecera de la cama, dirigida hacia el torso del usuario y su altura debe posicionarse a una longitud de 40 centímetros, tomando como referencia el borde superior del colchón de la cama como se muestra en la figura 5-2. La definición de estas distancias se estableció según el estándar europeo para sistemas de video vigilancia EN 50132-1 de acuerdo con el criterio DORI (Detección, Observación, Reconocimiento, identificación) [39]. DORI establece que para que un objeto sea detectado se requiere de un área mínima de 12 pixeles por metro (ppm); así mismo, para que un objeto sea identificado se requiere de un área mínima de 250 ppm. En este sentido la cámara se ubicó en las distancias dichas anteriormente para que los círculos del cobertor sean reconocidos o identificados y permitan la definición de los bordes de manera eficiente.



**Figura 5-2:** Plano de posición de la cámara

### 5.3. Envío por streaming

La seguridad y la privacidad son una parte fundamental del IoT. Estos problemas son críticos ya que los datos personales estarán disponibles en línea. Esto exige soberanía de datos, redes seguras, terminales seguros y un plan de seguridad de datos escalable para mantener segura toda esta información [40]. Es por esto, que se hace necesario que el proceso de transmisión se realice con protocolos de seguridad que garanticen la integridad y protección de las grabaciones de los videos, ya que estas pueden contener datos sensibles como los rostros de los usuarios.

En primer lugar, para el streaming se realizaron pruebas de envío por el protocolo secure shell (SSH) al servidor Cratos de la PUJ, por medio de la consola PowerShell de Windows, con el comando secure copy (SCP), las pruebas consistían en enviar un archivo de video con un peso de 4 Mb a un directorio específico en el servidor. En segundo lugar, con la validación del envío exitoso, se realizó una función en Python mostrada anteriormente, que permite enviar los fragmentos de video generados en la captura.

## 5.4. Procesamiento remoto de video

### 5.4.1. Magnificación de video

Como se mencionó anteriormente, este proyecto usa el algoritmo propuesto por el MIT para la magnificación de video, en donde las primeras pruebas se centraron en la elección del método adecuado para el tipo de movimiento, ya que en el método original se pueden encontrar 3 modos: magnificación espacial con filtro gaussiano, magnificación espacial con filtro laplaciano y una magnificación por amplificación de fase. En una prueba comparativa mostrada en la figura 5-3, se puede observar la diferencia de los métodos. Con el filtro gaussiano, el comportamiento variaba el color y no se veía ninguna amplificación del movimiento, por otra parte, con el método del filtro laplaciano se observaba un comportamiento mejor al anterior en cuanto a la definición del movimiento; sin embargo, también modificaba los colores del video. Por último, se elige el método de amplificación por fase ya que presenta una amplificación considerablemente notoria del movimiento según las pruebas iniciales de respiración.



**Figura 5-3:** Pruebas para elegir el método de EVM

Con la elección de la EVM por amplificación por fase, como el método apropiado para el proceso de detección de la frecuencia respiratoria; se proceden a realizar ajustes en los parámetros de saturación y filtrado para obtener una salida que presente un video amplificado, cuya distorsión sea mínima.

### 5.4.2. Detección de Frecuencia respiratoria

Para la detección de la frecuencia respiratoria, se realizaron pruebas con el fin de establecer aquellas grabaciones que aportaran una calidad de video en el cual fuera posible identificar el movimiento respiratorio que se genera a nivel del tórax, dados los procesos de inhalación y exhalación por la entrada y salida del aire de los pulmones.

Las pruebas consistieron en someter los videos magnificados al algoritmo de detección explicado en la etapa de desarrollo para identificar las geometrías específicamente las circulares. La primera prueba fue realizada con el cobertor blanco y círculos negros, pero como se mencionó anteriormente el algoritmo identificó todas las áreas que no incluían el color negro, figura 5-4, dificultando el análisis del movimiento.



