

DETECCIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN SUSPENSIÓN EN AMBIENTES
DE BAJA ILUMINACIÓN, MEDIANTE EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE
IMÁGENES

CARLOS ANDRÉS ROJAS LEÓN
GERALD ANDREW TAJAN ALVAREZ

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO, BOYACÁ
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SOGAMOSO
2014

DETECCIÓN DE MATERIAL PARTICULADO EN SUSPENSIÓN EN AMBIENTES
DE BAJA ILUMINACIÓN, MEDIANTE EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE
IMÁGENES

CARLOS ANDRÉS ROJAS LEÓN
GERALD ANDREW TAJAN ALVAREZ

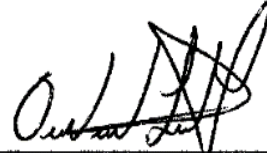
Trabajo de tesis en modalidad de participación activa en un grupo de investigación
reconocido por la DIN

Director:
Oscar Ivan Higuera Martínez
MSc. Ingeniero Electrónico
Codirector:
Juan Mauricio Salamanca
PhD. Ingeniero Electrónico

UNIVERSIDAD PEDAGÓGICA TECNOLÓGICA DE COLOMBIA
FACULTAD SECCIONAL SOGAMOSO, BOYACÁ
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA
SOGAMOSO
2014

NOTA DE ACEPTACIÓN


DIRECTOR DE ESCUELA



DIRECTOR DEL PROYECTO



PRESIDENTE DEL JURADO



JURADO



JURADO

Sogamoso, 07 de Noviembre de 2014

*Este proyecto está dedicado a Dios quien
nos ha brindado la oportunidad de
obtener las aptitudes y actitudes
necesarias para desarrollar éste proyecto
en pro de beneficiar a la comunidad.*

*Y a nuestros padres que nos han brindado
el apoyo necesario para llegar a éste
punto. Han dedicado parte importante de
sus vidas construyendo nuestro carácter
enseñándonos valores éticos y morales
para forjarnos como personas dispuesta a
servir.*

Gerald Andrew Tajan
Carlos Andrés Rojas

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus más sinceros agradecimientos a:

A Dios por la oportunidad que nos dio de haber cumplido cada uno de los requisitos para alcanzar un logro más de esta vida, por habernos dado la inteligencia y la habilidad para comprender las cosas y percibir con claridad lo que conllevan, por brindarnos las palabras y el conocimiento y haber superado cada obstáculo que se presentó, gracias por ser nuestro guía.

A nuestros padres por ser un apoyo incondicional cada día brindándonos consejos, palabras de fortaleza y sabiduría, por los sacrificios hechos por cada uno de ellos para ver realizados nuestros sueños.

A nuestros amigos y a nuestros docentes que de una manera u otra nos transmitían conocimientos y consejos ya fuera dentro o fuera del aula de clases.

A nuestro director de tesis Mg. Oscar Iván Higuera y codirector de tesis PhD Juan Mauricio Salamanca, que nos acompañaron durante todo este proceso.

Gracias.

CONTENIDO

	Pág.
1. INTRODUCCCIÓN	14
1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	15
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	16
1.3 OBJETIVOS.....	17
1.3.1 Objetivo general.....	17
1.3.2 Objetivos específicos.....	17
2. MARCO TEÓRICO	18
2.1 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES.....	18
2.1.1 La luz.....	18
2.1.2 Percepción de la luz.....	18
2.1.3 El Contraste.....	19
2.1.4. Iluminación.....	20
2.1.5 Técnicas de iluminación.	20
2.1.6 Visión Artificial.....	21
2.1.6.1 Adquisición de la imagen.....	21
2.1.6.2 Pre-procesado o realce de las partes de interés.....	22
2.1.6.3 Segmentación.....	22
2.1.6.4 Representación y descripción (Extracción de características).....	22
2.1.6.5 Reconocimiento.....	23
2.1.7 Procesamiento de imágenes con MATLAB.....	23

2.1.8	Imágenes digitales.....	23
2.1.9	Espacios de colores o estilos de representación de imágenes.....	24
2.1.9.1	Escala de Grises.....	24
2.1.9.2	RGB (Red-Green-Blue).....	24
2.1.10	Formatos usados en los archivos de imagen.....	25
2.1.10.1	JPEG (Joint Photographic Experts Group)	25
2.1.10.2	PNG (Portable Network Graphic).....	25
2.1.11	Cámara de fotografía digital.....	26
2.1.12	Histogramas.....	26
2.1.12.1	Ecualización de histogramas.....	26
2.1.13	Filtros digitales.....	26
2.1.13.1	Pasa bajos (LPF).....	26
2.1.13.2	Pasa altos (HPF).....	27
2.1.13.3	Pasa banda (PFB).....	27
2.1.14	Aproximación de curvas.....	28
2.1.14.1	Aproximación de curvas por polinomios de orden N.....	28
2.1.14.2	CFTOOL (Curve Fitting Tool)	28
2.1.15	GUIDE (Graphical User Interface Development Environment).....	29
2.2.	MATERIAL PARTICULADO (POLVO).....	29
2.2.1	Polvo.....	29
2.2.1.1	Carbón.....	29
2.2.2	Sílice (Dióxido de silicio).....	29

2.2.3 Peligrosidad del polvo.....	30
2.2.4 Clasificación de las zonas.....	30
2.2.4.1 Zona 20.....	30
2.2.4.2 Zona 21.....	30
2.2.4.3 Zona 22.....	30
2.2.5 Reglamentación para el control de riesgos en labores subterráneas.....	30
2.2.6 Tiempo de espera para volver al trabajo después de una voladura.....	31
2.2. 7 Registros de datos.....	31
2.2.8 Distancia de medición.....	31
2.2.9 Valoración de muestras de polvo.....	31
2.2.10 Explosividad del polvo de carbón.....	31
3. PROTOTIPOS, ALGORITMOS Y PRUEBAS	32
3.1. PROTOTIPOS.....	32
3.1.1 Prototipo 1.....	33
3.1.2 Prototipo 2.....	33
3.1.3 Obtención del material particulado.	35
3.1.4 Sistema de dispersión de material particulado.....	36
3.1.5 Iluminación al interior de los prototipos.	36
3.1.6 Otras características de los prototipos.....	37
3.1.7 Elección de la cámara.....	38

3.2 ALGORITMOS Y PRUEBAS REALIZADOS.....	39
3.2.1 Captura de imágenes.....	40
3.2.2 Recorte de imágenes.....	41
3.2.3 Resta entre Imágenes y ecualización como opción para la detección del material particulado y ruido.....	41
3.2.4 Binarización como opción para la detección del material particulado y ruido.....	41
3.2.5 Identificación del material particulado por medio de cambios entre los modelos de color.....	44
3.2.6 Filtros digitales.....	48
3.2.7 Algoritmo 1.....	50
3.2.8 Algoritmo 2.....	52
3.2.9 Algoritmo 3.....	54
5.2.9.1 Cantidad de Polvo, Aproximación de curvas y Error de medición..	56
3.2.10 GUIDE.....	58
3.2.11 Ejecución de instrucciones y ciclos máquina.....	63
 4. CONCLUSIONES	 65
 5. RECOMENDACIONES	 66
 6. TRABAJOS A FUTURO	 67
 BIBLIOGRAFIA	 68

LISTA DE FIGURAS

	Pág
Figura 1. Espectro electromagnético de la luz.....	18
Figura 2. Diagrama espectral de una luz Monocromática (a) ideal de luz roja, (b) con predominio de verde.....	19
Figura 3. Luz cromática (a) diagrama espectral de luz blanca, (b) descomposición de luz blanca.....	19
Figura 4. Técnicas de iluminación (a) direccional frontal, (b) lateral, (c) frontal axial difusa, (d) coaxial.....	22
Figura 5. Representación de imagen RGB en matriz de tres capas.....	23
Figura 6. Representación de imagen en escala de grises en matriz.....	24
Figura 7. Transformación de modelo de color (a) imagen RGB, (b) imagen en escala de grises.....	24
Figura 8. Descomposición de la imagen (a) imagen RGB, (b) capas R, G y B.....	25
Figura 9. Partes de una cámara fotográfica.....	26
Figura 10. Ecualización de histogramas (a) Imagen original y su histograma, (b) Resultado de aplicarle una ecualización a la imagen original.....	27
Figura 11. Ejemplo de aplicación de los filtros pasa bajos y pasa altos (a) imagen original, (b) resultado de aplicación de filtro pasa bajo, (c) resultado de la aplicación del filtro pasa altos.....	27
Figura 12. Ejemplo de aplicación de filtro pasa banda (a) imagen original, (b) resultado de añadir ruido con estructura, (c) resultado de aplicación de filtro pasa banda.....	28
Figura 13. Ejemplo de aproximación de curvas por polinomios de orden n.....	29
Figura 14. Prototipo 1 con sus correspondientes partes y dimensiones.....	33
Figura 15. Prototipo 2 con sus correspondientes partes.....	34
Figura 16. Vistas y dimensiones del prototipo 2 (a) vista lateral, (b) vista frontal.....	34
Figura 17. Fotografía del prototipo 2.....	35

Figura 18.	Material particulado usado.....	35
Figura 19.	Sistema de dispersión de material particulado al interior del prototipo 2.....	36
Figura 20.	Iluminación al interior de los prototipos (a) usando diodos LED de chorro color blanco frio de alta intensidad, (b) usando diodos LED con ángulo de visión de 120 grados y color blanco cálido de alta intensidad.....	37
Figura 21.	Cámaras digitales proporcionadas por el grupo de investigación DSP-UPTC (a) CA-82A (NORMAL LENS), (b) CS-800 Screw Color CMOS, (c) Cámara DSC-W630 de Sony.....	38
Figura 22.	Imágenes con polvo obtenidas con (a) cámara CS-800 Screw Color CMOS, (b) cámara CA-82A (NORMAL LENS), (c) cámara DSC-W630 de Sony.....	39
Figura 23.	Imágenes que muestran los problemas generados al no contar con una base fijada a la estructura del prototipo 1.....	41
Figura 24.	Restas entre imágenes sin polvo y sus correspondientes ecualizaciones.....	42
Figura 25.	Algunas imágenes resultantes del proceso de binarización.....	43
Figura 25.	Algunas imágenes resultantes del proceso de binarización Continuación.....	44
Figura 26.	Imagen original con polvo.....	46
Figura 27.	Modelo RGB y sus planos.....	46
Figura 28.	Modelo de escala de grises.....	46
Figura 29.	Modelo CMY y sus planos.....	47
Figura 30.	Modelo HSI y sus planos.....	47
Figura 31.	Modelo HSV y sus planos.....	47
Figura 32.	Modelo YIQ y sus planos.....	48
Figura 33.	Modelo YUV y sus planos.....	48
Figura 34.	Filtros digitales (a) y (b) Imágenes originales – Frame 5692 y Frame 47689 respectivamente, (c) y (d) Imágenes resultantes de aplicar filtro pasa bajos, (e) y (f) Imágenes resultantes de aplicar filtros pasa altos.....	49
Figura 35.	Diagrama de flujo usado para la generación del primer código con las	

	imágenes tomadas en el primer prototipo y MATLAB r2009a.....	51
Figura 36.	Diagrama de flujo usado para la generación del segundo código con las imágenes tomadas en el segundo prototipo y MATLAB r2009a.....	53
Figura 37.	Diagrama de flujo usado para la generación del cuarto código con las imágenes tomadas en el segundo prototipo y MATLAB r2014a.....	55
Figura 38.	Curva de máximo brillo registrado por Frame de un video y su correspondiente aproximación polinómica de sexto grado.....	56
Figura 39.	Curva de máximo brillo registrado por Frame de un video, curva promedio y error aproximado.....	57
Figura 40.	Resultado de la diferencia entre la curva de máximo brillo por Frame de un video y su correspondiente curva aproximada por polinomio de sexto orden..	58
Figura 41.	Partes de la pantalla principal del GUI.....	59
Figura 42.	Ventana de validación de Administrador.....	60
Figura 43.	Ventana de error en la validacion de usuario.....	61
Figura 44.	Ventana para seleccionar los archivos de interés.	62
Figura 45.	Interfaz en funcionamiento.....	62
Figura 46.	Daños observados tras realizar el cambio de formato con aTube Catcher.....	64

RESUMEN

Partiendo de la necesidad que tiene el sector minero de poder identificar la presencia y la concentración de contaminantes como el polvo de carbón, con el fin de evaluar su comportamiento en el espacio y el tiempo, y establecer estrategias de control para su seguimiento, en el presente trabajo se propone el desarrollo de un algoritmo que permite determinar la presencia de material particulado en un ambiente de baja iluminación, por medio del procesamiento digital de imágenes, haciendo uso del software matemático MATrix LABoratory (MATLAB).

Los imágenes usadas para el desarrollo del algoritmo se obtienen de un video de 30 Frames Por Segundo (FPS), con resolución HD, los cuales son tomados en dos prototipos estructuralmente distintos, en un ambiente de baja iluminación y con niveles elevados de contaminación con material particulado de carbón. El análisis de las imágenes obtenidas en estas condiciones es un trabajo particularmente interesante, ya que es necesario afrontar diferentes retos técnicos para su correcta realización e interpretación. Entre las pruebas que se realizan se incluyen cambios de modelos de color, aplicación de filtros y análisis de los histogramas. El algoritmo desarrollado detecta la cantidad de polvo presente en cada uno de los frames, y entrega un valor en porcentaje de la cantidad de polvo presente en la imagen analizada, con respecto al máximo posible en el ambiente usado (prototipo), incluyendo una estimación del error obtenido.

Palabras clave: Análisis de imágenes a color, análisis de secuencia de imágenes, cámaras digitales, descomposición de imágenes, eliminación de ruido de imágenes, filtros digitales.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de detección y/o medición de material particulado que han sido desarrollados para su uso en el sector minero, han contribuido a la elaboración de sistemas que permiten realizar un control manual, semiautomático o automático del material particulado ayudando a reducir daños a la salud de los trabajadores y pérdidas económicas en equipos de minería [1-4]. En el presente proyecto se desarrolla un algoritmo en MATLAB que permite determinar la presencia de material particulado en suspensión a partir del procesamiento digital de imágenes en ambientes de baja iluminación, abriendo la puerta a futuros proyectos de investigación orientados a la elaboración de sistemas para la supervisión de la cantidad de material particulado al interior de las minas, que contribuyan a reducir los riesgos de accidentes y de padecer enfermedades por parte de los trabajadores allí presentes [5-10].

El proyecto es desarrollado bajo la modalidad de participación activa en el grupo de investigación Digital Signal Processing (DSP) de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC), y se espera que pueda ser utilizado como punto de apoyo para futuros proyectos relacionados con el manejo y control del material particulado.

Entre las limitantes que tiene el proyecto se encuentran que: el desarrollo se lleva a cabo al interior de un prototipo que emula un ambiente de baja iluminación y no en un ambiente real donde se genera el material particulado, como lo es una mina; las condiciones de temperatura, humedad relativa y presión al interior del prototipo no son controladas; se realiza un análisis offline de las imágenes o video deseado, en lugar de realizarlo en tiempo real o sincronizado con eventos que ocurran al interior del prototipo, y las cantidades de material particulado al interior del prototipo durante las diversas pruebas es constante.

El desarrollo metodológico propuesto para el proyecto consiste en identificar el estado del arte mediante la indagación de bases de datos, realizar la construcción del prototipo, así como el diseño e implementación del código necesario para realizar pruebas, implementación de pruebas y evaluación de resultados. Finalmente, es importante resaltar que para los anteriores puntos planteados en el desarrollo metodológico del proyecto se identificaron como recursos básicos: los conocimientos en el área de procesamiento digital de imágenes, cámaras proporcionadas por el grupo de investigación DSP, construcción del prototipo y sistema de iluminación elaborado por los autores del proyecto.

1.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Actualmente existe una gran variedad de enfermedades respiratorias asociadas a la contaminación por material particulado presente en el aire en ambientes mineros. En Colombia han sido pocos los trabajos que se han hecho por parte de las autoridades ambientales y los centros académicos para poder identificar y controlar las concentraciones de dicho material. Se destacan trabajos en las principales ciudades del país tales como Bogotá (Solarte et al.1999), Medellín (Echeverri, 2000), Cali (Botero, Tróchez & Olaya, 2004), Santa Marta (Garcia, Agudelo & Jiménez, 2006) y el más reciente realizado en el Valle de Aburrá (Bedoya et al., 2009). La mayoría de estos trabajos han concluido que los límites anuales fijados por la norma colombiana para PST y PM10 del material particulado en suspensión se han superado, aunque no superan la norma diaria[11].

En la actualidad existen diversos sistemas y equipos electrónicos que permiten medir cantidades de material particulado en suspensión basados en las propiedades de reflexión y difracción de la luz, así como en métodos empíricos que permiten conocer algunas propiedades del material particulado suspendido en el aire por medio de análisis de laboratorio. Estos métodos impiden que se puedan realizar sistemas de supervisión o control en tiempo real del material particulado al interior de las minas de manera económica y sencilla [2-4, 12].

Una de las principales desventajas que ofrecen los equipos de medición hoy en día es la manera como se realiza la medición del material particulado, debido a que los principales equipos funcionan por medio de la recolección de muestras, proceso que puede durar periodos de hasta 24 horas, como en el caso del controlador de flujo tipo másico y tipo volumétrico. También existen bombas de muestreo personal que proveen y registran datos de forma continua, pero no permiten un grado de automatización más alto que permita activar automáticamente un sistema de ventilación cuando se excedan los límites. Otra desventaja que se observan en los métodos actuales son los tipos de errores que se presentan en las medidas, siendo los más representativos: la contaminación artificial de las muestras en su manipulación, las perdidas en su manipulación (transporte o almacenamiento) y los errores en los manejos de datos[11].

La contaminación a la que se exponen principalmente los trabajadores de empresas de explotación de recursos mineros, consiste en material particulado suspendido en el aire durante las horas de explotación. Estos niveles de contaminación pueden llegar a ser tan altos que perjudican la salud de los trabajadores, generando adicionalmente grandes riesgos de explosividad y pérdidas invaluable al interior de las minas [1,5,8-10,13]. Tragedias como estas pueden llegar a ser evitadas por medio de la elaboración de sencillos sistemas automáticos que permitan detectar el material particulado, facilitando el desarrollo de futuros trabajos enfocados a crear sistemas de supervisión o control automatizados para dicho material en el interior de las minas.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Enfermedades como la neumoconiosis, la antracosis y la silicosis afectan a los trabajadores y personas expuestas a ambientes contaminados por el material particulado proveniente de industrias mineras, causando grandes deterioros en la salud e incluso la muerte [7-10]. Teniendo en cuenta lo anterior, es urgente realizar la búsqueda de sistemas de medición y/o detección del material particulado que permitan realizar un control más eficiente de sus concentraciones al interior de las minas [1, 5, 6].

En el presente proyecto se busca encontrar un algoritmo que permita detectar la presencia de material particulado suspendido en el aire en ambientes con baja iluminación, por medio del procesamiento digital de imágenes haciendo uso de cámaras digitales de fácil adquisición con el fin de elevar el grado de tecnificación en los ambientes de explotación minera subterránea, de forma que sea posible crear sistemas automáticos que hagan un mejor uso de los recursos disponibles para el control de material particulado en suspensión [1-4,14-16].

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo general. Desarrollar un algoritmo que permita determinar la presencia de material particulado en suspensión a partir del procesamiento de imágenes en ambientes de baja iluminación.

1.3.2 Objetivos específicos

- Desarrollar la captura de imágenes con material particulado en suspensión en ambientes de baja iluminación.
- Desarrollar un algoritmo que permita detectar el ruido inherente a las condiciones del ambiente y que pueda confundirse con el material particulado que se desea detectar.
- Desarrollar un algoritmo que permita establecer niveles de concentración de material particulado en suspensión y emitir una alerta en caso de concentraciones excesivas y peligrosas para el ser humano, de acuerdo a la normatividad existente al respecto.

2. MARCO TEORICO

En este capítulo se aclaran algunos términos o conceptos que se utilizan en el procesamiento digital de imágenes y en la minería.

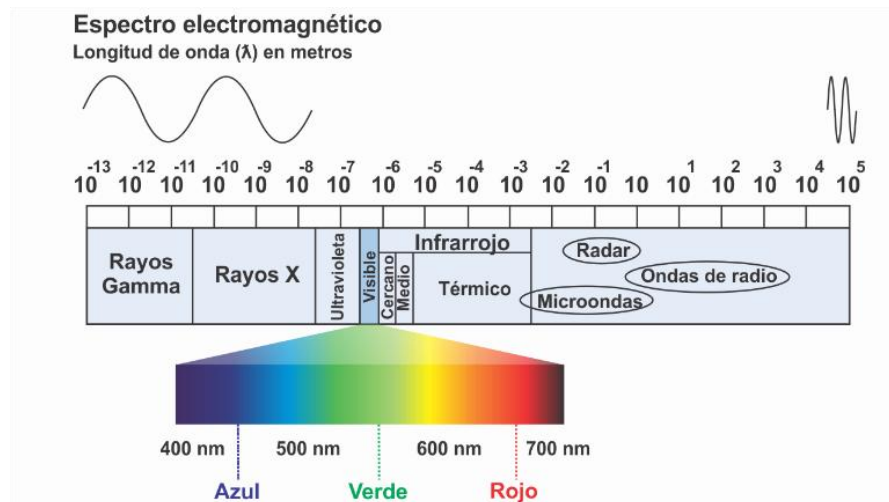
2.1 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

2.1.1 La luz. La luz es la radiación electromagnética visible por el ojo humano y está compuesta por partículas denominadas fotones, donde cada fotón tiene asociada una ecuación de onda [17].

La radiación electromagnética que constituyen las ondas luminosas que percibe el ojo humano se encuentran entre 400 y 700 nanómetros (véase la Figura 1), y son procesadas en el cerebro dando la sensación de color y brillo [17-19].

2.1.2 Percepción de la luz. La forma como es percibida la luz por parte del ojo humano y dispositivos electrónicos varía dependiendo de su composición.

Figura 1. Espectro electromagnético de la luz

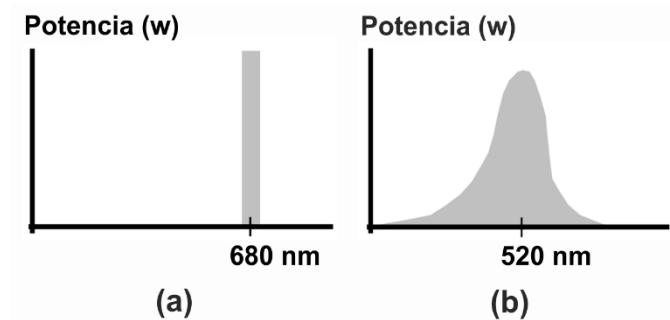


Fuente: Autores

Se define la luz monocromática como la luz que en su diagrama espectral posee un pico en la longitud de onda que le corresponde y cero en el resto del diagrama espectral. Un ejemplo de luz monocromática se puede apreciar en la Figura 2 [17,19].