Figura 5-4: Pruebas de detección con cobertor blanco

La segunda prueba se realizó con el cobertor con los colores invertidos, es decir, los círculos blancos y resto de color negro, los resultados fueron óptimos identificando la mayoría de los círculos, figura 5-5 y arrojando una data de cada una de las geometrías detectadas. Para ajustar la precisión del movimiento, se le adiciono al código de Python el cálculo de los puntos centrales de cada área detectada, esto garantiza una única posición (x,y) por geometría en cada fotograma del video.

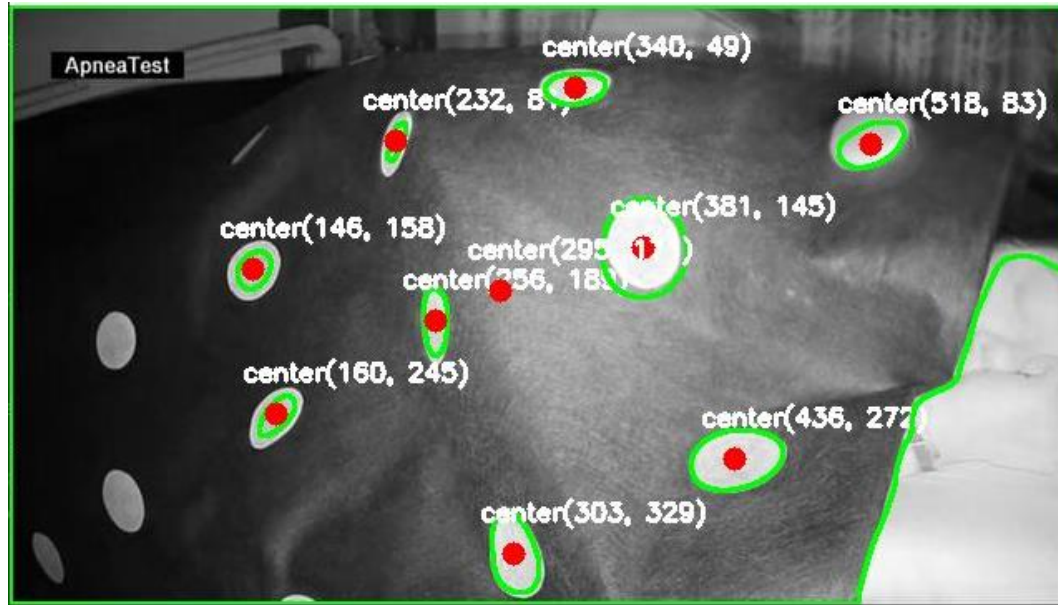
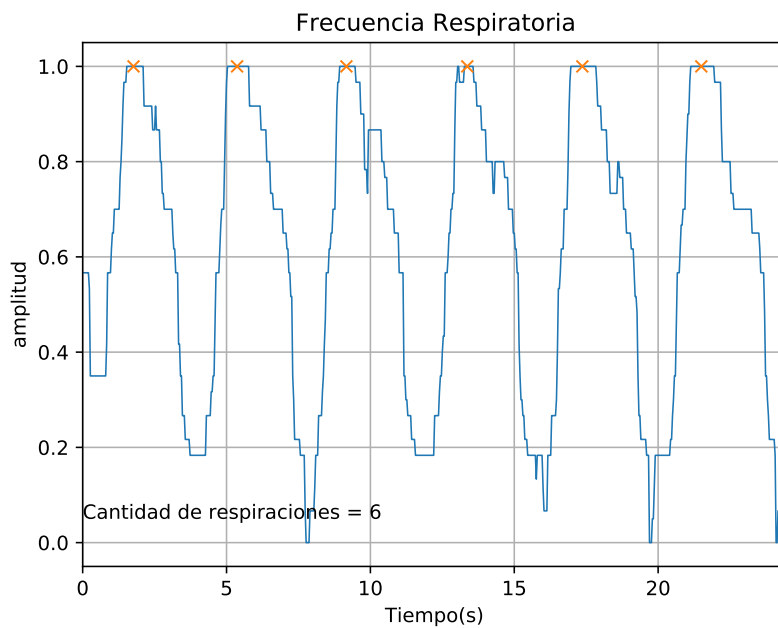


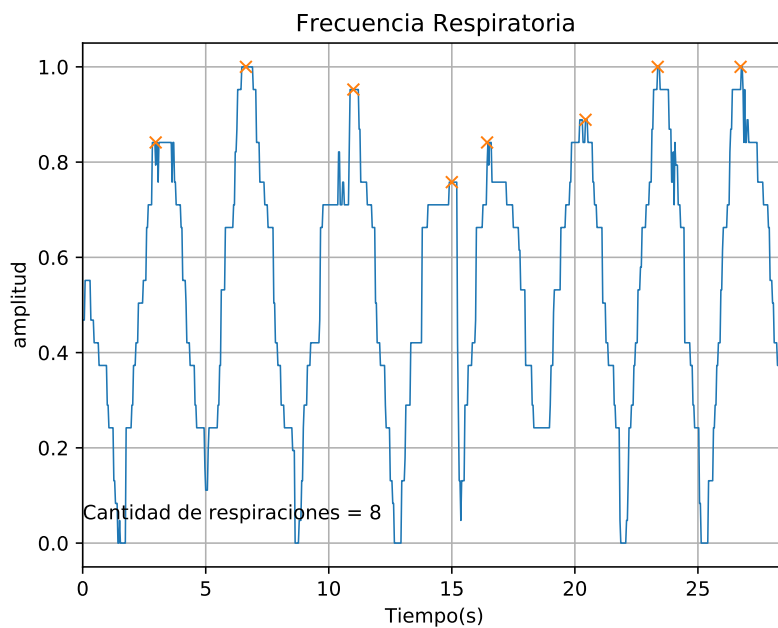
Figura 5-5: Pruebas de detección con cobertor negro

Las siguientes pruebas, están relacionadas con la generación del comportamiento de la frecuencia respiratoria, para esto la data obtenida después del proceso de detección es sometida al algoritmo de análisis explicado anteriormente en el apartado de desarrollo. Con base en este análisis, se ajustan las gráficas obtenidas a partir del parámetro threshold [41] en el algoritmo de detección, esto con el fin de mejorar la identificación de los círculos blancos del cobertor.

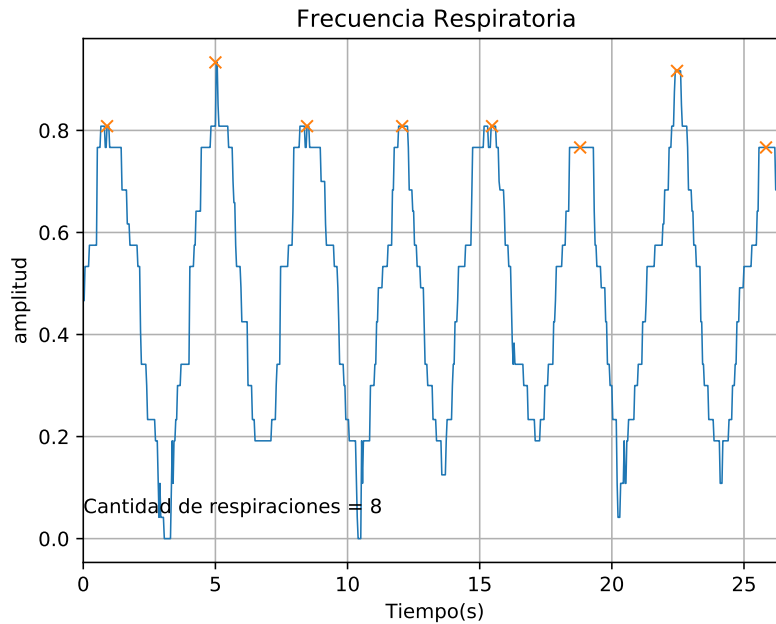
Teniendo en cuenta lo anterior, con base en el ajuste de los algoritmos, se realizan tres grabaciones a diferentes personas durante una siesta de 20 minutos; de dichas grabaciones se muestran fragmentos de 30 segundos del movimiento respiratorio, los cuales después de todo el proceso analítico arroja las gráficas de las figuras 5-6,5-7,5-8; así mismo, se muestra el cálculo de la cantidad de respiraciones en el lapso visualizado y las identificaciones de los picos de cada respiración.