La luz monocromática en la práctica, es casi imperceptible por tener menos energía asociada. La mayoría de colores que podemos apreciar, constituyen realmente una mezcla de haces con diferentes longitudes de onda, por esto suele ser denominada luz policromática. Su diagrama espectral se asemeja a lo que se puede apreciar en la Figura 2 (b); cuando interactúa más de un haz de luz podemos decir que obtenemos una luz cromática [17, 20].

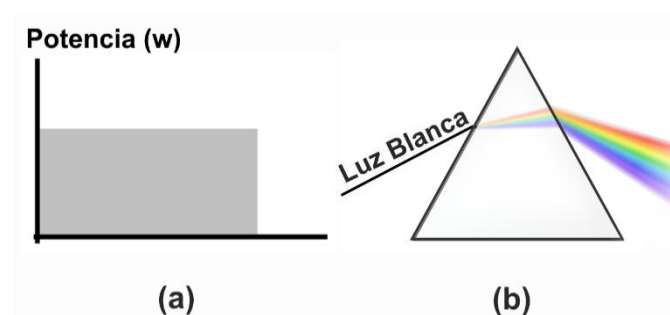
Figura 2. Diagrama espectral de una luz Monocromática (a) ideal de luz roja, (b) con predominio de verde.



Fuente: Autores.

El mejor ejemplo de una luz policromática es la luz blanca la cual está constituida por una cantidad amplia de longitudes de onda, pareciéndose su diagrama espectral de potencia al que aparece en la Figura 3 (a).

Figura 3. Luz cromática (a) diagrama espectral de luz blanca, (b) descomposición de luz blanca.



Fuente: Autores.

2.1.3 El contraste. La sensibilidad a la intensidad es la que nos permite distinguir entre un nivel de contraste y otro, se define el contraste como la diferencia de intensidad. Cuando en una escena hay diferencias pronunciadas de intensidad se dice que la escena tiene gran contraste [22].

2.1.4. Iluminación. Una iluminación adecuada permite resaltar las características de interés del objeto a analizar, reducir la complejidad de la imagen y mejorar el tiempo de respuesta del procesamiento digital [58]. A continuación se presentan los principales tipos de fuente de luz:

- **Lámparas de Tungsteno.** Fuente lumínica caracterizada por no proporcionar una iluminación uniforme y disipar demasiado calor. Si la frecuencia de captura de la cámara no es un múltiplo de la frecuencia de la red eléctrica (50Hz en Europa o 60Hz América), provocará interferencia en la captura; haciendo que aparezcan franjas más claras u oscuras en la imagen capturada [58].
- **Lámparas fluorescentes.** Presentan una iluminación bastante homogénea, su balance de color no es uniforme (longitudes de onda mayoritariamente de azul) y no disipan mucho calor. Pueden ser operados con rectificadores de frecuencia (25KHz) para evitar que el parpadeo afecte la calidad de la captura [58].
- **Halógenos.** Poseen un filamento en su interior como las lámparas de Tungsteno, adicionalmente tiene un gas raro y halógeno; no presentan problemas con la frecuencia, la intensidad de luz que proporcionan es bastante constante y su vida útil es de 1000 a 2000 horas [58].
- **Diodos emisores de luz.** Poseen mejor respuesta que las lámparas fluorescentes y los halógenos; ideales en sistemas estroboscópicos, funcionan a baja tensión, disipan poco calor, son pequeños, livianos y tienen la mayor vida útil [58].
- **Láser.** Proporciona un alto poder de radiación, su luz es altamente cromática y se usan para poder determinar la tercera dimensión de un objeto. En la actualidad, debido a normas de seguridad, su uso se está reemplazando por módulos de diodos láser. Los módulos de diodos laser son pequeños y con ellos se pueden proyectar líneas, puntos, círculos, etc. [58].

2.1.5 Técnicas de iluminación. Entre las técnicas de iluminación más utilizadas se tienen las siguientes:

- **Iluminación direccional frontal.** Se la utiliza en objetos planos con superficies mates, la cámara se ubica en la misma dirección que la luz y recibe la luz reflejada por el objeto. El tipo de fuente que se utiliza con esta técnica la constituyen los LEDs y fuentes de fibra óptica.

- **Iluminación lateral.** Se emplea para mostrar detalles laterales de los objetos, estructura superficial; pero introduce problemas con los efectos de la sombra, debido a que con esta técnica de iluminación la luz incide lateralmente a un determinado ángulo.
- **Iluminación frontal axial difusa.** Se utiliza para todos los tipos de objetos, sin importar que sean mates o brillantes. Como fuente de luz se pueden emplear lámparas que proporcionen una luz difusa y uniforme, como los focos incandescentes (tungsteno), fluorescente, etc. Este método no puede ser utilizado en espacios reducidos.
- **Iluminación coaxial.** Emplea una luz difusa y uniforme en objetos mates o brillantes para todo tipo de inspección; pero la luz debe incidir al objeto desde el mismo eje de la cámara. Esta iluminación se genera mediante el uso de anillos de luz o divisores de haz, por lo que representa un alto coste y es difícil de montar.

Un ejemplo de estas técnicas de iluminación se puede observar en la Figura 4, en donde se muestra la forma cómo se deben disponer tanto el objeto a analizar, como la fuente de luz y la cámara.

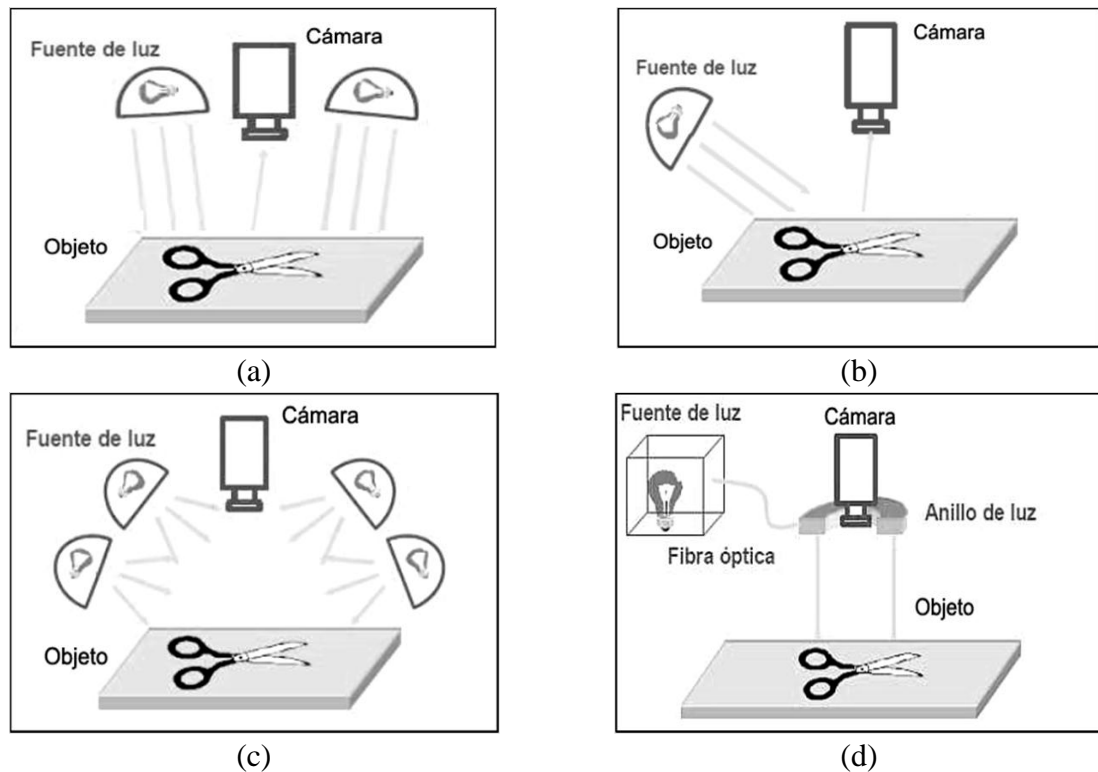
2.1.6 Visión Artificial. La finalidad de la visión artificial es obtener información del mundo físico a través de sensores de luz, los cuales proporcionan información de brillo y color; esta información suele ser representada por medio de imágenes [17].

Un sistema de visión artificial está compuesto por un sensor y una etapa de procesado [23]. Para la etapa de procesado (en la que se obtiene la información de la imagen) usualmente se definen cinco pasos importantes: la adquisición de la imagen, realce de partes de interés, segmentación, representación y descripción; y finalmente, el reconocimiento y la interpretación [17].

Para desarrollar eficazmente esta etapa de procesado se suelen utilizar programas de procesamiento de imágenes los cuales nos ayudan a manipular las imágenes a nuestro interés; ya sea creando, reduciendo, ampliando o rotulando, etc. [24].

2.1.6.1 Adquisición de la imagen. Este proceso se refiere a la obtención y transformación de una señal continua conformada por haces de luz, en una señal discreta, por lo general está constituido por 2 etapas: captura y digitalización [17, 25].

Figura 4. Técnicas de iluminación (a) direccional frontal, (b) lateral, (c) frontal axial difusa, (d) coaxial.



Fuente: LabVIEW VISION - Fundamentos del Procesamiento Digital de Imágenes. [En línea]. Comunidad de Labview - National Instruments. "Actualizado en 2013". [Citado en 22-10-2014]. Disponible en internet: <https://decibel.ni.com/content/docs/DOC-31879>.

2.1.6.2 Pre-procesado o realce de las partes de interés. En esta fase se busca acentuar las partes de interés de la imagen, mediante el uso de filtros y transformaciones geométricas [17, 25].

2.1.6.3 Segmentación. Esta etapa busca aislar en regiones los elementos u objetos que generen un interés en la escena, para comprenderla. Éste aislamiento se efectúa mediante clasificación de píxeles, según los atributos básicos de una imagen; como luminancia en imágenes monocromáticas y las componentes de color en imágenes de color [17, 25].

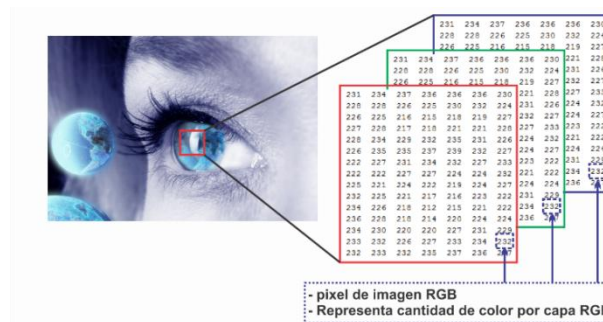
2.1.6.4 Representación y descripción (extracción de características). En esta etapa, se pasa de una información visual primaria; a un conjunto elaborado de información en donde se encuentran las características extraídas; para la posterior clasificación y reconocimiento. Estas características son morfológicas, de textura, color y brillo [4,12].

2.1.6.5 Reconocimiento. En esta última etapa, se considera que se han utilizado; los filtros, transformaciones y segmentaciones adecuadas; para poder reconocer de una manera acertada los objetos de interés de una imagen [17, 25].