**Figura 5-6:** Gráfica de frecuencia respiratoria obtenida del fragmento de 30 seg de la persona 1



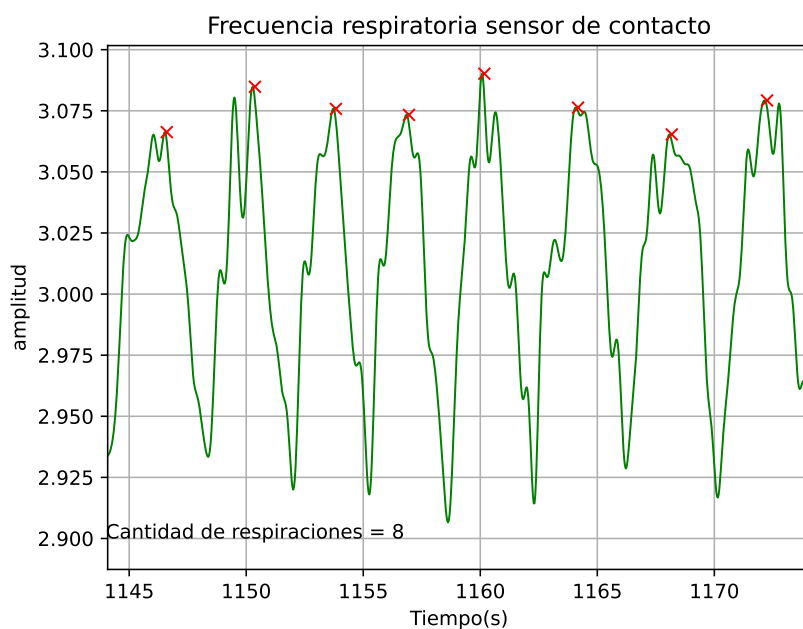
**Figura 5-7:** Gráfica de frecuencia respiratoria obtenida del fragmento de 30 seg de la persona 2



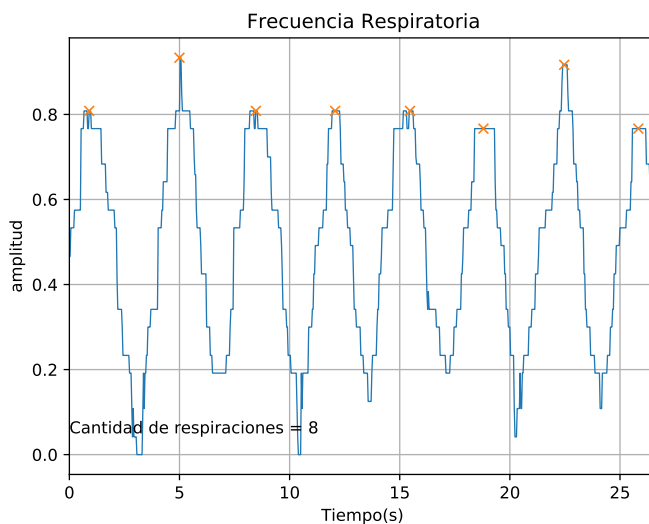
**Figura 5-8:** Gráfica de frecuencia respiratoria obtenida del fragmento de 30 seg de la persona 3

## 5.5. Evaluación

Como parte de la evaluación del sistema se usa un medidor de la frecuencia respiratoria elaborado con dispositivos electrónicos comerciales como lo son la tarjeta Raspberry Pi y el acelerómetro ADXL345, como se especifica anteriormente. Este sensor se colocó en el tórax de una persona al mismo tiempo que se realizaba la prueba con el sistema con video analítica. Después del procesamiento de la data generada, se obtuvo el comportamiento respiratorio en ambos dispositivos. En las figuras 5-9,5-10, se detalla un fragmento de 30 segundos en el que se observa el comportamiento similar de ambos sistemas.