2.1.7 Procesamiento de imágenes con MATLAB. MATLAB es un software matemático, que posee un entorno de desarrollo integrado con un lenguaje de programación propio en el que se pueden disponer de diversas herramientas que permiten la manipulación de matrices, la representación de datos y funciones, creación de interfaces de usuario y toolboxes agrupados en el “Image Processing Toolbox”. Este Toolbox es usado para trabajar con el procesamiento de imágenes ya que permite realizar diversos tratamientos a las imágenes como la aplicación de filtros, redimensionamiento, segmentación, cambios de modelo de color, etc. [26, 27]. La capacidad de aplicaciones de este software matemático se amplía a diversos campos de la ingeniería permitiendo el desarrollo de una enorme cantidad de proyectos como por ejemplo los propuestos por Zhan, Jiang-shi, *et al* [28], Zhian, Huang Yinghua, *et al* [4], Wang, Zeng, *et al* [29], Medina, Ramon Oswaldo, *et al* [30], Mancebo Perez, Alba [31], Martínez, Juan E. [32], entre otros.

2.1.8 Imágenes digitales. En un sistema computacional, se suele representar una imagen por medio de matrices, las cuales en sus filas y columnas tienen valores que se encuentran entre 0-255, y que representan los tonos de la imagen. Las imágenes a color por lo general son representadas por tres capas o tres matrices, las cuales tienen la información de la gama de colores que tiene dicha imagen: la capa R (Rojo), la capa G (Verde) y la capa B (Azul) (véase Figura 5) al contrario de las imágenes en escala de grises las cuales están representadas por solo una matriz (véase Figura 6). MATLAB, tiene la capacidad manipular y de hacer transformaciones de estas matrices para poder observar o resaltar características de las imágenes que a simple vista no se pueden notar [33].

Figura 5. Representación de imagen RGB en matriz de tres capas



Fuente: Autores

2.1.9 Espacios de colores o estilos de representación de imágenes. Son continuamente utilizados para representar visualmente las imágenes, estos espacios de colores, intentan representar la mayor cantidad de colores visibles por el ojo humano[34]. Siendo los más conocidos el espacio RGB, escala de grises, YUV, CMY, YIQ, HSI y HSB (HSV) [33-35].

Figura 6. Representación de imagen en escala de grises en matriz



Fuente: Autores

2.1.9.1 Escala de grises. Constituye el espacio de color de una dimensión, con la que se suelen representar las imágenes. En este espacio, por lo general el valor de cada pixel, representa la luminancia de la imagen. En casos donde las imágenes tienen una profundidad de 8 bits, los valores posibles de luminancia varían entre 0 y 255, donde 0 representa el negro y 255 el blanco (véase Figura 7) [26,31,36,37].

Figura 7. Transformación de modelo de color (a) imagen RGB, (b) imagen en escala de grises

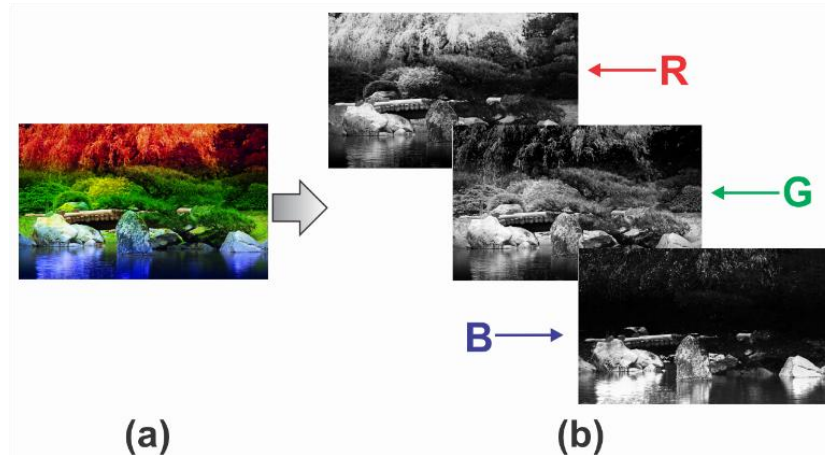


Fuente: Autores

2.1.9.2 RGB (Red-Green-Blue). Espacio de color de tres dimensiones, es decir que los colores de cada pixel de la imagen, se pueden representar como una combinación de los matices rojo, azul y verde. Éste sistema de representación de imágenes tiende a ser el más utilizado en la fabricación de cámaras fotográficas y de vídeo (véase Figura 8) [36].

2.1.10 Formatos usados en los archivos de imagen. El concepto compresión, se define como el proceso de conseguir un volumen de datos inferior al original para representar una determinada información.

Figura 8. Descomposición de la imagen (a) imagen RGB, (b) capas R, G y B



Fuente: Autores

Las imágenes suelen almacenarse en los ordenadores en forma de ficheros [17]. Cada formato tiene características específicas en cuanto a ventajas e inconvenientes para optimizar el espacio requerido y/o conservar las características de la imagen [38]. Existen dos principales tipos de compresiones[26,38]. Los formatos de compresión sin pérdida, permiten recuperar la representación original de la información, de forma exacta, a partir de la versión comprimida. Las compresiones con pérdida, permiten solo una reconstrucción aproximada de la representación original con pérdida de información [26,38].

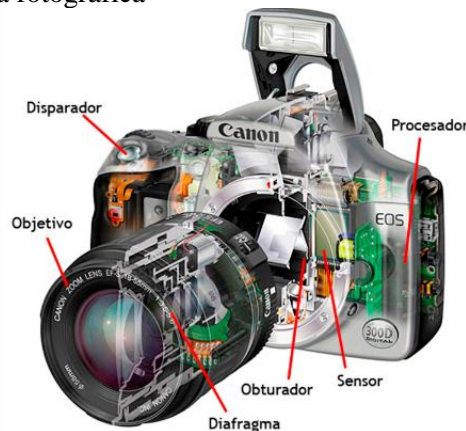
Entre los más utilizados podemos resaltar los formatos de compresión: TIFF, GIF, BMP, JPEG, BITMAP, JFIF, PCX, PGM y RAW.

2.1.10.1 JPEG (Joint Photographic Experts Group). Es un método de compresión con pérdida para imágenes estandarizado por ISO. El cual presenta una adecuada relación entre el nivel de calidad y el tamaño que ocupa en soportes digitales [26].

2.1.10.2 PNG (Portable Network Graphic). Método de compresión sin pérdida. Este formato de mapa de bits es de libre distribución y nació como alternativa a los formatos GIF y JPG [39, 40].

2.1.11 Cámara de fotografía digital. Una cámara fotográfica, se puede traducir o ver como una cámara oscura, que deja pasar un haz de luz en un momento dado, para que la imagen que está enfocada sea registrada por un sensor. Entre las partes más representativas de una cámara encontramos el obturador, el diafragma el sensor, el procesador, el objetivo y el disparador (véase Figura 8) [25, 41].

Figura 9. Partes de una cámara fotográfica



Fuente: Partes de la cámara. [En línea]. "Actualizado en 2014". [Citado en 01-10-2014]. Disponible en internet: <http://fotoclikr.wordpress.com/category/curso-basico-de-fotografia/page/4/>

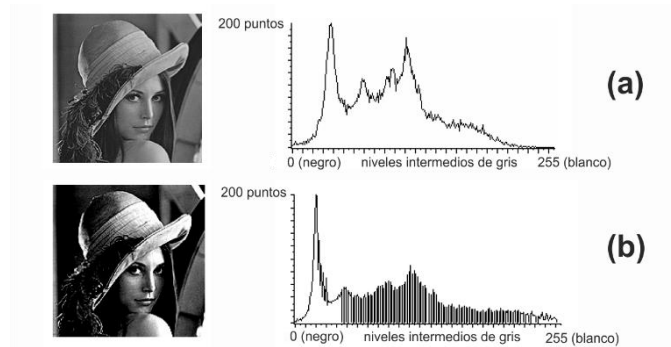
2.1.12 Histogramas. Los histogramas se definen como la representación de los niveles de intensidad de los píxeles de una imagen [36]. Suelen representarse en forma de un diagrama de barras, donde cada barra simboliza un nivel de tono distinto y la altura de esta barra la cantidad de píxeles de la imagen que tienen ese nivel de gris [31].

2.1.12.1 Ecualización de histogramas. La ecualización del histograma de una imagen, es una transformación, que pretende obtener para una imagen, un histograma con una distribución uniforme. [26]. Un ejemplo de la ecualización de histogramas aparece en la Figura 10.

2.1.13 Filtros digitales. Algoritmo matemático cuyo fin es realizar una selección de frecuencias[43]. Existen 3 principales tipos de filtros: pasa bajos, pasa altos y pasa bandas. En la Figura 11(a) podemos encontrar la imagen original de Lena, mientras que en la Figura 15(b) y 15(c) encontraremos la transformación que se obtiene al aplicarle un filtro digital.

2.1.13.1 Pasa bajos (LPF). Se caracteriza por permitir el paso de las frecuencias menores, atenuando y eliminando las frecuencias medias y altas [37, 43]. Son filtros que disminuyen las diferencias de los valores de los píxeles respecto a sus vecinos[31].

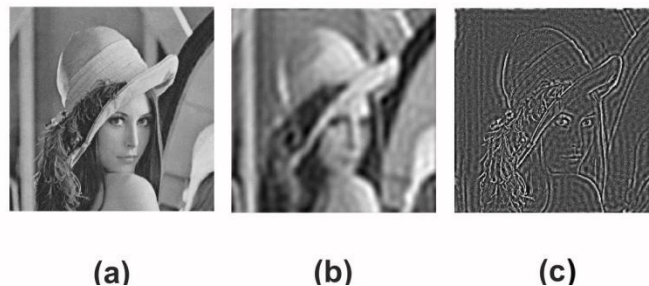
Figura 10. Ecualización de histogramas (a) Imagen original y su histograma, (b) Resultado de aplicarle una ecualización a la imagen original



Fuente: VÉLEZ SERRANO, José F, *et al.* Visión por computador. [Libro en línea]. 2a ed. versión 1. Disponible en: <http://www.visionporcomputador.es/libroVision/libro.html>. s.n. 2003. Actualizado en 2012.

2.1.13.2 Pasa altos (HPF). Este tipo de filtro se utiliza para detectar cambios de luminosidad y realzar bordes o detalles finos (edge sharpening) [31, 37]. Un ejemplo de la aplicación de un filtro pasa altos se encuentra la Figura 11(c).

Figura 11. Ejemplo de aplicación de los filtros pasa bajos y pasa altos (a) imagen original de Lena, (b) resultado de aplicación de filtro pasa bajo, (c) resultado de la aplicación del filtro pasa altos.



Fuente: VÉLEZ SERRANO, José F, *et al.* Visión por computador. [Libro en línea]. 2a ed. versión 1. Disponible en: <http://www.visionporcomputador.es/libroVision/libro.html>. s.n. 2003. Actualizado en 2012.

2.1.13.3 Pasa banda (PBF). Este filtro atenúa las frecuencias altas y bajas, dejando pasar solo frecuencias intermedias, en el caso ideal solo permitirían el paso de frecuencias que estén en medio de dos frecuencias de corte [30]. Un ejemplo de la aplicación de un filtro pasa banda se encuentra la Figura 12.

Figura 12. Ejemplo de aplicación de filtro pasa banda (a) imagen original de Lena, (b) resultado de añadir ruido con estructura que consiste en la desaparición de 1 de cada 3 líneas de la imagen, (c) resultado de aplicación de filtro pasa banda.