**Figura 5-9:** Gráfica de frecuencia respiratoria obtenida del sensor de contacto



**Figura 5-10:** Gráfica de frecuencia respiratoria obtenida del sistema de video analítica

La participación de estos dispositivos permite comparar la gráfica resultante del análisis de video con las mediciones procedentes del sensor de contacto. En este sentido, se extraen 20 muestras de un minuto de duración, en el que se han comparado los ciclos que corresponden al movimiento derivado de los procesos de inhalación y exhalación de la respiración. De esta

manera, se determina la frecuencia respiratoria en cantidad de respiraciones por minuto. Finalmente, se calcula la precisión de los resultados entre los dos dispositivos; es decir, el sistema de video analítica y el sensor de contacto. Así, se encuentra que, el sistema de detección de la frecuencia respiratoria por video analítica tiene un grado de precisión del 97,87 % con respecto al sensor. Los resultados de las pruebas son mostrados en la tabla 5-1.

**Tabla 5-1:** Tabla comparativa de frecuencia respiratoria entre el sistema de video analítica y el sensor de contacto

Prueba	video analítica (Resp/min)	Contacto (Resp/min)	% precisión
Prueba 1	16	16	100.00 %
Prueba 2	15	14	94.82 %
Prueba 3	15	15	100.00 %
Prueba 4	16	16	100.00 %
Prueba 5	16	16	100.00 %
Prueba 6	15	15	100.00 %
Prueba 7	15	14	94.82 %
Prueba 8	15	15	100.00 %
Prueba 9	13	14	94.44 %
Prueba 10	12	13	94.00 %
Prueba 11	13	13	100.00 %
Prueba 12	14	15	94.82 %
Prueba 13	13	14	94.44 %
Prueba 14	15	15	100.00 %
Prueba 15	14	14	100.00 %
Prueba 16	16	16	100.00 %
Prueba 17	15	15	100.00 %
Prueba 18	15	14	94.82 %
Prueba 19	16	16	100.00 %
Prueba 20	15	16	95.16 %

## 5.6. Análisis de Madurez Tecnológica

En aras de establecer el alcance de las actividades asociadas a la Investigación, el Desarrollo tecnológico y la innovación, se establece el grado de madurez tecnológica del sistema desarrollado para el diagnóstico de la Apnea de sueño mediante magnificación de video. Basado en las consideraciones que se proponen el documento de Minciencias [42]. En este sentido, este proyecto se puede calificar en el grupo TRL5 5 - Validación de los sistemas, subsistemas

o componentes en un entorno relevante, ya que los componentes tecnológicos integrados del proyecto desarrollado son similares a su aplicación final como se evidencia en este documento. Así mismo, la operatividad del sistema aun se presenta a nivel de laboratorio. De este modo, se establece que el trabajo presentado se encuentra en este nivel, debido a que aun no cumple con los requerimiento de los niveles superiores.

De esta manera, se espera que en un periodo de un año se mejore el prototipo hasta alcanzar un producto mínimo viable que facilite la detección por video analítica de episodios de la apnea obstructiva del sueño y que sea validado por un equipo de neumólogos, que además cuente con un nivel de precisión superior al 90 % con respecto a sensores de frecuencia respiratoria certificados. Paralelamente, se requiere encontrar un inversionista en Bogotá interesado en el área de la salud, que financie en un 80 % el costo total del mínimo producto viable del sistema de detección de AOS para iniciar la etapa comercial.

## 6 Conclusiones y Trabajo Futuro

Con respecto a la integración del hardware necesario para adquirir un stream de video durante el estado de sueño de una persona, se articulan los componentes necesarios que permiten la transmisión de las grabaciones hacia el servidor Cratos de la PUJ, en este sentido los dispositivos que componen el sistema pueden ser actualizados con nuevos desarrollos de hardware y software en futuras versiones para mejorar su robustez y optimizar las cualidades de servicio domiciliario.

Como se evidencio en el desarrollo de este trabajo, se usa la EVM propuesta por el MIT para amplificar los movimientos respiratorios capturados en un video y que posteriormente son analizados para así obtener la señal del comportamiento respiratorio de una persona. Es importante recalcar la necesidad del uso del procesamiento en la nube ya que el proceso de análisis de la magnificación de video requiere de características superiores a un procesador quad core y 16GB de memoria RAM para su eficiencia .