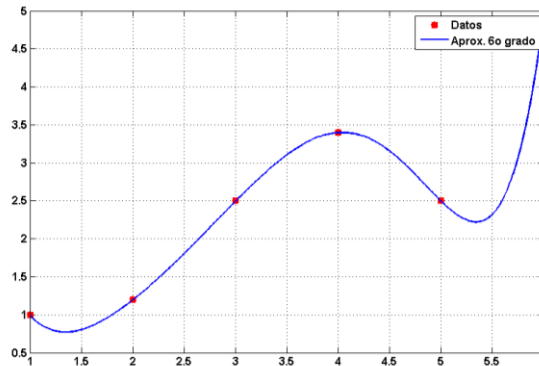
Fuente: VÉLEZ SERRANO, José F, *et al.* Visión por computador. [Libro en línea]. 2a ed. versión 1. Disponible en: <http://www.visionporcomputador.es/libroVision/libro.html>. s.n. 2003. Actualizado en 2012.

2.1.14 Aproximación de Curvas. En muchas ramas de las ciencias se suelen seguir comportamientos de individuos u objetos, estos comportamientos suelen registrarse para una posterior evaluación y generación de hipótesis de comportamientos futuros. Muchas veces el criterio de observación o los aparatos de medida suelen tener errores de precisión y exactitud, dado a que a la mayoría de fenómenos físicos tienen un comportamiento que se puede modelar matemáticamente, se suelen utilizar distintos métodos de aproximación de curvas para generar modelos que puedan describir el comportamiento de alguno de estos fenómenos. Podemos destacar casos particulares, en los que se utiliza la aproximación de curvas como: el modelo basado en funciones exponenciales para levitación magnética [32], el estudio del comportamiento de material particulado PM10 en el aire [44], estimación de índices de desigualdad y pobreza [45] y desarrollo de fetos bovinos [42].

2.1.14.1 Aproximación de curvas por polinomios de orden N. En la aproximación de curvas mediante polinomios, se trata de conseguir básicamente los coeficientes $a_0, a_1, a_2, \dots, a_n$, de una función de orden N; de tal manera que esta curva interseque la mayor cantidad de puntos, que describen el comportamiento de un fenómeno. La mayor dificultad que ocurre con este método es desconocer el grado del polinomio necesario para lograr la exactitud deseada [46].

2.1.14.2 CFTOOL (Curve Fitting Tool). Es una herramienta de MATLAB que facilita el hacer aproximaciones de funciones dado un conjunto de datos [47]. Una ventaja que ofrece ésta herramienta es la de permitir importar los datos que se han guardado en archivos *.MAT. En la Figura 13 se encuentra un ejemplo de una curva aproximada por medio de la herramienta CFTOOL.

Figura 13. Ejemplo de aproximación de curvas por polinomios de orden n



Fuente: Autores

2.1.15 GUIDE (Graphical User Interface Development Environment). Es una herramienta diseñada por MATLAB, para desarrollar entornos gráficos, con el fin de permitir que los usuarios de un programa, puedan interactuar con éste, por medio de objetos gráficos o elementos entre los cuales se pueden destacar: menús, botones de selección, botones de pulsación, ejes gráficos, casillas de verificación, cuadros para editar texto, listas, entre otros.

2.2. MATERIAL PARTICULADO (POLVO)

2.2.1 Polvo. El polvo se define como un conjunto de partículas microscópicas, en la mayoría de casos imperceptibles, que flotan en el aire y se depositan sobre cuerpos formando una capa de material, generalmente, este se considera como no deseado o contaminante [48, 49].

2.2.1.1 Carbón. Es una roca sedimentaria de color negro, muy rica en carbono. Existen varias clasificaciones de los carbones según su rango, el cual se determina por distintos factores tales como materia volátil, contenido de carbono fijo, humedad, poder calorífico, entre otros. Una de las más utilizadas divide a los carbones de mayor a menor rango de la siguiente manera: antracita, bituminoso bajo en volátiles, bituminoso medio en volátiles, bituminoso alto en volátiles, sub bituminoso, lignito y turba [50].

2.2.2 Sílice (Dióxido de silicio). Compuesto químico presente en el carbón. Formado por la combinación de un átomo de silicio y dos de oxígeno. El sílice, es comúnmente, utilizado en la elaboración de vidrio, construcción de fibra óptica y como aislante (Mica) [51]. El sílice es el principal causante de la enfermedad denominada silicosis, una de las más peligrosas en el ámbito minero por exposición al polvo [13, 50].

2.2.3 Peligrosidad del polvo. Su peligrosidad, depende principalmente de tres factores independientes: concentración, tamaño de partículas y su constitución química y mineralógica [52]. Con respecto a su tamaño, se consideran más peligrosas las de menor tamaño, por lo que estas son fácilmente retenidas en las vías respiratorias y tienden a sedimentarse en las distintas regiones del tracto respiratorio[53].

En cuanto a la composición química del material particulado se estudia la composición del mineral, dándole un alto grado de importancia a determinar el contenido de sílice libre [13, 54, 55].

2.2.4 Clasificación de las Zonas. La clasificación por polvos sobre atmósferas explosivas se basa en tres tipos de zonas, zona 20, zona 21 y zona 22 [49].

2.2.4.1 Zona 20. Área de trabajo, en la que una atmósfera explosiva en forma de nube de polvo combustible en el aire está presente de forma permanente, por un período de tiempo prolongado o con frecuencia. Entre los principales lugares en los que comúnmente, se detectan estas atmósferas se pueden resaltar las tolvas, silos, ciclones, filtros, sistemas de transporte, mezcladores, molinos, secadores equipos de ensacado [49].

2.2.4.2 Zona 21. Área de trabajo, en la que es probable la formación ocasional de una atmósfera explosiva en forma de nube de polvo en condiciones normales de funcionamiento [49].

2.2.4.3 Zona 22. Área de trabajo, en la que en condiciones normales de funcionamiento, no es probable la formación de atmósferas explosivas en formas de una nube de polvo; y en caso de formarse, dicha atmósfera explosiva sólo permanece durante un breve período de tiempo [49].

2.2.5 Reglamentación para el control de riesgos en labores subterráneas. En Colombia, la reglamentación para el control de riesgos laborales bajo tierra se establece en los artículos 34 y 40 del decreto N° 1335, publicado el 15 de julio de 1987. Posteriormente, el Ministerio de Minas y Energías en cumplimiento de sus funciones impuestas por dicho decreto expide la “Norma sobre ventilación y control de polvos en las explotaciones mineras” en colaboración con el SENA, ECOCARBON, La Escuela de Minas de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y la Secretaría de minas de Boyacá; en donde se complementan los requerimientos técnicos que deben cumplir las labores subterráneas sobre ventilación y control de polvo.

2.2.6 Tiempo de espera para volver al trabajo después de una voladura. En el capítulo 3 en la sección 1.5 de la Norma Colombiana de Seguridad de Ventilación y Control de Polvos en las explotaciones mineras, así como las de otros países; se recomienda que debe haber un lapso de tiempo aproximado de 30 minutos que debe transcurrir después de producirse una voladura para que el personal regrese al frente de trabajo; este tiempo se considera adecuado para garantizar que los gases y polvos de los frentes de trabajo estén por debajo de los límites permisibles. Cabe resaltar también que este tiempo es función al caudal de aire que se maneje en el frente de trabajo [56, 57].

2.2.7 Registros de datos. Es muy frecuente para determinar algunas de las características de las minas de donde se pretendan obtener alguna clase de mineral. Se registran como mínimo los datos de: la especificación de la corriente investigada y su aforo en el lugar y momento de la toma de muestreos, el número de obreros y de semovientes ocupados en la zona recorrida por el monóxido de carbono (CO) de los motores de combustión empleados durante el periodo escogido, y la proporción de polvos y gases nocivos [1].

2.2.8 Distancia de medición. Las tomas de muestras del material particulado deben hacerse a no más de 15 metros del frente de explotación y debe abarcar a todos los productores que se encuentren trabajando; la toma de muestras se deben repartir uniformemente, durante los periodos de trabajo y cuando se presente la máxima actividad [57].

2.2.9 Valoración de muestras de polvo. Dada la relevancia que tiene el poseer un registro fiel de las características de la mina se han desarrollado diversos instrumentos de medidas con el fin de entregar una medición precisa de las variables de interés. Entre estos instrumentos podemos resaltar el Tyndaloscópio, Conímetro, Bomba a mano P.R.U., Bomba a mano Dräger, Cerchar 857, Simgard, Coniciclo, Balanza Gast, Precipitación Térmico corriente; la mayoría de estos maneja la unidad de medida de partículas por centímetro cúbico.

La valorización de la explosividad de las muestras de polvo de carbón se realiza mediante al análisis especial de dos factores principales; la composición química y la composición física. La valorización química se determina una expresión del contenido de materias volátiles del carbón en base seca exenta de ceniza. El índice físico tiene en cuenta las características de la sensibilidad a la inflamación del carbón y su severidad a la explosión [2].

2.2.10 Explosividad del polvo del carbón. Para que el polvo de carbón sea explosivo debe tener un diámetro que pueda ser tamizado y pase por una malla 200 la cual tiene una abertura de 0.075mm [42]; además que debe haber una concentración en una nube mínima de $45\text{ gr}/\text{m}^3$ y máxima de $1\text{ kg}/\text{m}^3$ [57].

Cuando hay una alta concentración de una mezcla polvo/aire, que está por encima de la concentración máxima explosiva no se considera una atmosfera explosiva; pero está puede llegar a serlo si se diluye, o si se forman turbulencias y acumulaciones locales [1, 49].

La cantidad necesaria de polvo en suspensión, para que se forme la atmosfera explosiva dependerá de cada tipo de sustancia; pero sería suficiente la suspensión de una capa de polvo que se apreciase a simple vista [49].

Las explosiones en una mina de carbón pueden tener distintas fuentes de ignición. A continuación se mencionan algunas de las mas representativas: superficies calientes, llamas, gases y particulas calientes, corrientes electricas parasitas, electricidad estatica, rayos, ondas electromagneticas (incluyen RF), ultrasonidos, compresión adiabática y ondas de choque, reacciones exotermicas, incluyendo autoignición de polvos [5,58].

3. PROTOTIPOS, ALGORITMOS Y PRUEBAS REALIZADAS

En esta sección se presenta la explicación de las características de los prototipos usados para emular un ambiente de baja iluminación y las pruebas realizadas para determinar la cantidad de polvo suspendido en el aire a partir de los algoritmos desarrollados.

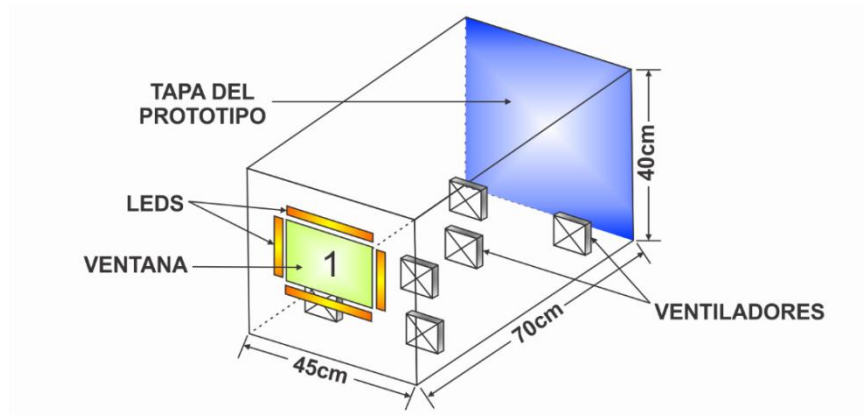
3.1. PROTOTIPOS

Para el desarrollo del algoritmo que permite realizar la medición del material particulado en suspensión es necesario construir una estructura que emule un ambiente de baja iluminación, tener una mínima perdida del polvillo de carbón, definir e implementar el tipo de iluminación, elegir el sistema de dispersión para el material particulado y escoger la cámara adecuada.

Durante el desarrollo del proyecto se lleva a cabo la construcción de dos prototipos con el fin de emular un ambiente de baja iluminación con contaminación del aire por material particulado de carbón como sucede en un ambiente de trabajo de explotación minera subterránea, los cuales, no cuentan con condiciones controladas de temperatura, humedad relativa y presión.

3.1.1 Prototipo 1. El primer prototipo usado tiene forma rectangular con unas dimensiones de 45cm de largo por 40cm de alto y 70cm de profundidad, cuenta con una ventana de vidrio, seis ventiladores que desempeñan la función de propulsar el material particulado en sentido de la cámara, un grupo de diodos LED para proporcionar la iluminación necesaria y una única tapa de acceso al interior del prototipo. De éste prototipo es importante resaltar que fue descartado, debido a que presentaba dificultades para tener acceso a su interior, el desarrollo de actividades de limpieza y/o mantenimiento electrónico era engorroso, presentaba fugas y la acumulación del material particulado en las esquinas del prototipo. Este prototipo con sus correspondientes componentes se muestra en la Figura 14.

Figura 14: Prototipo 1 con sus correspondientes partes y dimensiones.



Fuente: Autores.

3.1.2 Prototipo 2. El segundo prototipo, se construye en forma de tolva, con cuatro ventiladores situados en la parte inferior para generar una mejor circulación del polvo, dos puntos de acceso al interior del prototipo para facilitar la limpieza y a su vez se mejora el sistema de hermetismo para eliminar las fugas del material particulado.

Este prototipo se hace con medidas para hallar su volumen y poder trabajar con la cantidad adecuada del material particulado. El volumen total (V_T) se calcula realizando la suma entre los valores de volumen parcial (V_{P1} , V_{P2} , V_{P3}) obtenidos a partir de la descomposición del prototipo en tres secciones. La Ecuación 1 resume el cálculo del volumen total y la descripción de las secciones usadas para encontrar el volumen parcial de cada una de estas:

- Volumen parcial 1 - Sección 1: Caja rectangular con dimensiones de: 70cm de largo, 40 cm de ancho y 30cm de alto.

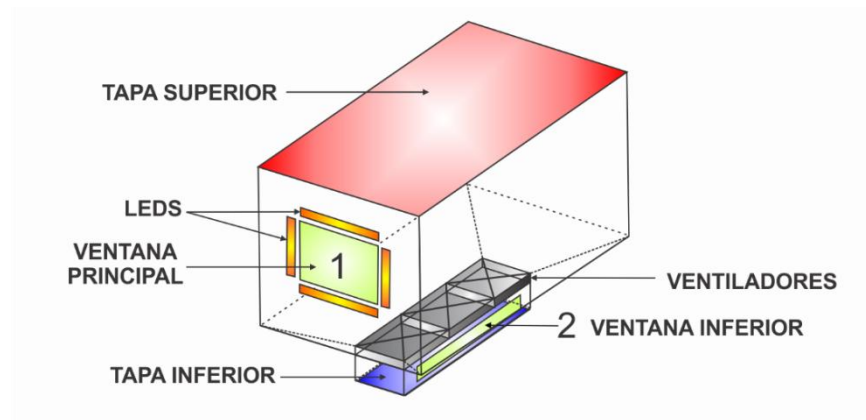
- Volumen parcial 2 - Sección 2: Tolva que tiene una altura de 20cm y unas dimensiones de: 40cm de largo por 70cm de ancho en la parte superior, y 40cm de largo por 10cm de ancho en la parte inferior.
- Volumen parcial 3 - Sección 3: Caja rectangular con dimensiones de: 40cm de largo, 10 cm de ancho y 7cm de alto.

$$V_T = V_{P1} + V_{P2} + V_{P3} \quad \text{Ecuación (1)}$$

$$V_T = 0,112 \text{ m}^3$$

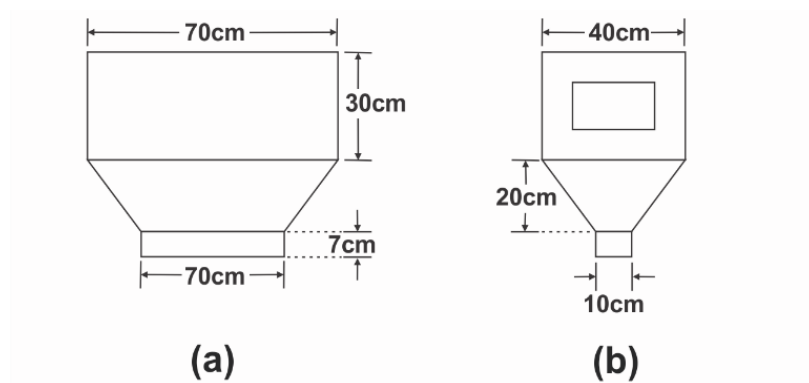
En la Figura 15 se puede ver el segundo prototipo con sus partes. En la Figura 16 se pueden apreciar sus vistas y respectivas dimensiones. Finalmente, en la Figura 17 se presenta una foto del prototipo.

Figura 15. Prototipo 2 con sus correspondientes partes.



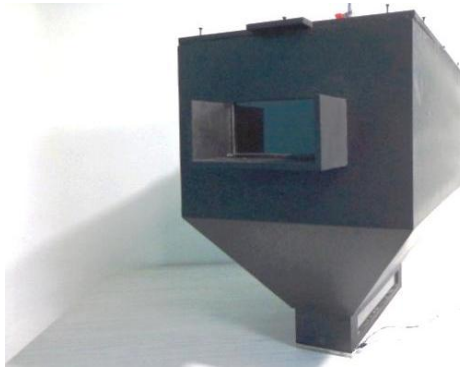
Fuente: Autores.

Figura 16. Vistas y dimensiones del prototipo 2 (a) vista lateral, (b) vista frontal.



Fuente: Autores.

Figura 17. Fotografía del prototipo 2.



Fuente: Autores.

3.1.3 Obtención del material particulado. Para obtener el material particulado o polvillo de carbón se visitó el Centro Nacional Minero (SENA Sogamoso - Colombia) y se adquirió una primera muestra del material. Con esa muestra se verifica el comportamiento que tiene el polvillo en el tiempo dentro del prototipo. Posteriormente, se asiste una segunda vez, para obtener una nueva muestra extraída directamente de los socavones, ya que ésta presenta menos contaminación por agentes externos.

Se considera de gran importancia el trabajar con polvo de carbón con características explosivas, por lo que de la muestra conseguida solo se utilizan las partículas tamizadas con una malla 200 (diámetro de 0.075mm). Luego se procede a calcular la cantidad de material disponible y se encuentra que hay una cantidad aproximada de 300gr (más de lo suficiente para crear una atmosfera explosiva dentro de los prototipos). En la Figura 19 se encuentra una fotografía del material particulado y la miligramera usada para determinar la cantidad de material ingresado al interior de los prototipos durante las pruebas.

Figura 18. Material particulado usado



Fuente: Autores

3.1.4 Sistema de dispersión de material particulado. En este sistema se hace uso de ventiladores de computador tradicionales, debido a que se presentan algunas ventajas al trabajar con ellos; entre sus ventajas podemos destacar su reducido tamaño, bajo consumo de energía, facilidad para la regulación de velocidad, resistencia a los ambientes de trabajo pesado, generación mínima o nula de chispas que puedan generar posibles explosiones al interior del prototipo, la fácil adquisición y su bajo costo. La forma como se han dispuesto los ventiladores al interior del prototipo 2 permite mantener el material particulado en suspensión por más tiempo, esta disposición se puede observar en la figura 20.

Figura 19. Sistema de dispersión de material particulado al interior del prototipo 2.



Fuente: Autores

3.1.5 Iluminación al interior de los prototipos. Para proporcionar una iluminación uniforme se escoge la técnica de iluminación frontal usando varios grupos de diodos LED.

Inicialmente, se trabajó con diodos LED de 5mm de diámetro que emiten luz color blanco frío de alta intensidad (6000 - 8000mcd) y cuentan con un ángulo de vista de 25 grados (LED de chorro convencional), pero se observa que estos generan la aparición de círculos de luz en el fondo del prototipo provocando que se dificulte el análisis de las imágenes. Este efecto se pueden observar en la Figura 18(a).

Tras realizar un análisis de los resultados, se opta por cambiar la fuente de iluminación y se usan diodos LED de 5mm de diámetro, que emiten luz color blanco cálido de alta intensidad (1600 - 1700mcd) y cuentan con un ángulo de vista de 120. La mejoría al usar estos diodos para la iluminación se puede apreciar en la Figura 18(b).

Figura 20. Iluminación al interior de los prototipos (a) usando diodos LED de chorro color blanco frío de alta intensidad, (b) usando diodos LED con ángulo de visión de 120 grados y color blanco cálido de alta intensidad.



Fuente: Autores

3.1.6 Otras características de los prototipos. Dentro de las características más importantes de los prototipos podemos destacar el sistema de hermetismo, las ventanas de observación, el sistema de limpieza de las ventanas de observación y finalmente la base de la cámara.

El sistema de hermetismo elaborado para evitar pérdidas de material en el primer prototipo consiste en el sellamiento del prototipo con: silicona selladora para vidrios y cinta de embalar; mientras que en el segundo prototipo es usada: silicona selladora para vidrios y tiras de Goma EVA (Etileno Vinil Acetato) que rodean cada una de las tapas del prototipo). El material Etileno Vinil Acetato fue escogido por sus características físicas tras haber ensayado previamente con espuma y tiras de caucho, observando que tras usar las tiras de Goma EVA se tenían menores pérdidas del material particulado.

Las ventanas para la observación del comportamiento del material particulado están conformadas por vidrios de 3mm de grosor adheridos a la estructura de los prototipos con silicona selladora para vidrios.

El sistema usado para facilitar la visión a través de la ventana consiste en un par de imanes de Neodimio sujetos a espumas ubicados uno a cada lado de la ventana, permitiendo realizar la limpieza, a medida que se desplaza el imán ubicado al exterior del prototipo gracias a su características magnéticas, evitando con ello ingresar sistemas complejos que involucren motores que incrementen el riesgo de explosión al interior del prototipo o que permitan la fuga del material particulado.

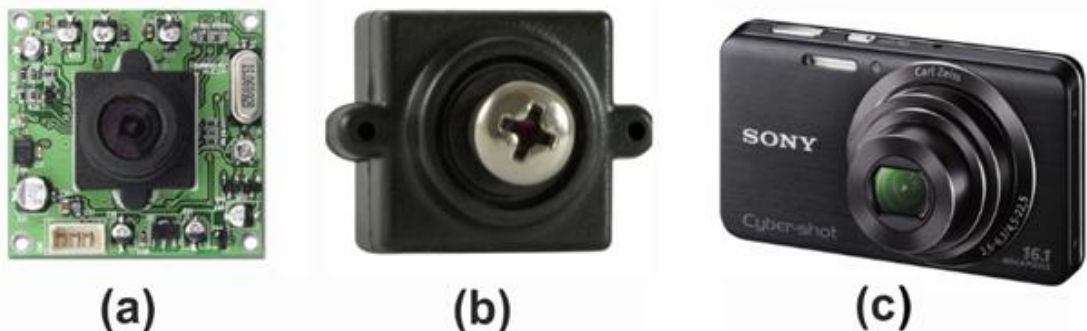
Finalmente, la base para la cámara fotográfica usada consiste en una superficie adherida a la estructura del prototipo, la cual, con ayuda de unos soportes adicionales hechos con láminas de Icopor, permiten mantener la cámara fotográfica en un mismo lugar sin comprometer el estado físico de la misma, ya sea por rayones o exceso de presión.