La evaluación del desempeño de las mediciones de frecuencia respiratoria obtenidas en el procesamiento de video con medidores comerciales de uso particular es una forma de demostrar que el sistema de detección de la apnea del sueño mediante video analítica es viable; toda vez que la similitud de las gráficas obtenidas en términos de su comparación es proporcional. En este sentido, se abre un camino de posibilidades para el diagnóstico de enfermedades en el área de la telemedicina y el diagnóstico de la AOS con sistemas que son menos invasivos.

El uso de servidores para el tratamiento de algoritmos que procesan video como el de magnificación de video aceleran su ejecución, sin embargo, se podrían obtener respuestas más ágiles si este tipo de programas son optimizados con respecto al tipo de hardware.

La magnificación de video se puede consolidar como una tecnología útil para la evaluación de enfermedades que, como la AOS, son costosas y los métodos en su diagnóstico tradicional son invasivos; sin embargo, es una tecnología que requiere de un mayor despliegue técnico y científico ya que trabaja directamente con el ámbito de la salud. Esto requiere de un equipo científico robusto, en tanto que es necesario desarrollos de hardware, software y de normatividad asociada al país.

Como aporte a la innovación y teniendo en cuenta el IoT, este sistema se puede considerar como una innovación emergente basada en sistemas interconectados, que cada vez van siendo requeridos con mayor frecuencia tanto en el ámbito de la salud como en otros aspectos sociales

para mejorar la calidad de vida de las personas. En este sentido, este proyecto deja como trabajos futuros:

- Optimizar el método EVM, para permitir que el diagnóstico de la AOS sea cada vez más rápido de generar.
- Desarrollar proyectos que usen sistemas de diagnóstico por video analítica en la nube con el fin de apoyar el área de la telemedicina.
- Incrementar el uso de sensores de no contacto para la valorización y diagnóstico médico en la nube, permitiendo un monitoreo de pacientes que cuenten con algún grado de criticidad en el estado de la salud.
- Trabajar en la protección de la data sensible recolectada, aprovechando tecnologías emergentes como el blockchain.

# Bibliografía

- [1] K. Schwab, “La cuarta revolución industrial.” [Online]. Available: <https://www.weforum.org/about/the-fourth-industrial-revolution-by-klaus-schwab>
- [2] W. H. Organization, “Global surveillance, prevention and control of chronic respiratory diseases,” *World Health Organization*, pp. 12–36, 2007.
- [3] P. Hidalgo-Martínez and R. Lobelo, “Epidemiología mundial, latinoamericana y colombiana y mortalidad del síndrome de apnea-hipopnea obstructiva del sueño (sahos),” *Revista de la Facultad de Medicina*, vol. 65, pp. 17–20, 2017.
- [4] K. Zhu, M. Li, S. Akbarian, M. Hafezi, A. Yadollahi, and B. Taati, “Vision-based heart and respiratory rate monitoring during sleep—a validation study for the population at risk of sleep apnea,” *IEEE Journal of Translational Engineering in Health and Medicine*, vol. 7, pp. 1–8, 2019.
- [5] R. D. Kim, V. K. Kapur, J. Redline-Bruch, M. Rueschman, D. H. Auckley, R. M. Bencá, N. R. Foldvary-Schafer, C. Iber, P. C. Zee, C. L. Rosen, S. Redline, and S. D. Ramsey, “An economic evaluation of home versus laboratory-based diagnosis of obstructive sleep apnea,” *Sleep*, vol. 38, pp. 1027–1037, 2015.
- [6] B. Rotenberg, C. George, K. Sullivan, and E. Wong, “Wait times for sleep apnea care in ontario: a multidisciplinary assessment,” *canadian respiratory journal*, 2015. [Online]. Available: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/20808975/>
- [7] H. Y. Wu, M. Rubinstein, E. Shih, J. Guttag, F. Durand, and W. Freeman, “Eulerian video magnification for revealing subtle changes in the world,” *ACM Transactions on Graphics*, vol. 31, 2012.
- [8] E. Paraschiv, E. Tudora, E. Tirziu, and A. Alexandru, “Iot and cloud computing-based remote healthcare monitoring system for an elderly-centered care,” in *2021 International Conference on e-Health and Bioengineering*, 2021.
- [9] M. Javaid and A. Haleem, “Industry 4.0 applications in medical field: A brief review,” *Current Medicine Research and Practice*, vol. 9, no. 3, 2019.
- [10] N. Unidas, “La agenda 2030 y los objetivos de desarrollo sostenible: una oportunidad para américa latina y el caribe,” 2015. [Online]. Available: [www.cepal.org/es/suscripciones](http://www.cepal.org/es/suscripciones)

- 
- [11] E. Tiempo, “¿qué son los microplásticos y por qué son peligrosos?” 2021. [Online]. Available: <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/que-es-el-microplastico-y-por-que-es-un-peligro-para-animales-y-personas-580858>
- [12] ResMed, “Apnealink air.” [Online]. Available: <https://www.resmed.lat/healthcare-professional/products/diagnostics/apnealink-air>
- [13] Philips Respironics, “Alice nightone.” [Online]. Available: <https://www.philips.es/healthcare/product/HC1114801/alice-nightone-home-sleep-testing-device#specifications>
- [14] Monbaby, “Monbaby advance.” [Online]. Available: <https://www.monbaby.com.mx/>
- [15] A. D. F. G. Rosa and R. C. Betini, “Noncontact spo2 measurement using eulerian video magnification,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 69, pp. 2120–2130, 5 2020.
- [16] M. Nasrullah, A. Risnumawan, and I. A. Sulistijono, “Vision-based heart and breath rate monitoring using skin color and motion,” *IES 2019 - International Electronics Symposium: The Role of Techno-Intelligence in Creating an Open Energy System Towards Energy Democracy, Proceedings*, pp. 550–555, 2019.
- [17] M. V. Gastel, S. Stuijk, S. Overeem, J. P. V. Dijk, M. M. V. Gilst, and G. D. Haan, “Camera-based vital signs monitoring during sleep - a proof of concept study,” *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol. 25, pp. 1409–1418, 2021.
- [18] F. Deng, J. Dong, X. Wang, Y. Fang, Y. Liu, Z. Yu, J. Liu, and F. Chen, “Design and implementation of a noncontact sleep monitoring system using infrared cameras and motion sensor,” *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 67, pp. 1555–1563, 2018.
- [19] C. Coronel, C. Wiesmeyr, H. Garn, B. Kohn, M. Wimmer, M. Mandl, M. Glos, T. Penzel, G. Klosch, A. Stefanic-Kejik, M. Bock, E. Kaniusas, and S. Seidel, “3d camera and pulse oximeter for respiratory events detection,” *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, vol. 25, pp. 181–188, 1 2021.
- [20] C. W. Wang, A. Hunter, N. Gravill, and S. Matusiewicz, “Unconstrained video monitoring of breathing behavior and application to diagnosis of sleep apnea,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 61, pp. 396–404, 2014.
- [21] G. Scebba, G. D. Poian, and W. Karlen, “Multispectral video fusion for non-contact monitoring of respiratory rate and apnea,” *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, vol. 68, pp. 350–359, 2021.
- [22] Bosch Security, “Video-dinion ip bullet 5000 hd,” 2019. [Online]. Available: [https://resources-boschsecurity-cdn.azureedge.net/public/documents/NTI\\_5000\\_A3\\_Data\\_sheet\\_esES.9007220087116299.pdf](https://resources-boschsecurity-cdn.azureedge.net/public/documents/NTI_5000_A3_Data_sheet_esES.9007220087116299.pdf)