3.1.7 Elección de la cámara. Esta sección se define el tipo de cámara a utilizar, considerando que se dispone de varias cámaras, entre las que se cuentan, la cámara CA-82A (NORMAL LENS) Figura 21(a) y la cámara CS-800 Screw Color CMOS Figura 21(b), provistas por el grupo de investigación DSP de la UPTC, además, de la cámara W630 que aparece en la Figura 21, propiedad de los desarrolladores del proyecto. Para cada una de éstas se genera un código usado durante la adquisición de las imágenes.

La cámara CS-800 Screw Color CMOS presenta la facilidad de poder tomar datos en tiempo real, pero se descartó por presentar mucha interferencia añadida por la transmisión inalámbrica y la dificultad de sintonización, la reducida calidad de la imagen (300 – 400 TVL) y por la dificultad que presenta su sintonización, ya que esta cámara envía los datos de forma inalámbrica. La cámara CA-82A (NORMAL LENS) no presenta el problema de ruido o interferencia que presenta la cámara CS-800; pero sigue ofreciendo una calidad regular en la resolución de la imagen (512 x 492 pixeles).

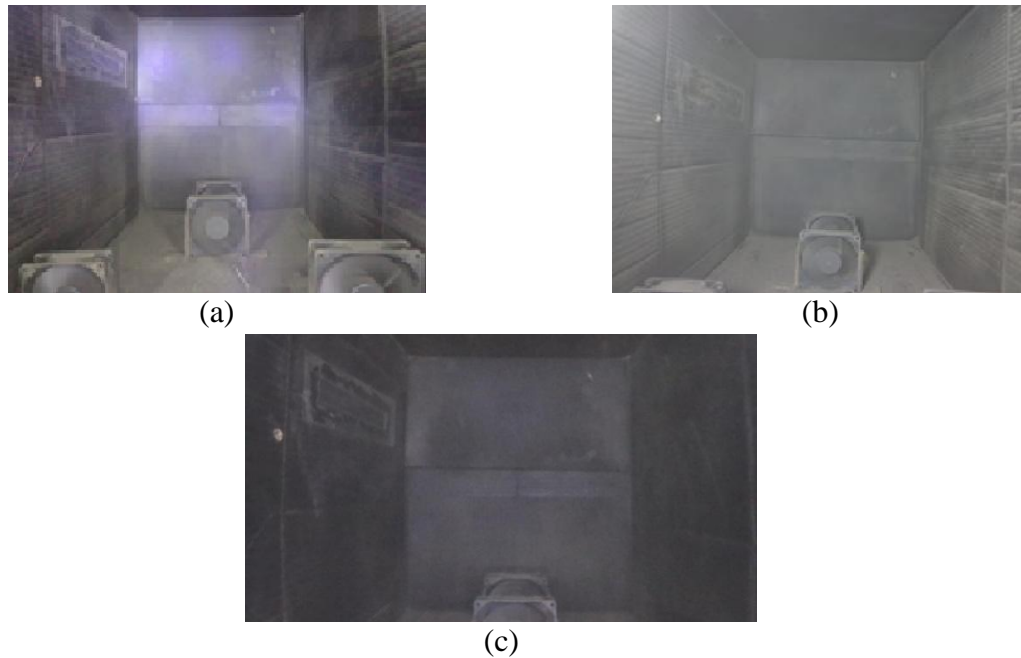
La cámara W630 de Sony aparece en la Figura 21 y ofrece calidad de imágenes de hasta 16.1 millones de pixeles y videos de resoluciones HD (720 x 1280). Se concluye que es mejor trabajar con ésta debido a su resolución, ya que nos ofrece una información más detallada de lo que sucede en el interior del prototipo. La principal desventaja que presenta esta cámara es no poder hacer las mediciones en tiempo real, aunque esto no entorpece el desarrollo del proyecto. Un vistazo comparativo a la calidad de las imágenes obtenidas con las cámaras trabajadas se muestra en la Figura 22.

Figura 21. Cámaras digitales proporcionadas por el grupo de investigación DSP-UPTC (a) CA-82A (NORMAL LENS), (b) CS-800 Screw Color CMOS, (c) Cámara DSC-W630 de Sony



Fuente: Autores

Figura 22. Imágenes con polvo obtenidas con (a) cámara CS-800 Screw Color CMOS, (b) cámara CA-82A (NORMAL LENS), (c) cámara DSC-W630 de Sony



Fuente: Autores

3.2 ALGORITMOS Y PRUEBAS REALIZADAS

Al haber definido las características físicas con las que va a contar el prototipo se procede a la elaboración del código necesario para detectar y aislar el ruido inherente a las condiciones en que se va a trabajar. Dada la relación existente entre el nivel de brillo de las imágenes y la cantidad de material suspendido en el aire; en esta sección también se expone el código propuesto para establecer los niveles de concentración de material particulado en suspensión y emitir una alerta en caso de concentraciones excesivas y peligrosas para el ser humano de acuerdo a la normatividad existente al respecto.

Después de escoger e instalar la fuente de luz, la cámara y establecer el sitio en el que se iban a posicionar los ventiladores, se procede a separar el material obtenido mediante la malla 200 en pequeñas muestras de 1gr con el fin de ingresar gramo por gramo al prototipo y poder capturar por medio de imágenes el comportamiento en el espacio del material particulado. Este procedimiento resulta inútil, debido a que el material es muy fino y después de un tiempo se adhiere a las paredes y ventanas del prototipo. Para la corrección de este problema se procede a pulir las paredes del prototipo con Rubbing, aunque no se obtiene una mejora significativa y se añade un sistema que permite tener una visibilidad aceptable de lo que sucede dentro prototipo.

Tras realizar varias pruebas se ve que gran parte de las muestras pequeñas del carbón tienden a seguir adheridas al prototipo, lo que induce a ingresar los 300 gramos de polvo dentro del prototipo, de tal manera que al acumularse cierta cantidad de material se produzcan avalanchas que provoquen la recirculación del material. Una vez accionados los ventiladores, estos esparcen la mayor parte del material dentro del prototipo, ya disperso, se apagan los ventiladores de manera que el polvo empieza a decantar; inmediatamente, se procede a la adquisición del vídeo que posteriormente se ingresara en un computador y se transformara en imágenes con formato “.jpg”.

Entre las pruebas a realizar se encuentran: el evaluar los sectores de la imagen que presentan una información confiable, la resta de imágenes para la detección del movimiento del polvo, la binarización para la cuantificación del material suspendido, el cambio de modelos de color y uso de filtros digitales para el tratamiento de las imágenes.

3.2.1 Captura de imágenes. Una vez que se apagan los ventiladores se realiza una limpieza del vidrio para dar una mayor confiabilidad de la información que se ve representada por medio de imágenes claras y sin puntos fantasma debido a partículas de polvo adheridas al vidrio.

Partiendo de la imposibilidad que tiene realizar la toma de imágenes consecutivas con la cámara DSC-W630 de Sony debido al sobrecalentamiento del sensor, se graba un vídeo, ya que este modelo de cámara ofrece una calidad de vídeo HD y una velocidad de grabación de 30 FPS obteniendo con ello 30 imágenes por segundo y una solución oportuna al inconveniente encontrado.

Del procedimiento realizado con el primer prototipo el cual inicialmente no contaba con una base fija para soportar la cámara durante la elaboración las pruebas se obtienen imágenes y videos con distintos ángulos de captura, y se concluye que el procedimiento llevado a cabo es inadecuado debido a que se pretende abordar el problema mediante un algoritmo que permita la detección de movimiento por medio de la resta de imágenes consecutivas. Las imágenes que evidencian este problema y que fueron tomadas en el primer prototipo haciendo uso de la cámara DSC-W630 de Sony se muestran en la Figura 23.

Figura 23. Imágenes que muestran los problemas generados al no contar con una base fija a la estructura del prototipo 1



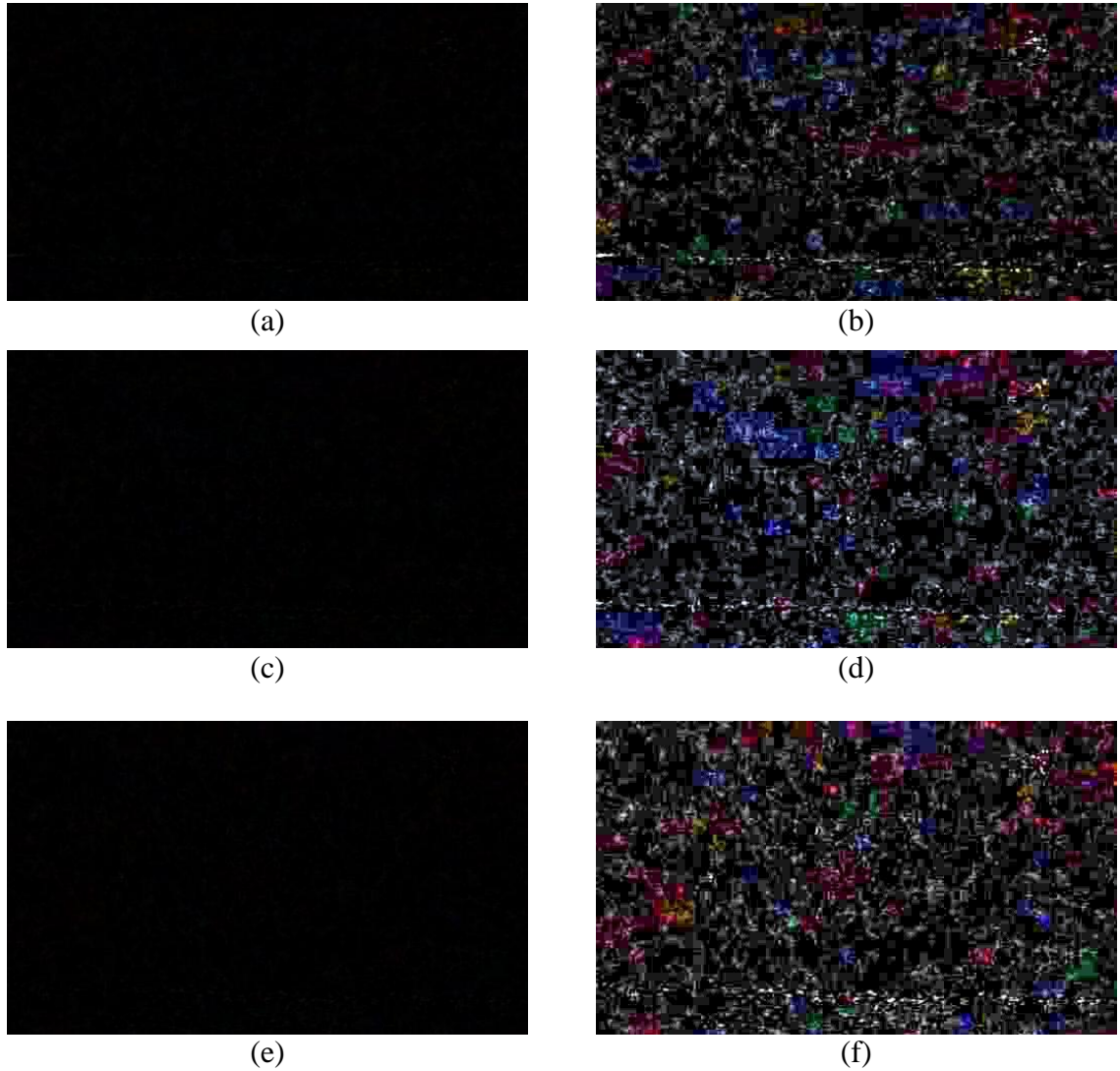
Fuente: Autores

3.2.2 Recorte de imágenes. Esta etapa consiste en recortar las imágenes, para dejar solo la región central de la imagen capturada que cuente con la misma profundidad y que visualmente tenga la misma cantidad de luz; de ésta manera se descarta cualquier efecto que pueda añadir el cambio de profundidad e iluminación que se puedan presentar y se facilita la etapa del procesamiento de las imágenes.