- 
- [23] University of Tennessee at Martin, “Eia/tia 568a and 568b standard.” [Online]. Available: <https://www.utm.edu/staff/leeb/568/568.htm>
- [24] IEEE, “Ieee 802.1wstandard.” [Online]. Available: <https://ieeexplore-ieee-org.ezproxy.javeriana.edu.co/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=946612>
- [25] Intel Corporation, “Open source computer vision.” [Online]. Available: [https://docs.opencv.org/4.x/d6/d00/tutorial\\_py\\_root.html](https://docs.opencv.org/4.x/d6/d00/tutorial_py_root.html)
- [26] International Organization for Standardization ISO, “Date and time - representations for information interchange - part 1: Basic rules,” 2019. [Online]. Available: <https://www.iso.org/standard/70907.html>
- [27] J. Forcier, “Paramiko,” 2022. [Online]. Available: <https://www.paramiko.org/>
- [28] Y. Mangalapilly, “watchdog 2.1.9,” 2022. [Online]. Available: <https://pypi.org/project/watchdog/>
- [29] N. Wadhwa, M. Rubinstein, F. Durand, and W. Freeman, “Phase-based video motion processing,” *MIT Computer Science and Artificial Intelligence Lab*, 2013. [Online]. Available: <http://people.csail.mit.edu/nwadhwa/phase-video/phase-video.pdf>
- [30] O.-P. Heinisuo, “opencv-python 4.6.0.66,” 2021. [Online]. Available: <https://pypi.org/project/opencv-python/>
- [31] Numpy, “Numpy 1.23.0,” 2021. [Online]. Available: <https://numpy.org/>
- [32] Scipy, “scipy signal find peaks,” 2022. [Online]. Available: [https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.find\\_peaks.html#scipy.signal.find\\_peaks](https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.find_peaks.html#scipy.signal.find_peaks)
- [33] Fundación Raspberry Pi, “Raspberry pi pico,” 2022. [Online]. Available: <https://www.raspberrypi.com/products/raspberry-pi-pico/>
- [34] Analog devices, “Acelerometro adxl345,” 2022. [Online]. Available: <https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/adxl345.pdf>
- [35] Core Electronics, “Jy-mcu bluetooth to uart wireless serial port module for arduino,” 2022. [Online]. Available: <https://core-electronics.com.au/attachments/guides/Product-User-Guide-JY-MCU-Bluetooth-UART-R1-0.pdf>
- [36] Hackaday, “Serialplot - realtime plotting software,” 2019. [Online]. Available: <https://hackaday.io/project/5334-serialplot-realtime-plotting-software>
- [37] SciPy community, “Butterworth digital and analog filter design.” 2022. [Online]. Available: <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.butter.html>
- [38] Sleep Foundation, “Sleep respiratory rate,” 2022. [Online]. Available: <https://www.sleepfoundation.org/sleep-apnea/sleep-respiratory-rate#:~:text=The%20normal%20respiratory%20rate%20of,to%2016%20times%20a%20minute>

- 
- [39] NSAI standards, “Alarm systems - cctv surveillance systems for use in security applications,” 2010. [Online]. Available: [https://shop.standards.ie/preview/98697366958.pdf?sku=874418\\_SAIG\\_NSAI\\_NSAI\\_2078893](https://shop.standards.ie/preview/98697366958.pdf?sku=874418_SAIG_NSAI_NSAI_2078893)
- [40] F. Firouzi, B. Farahani, M. Weinberger, G. DePace, and F. Aliee, *IoT Fundamentals: Definitions, Architectures, Challenges, and Promises*. Springer International Publishing, 2020, ch. 1, p. 15. [Online]. Available: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-30367-9\\_1](https://doi.org/10.1007/978-3-030-30367-9_1)
- [41] Opencv, “Image thresholding,” 2022. [Online]. Available: [https://docs.opencv.org/4.x/d7/d4d/tutorial\\_py\\_thresholding.html](https://docs.opencv.org/4.x/d7/d4d/tutorial_py_thresholding.html)
- [42] Minciencias, “Niveles de madurez tecnológica del ministerio de ciencia y tecnología,” 2018. [Online]. Available: [https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/convocatoria/anexo\\_1..technology\\_readiness\\_levels\\_-\\_trl.pdf](https://minciencias.gov.co/sites/default/files/upload/convocatoria/anexo_1..technology_readiness_levels_-_trl.pdf)