3.2.3 Resta entre imágenes y ecualización como opción para la detección del material particulado y ruido. En esta prueba se busca detectar los cambios de los niveles de material particulado en suspensión mediante el uso de restas entre las matrices que representan dos imágenes consecutivas de uno de los vídeos. Al efectuar algunas restas de las imágenes donde no hay presente material particulado se espera obtener matrices donde el valor medio sea cero, lo cual no es así; esto se debe a dos principales factores: el formato de compresión .jpg y el ruido inherente de la cámara. Las imágenes que son representadas por las matrices resultado se pueden observar en la Figura 24 (a), (c), (e); las que posteriormente, se les ecualiza buscando hacer más evidentes sus diferencias. En la Figura 24 (b), (d), (f) se muestran los resultados de la ecualización de las anteriores imágenes.

3.2.4 Binarización como opción para la detección del material particulado y ruido. Esta prueba consiste en tomar una secuencia de imágenes con presencia de material particulado y una imagen base; a la secuencia de imágenes se le resta la imagen base y con esto teníamos la información del polvo presente. Después de realizar éste proceso con todas las imágenes se encuentra un umbral de binarización (10), el cual permite descartar la información de ruido aunque resulta no ser una base confiable para determinar la cantidad de material particulado, puesto que éste umbral también descarta partes de material particulado que se podrían considerar insignificantes.

Figura 24. Restas entre imágenes sin polvo y sus correspondientes ecualizaciones.



Fuente: Autores

En la Figura 25(a) se encuentra la imagen resultante de la binarización de la resta entre dos imágenes sin polvo por medio de la cual se demuestra que a pesar de que se tomen dos imágenes en un ambiente sin polvo estas nunca serán totalmente iguales debido al ruido inherente generado por la cámara usada para la captura de la imagen. De esta imagen se obtiene un valor de brillo máximo de treinta y siete, al cual se identifica como el valor de la tonalidad de máximo ruido. Para las imágenes presentadas en la Figura 25 (a), (c), y (e) se utiliza un valor umbral de 10 para realizar la binarización, de manera que se pueda observar mejor como el ruido se puede confundir con el material particulado y notar que éste se presenta en las zonas más oscuras del prototipo.

En la Figura 25(b) se presenta la imagen sin polvo usada como referencia en las restas que se continúan realizando a través del desarrollo de la prueba de binarización.

En la Figura 25(c) se presenta el resultado de la binarización a la imagen resultante de la resta entre la imagen con polvo de la Figura 25(d) y la imagen sin polvo de la Figura 25(b).

En la Figura 25(e) se presenta el resultado de la binarización a la imagen resultante de la resta entre la imagen con polvo de la Figura 25(f) y la imagen sin polvo de la Figura 25(b).

En la Figura 25(g) se presenta el resultado de la binarización a la imagen resultante de la resta entre la imagen con polvo de la Figura 25(h) y la imagen sin polvo de la Figura 25(b).

En la Figura 25(i) se presenta el resultado de la binarización a la imagen resultante de la resta entre la imagen con polvo de la Figura 25(j) y la imagen sin polvo de la Figura 25(b).

Figura 25. Algunas imágenes resultantes del proceso de binarización



(a)



(b)



(c)



(d)

Fuente: Autores

Figura 25. Algunas imágenes resultantes del proceso de binarización. (continuación)



(e)



(f)



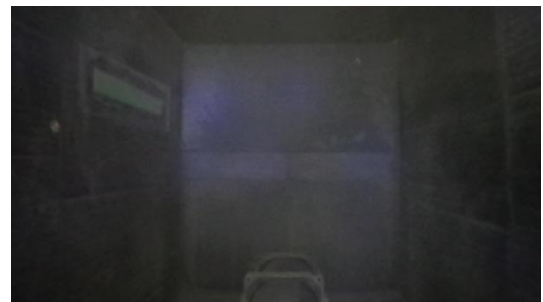
(g)



(h)



(i)



(j)

Fuente: Autores

3.2.5 Identificación del material particulado por medio de cambios entre los modelos de color. Con base en los resultados obtenidos anteriormente se descarta la resta entre imágenes para detectar las variaciones del material particulado y se empieza a trabajar con algunos de los espacios de colores (CMY, YUV, YIQ, HSI y HSB).

De este análisis se percibe que el modelo de color escala de grises y el HSB permiten resaltar el comportamiento y permiten una fácil interpretación para realizar la medición del polvo debido a que estos nos dan la información del brillo de la imagen, el cual, varía según cantidad de polvo presente.

Al realizar una comparación de los resultados obtenidos se observa que la representación en escala de grises supone una ventaja sobre el HSB ya que brinda solo la información que se considera necesaria (brillo). Al realizar la conversión de un sistema RGB a escala de grises se obtiene la información de brillo de la imagen en una sola matriz, mientras que al hacer la conversión RGB a HSB se obtiene la información en una matriz tridimensional de tres capas, en la que cada capa ofrece la información de tono (Hue), saturación (Saturation) y brillo (Brightness); como no se utiliza la información de tono y saturación se considera el tiempo de lectura y escritura que requieren este tipo de matrices y se decide trabajar con el modelo de color escala de grises.

En la Figura 26 se encuentra la imagen con polvo a usar, para mostrar el efecto que ocurre al realizar el cambio de modelo de color.

En la Figura 27 se encuentran las imágenes del modelo RGB en sus tres planos R, G y B.

En la Figura 28 se encuentran las imágenes resultantes del cambio de modelo de color de RGB a escala de grises.

En la Figura 29 se encuentran las imágenes resultantes del cambio de modelo de color de RGB a CMY y sus tres planos por separado C, M, Y.

En la Figura 30 se encuentran las imágenes resultantes del cambio de modelo de color de RGB a HSI y sus tres planos por separado H, S, I.

En la Figura 31 se encuentran las imágenes resultantes del cambio de modelo de color de RGB a HSV y sus tres planos por separado H, S, V.

En la Figura 32 se encuentran las imágenes resultantes del cambio de modelo de color de RGB a YIQ y sus tres planos por separado Y, I, Q.

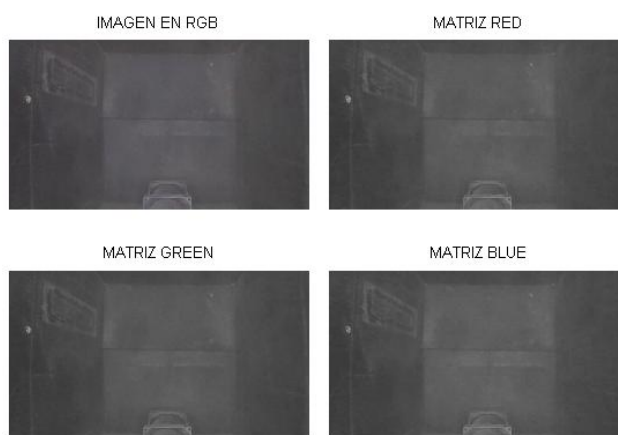
En la Figura 33 se encuentran las imágenes resultantes del cambio de modelo de color de RGB a YUV y sus tres planos por separado Y, U, V.

Figura 26. Imagen original con polvo



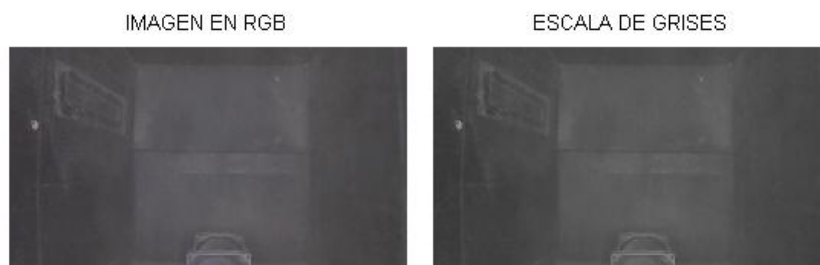
Fuente: Autores

Figura 27. Modelo RGB y sus planos



Fuente: Autores

Figura 28. Modelo de escala de grises



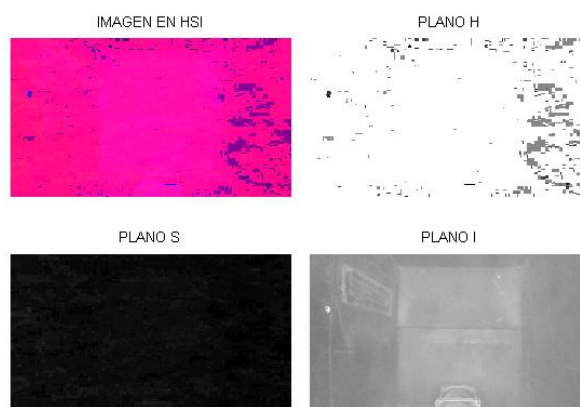
Fuente: Autores

Figura 29. Modelo CMY y sus planos



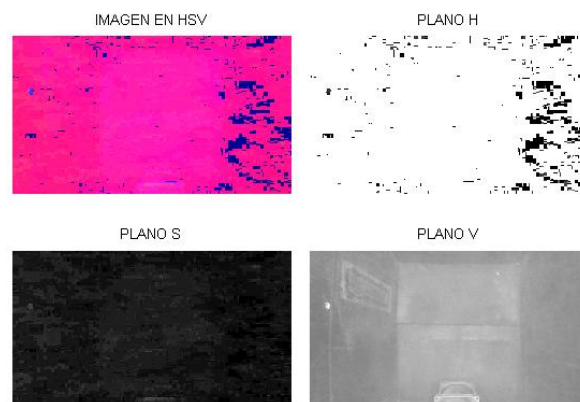
Fuente: Autores

Figura 30. Modelo HSI y sus planos



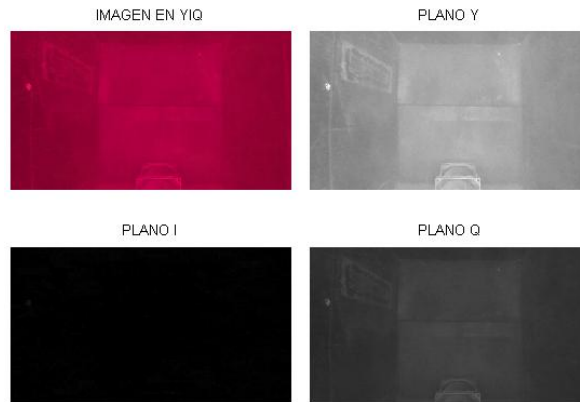
Fuente: Autores

Figura 31. Modelo HSV y sus planos



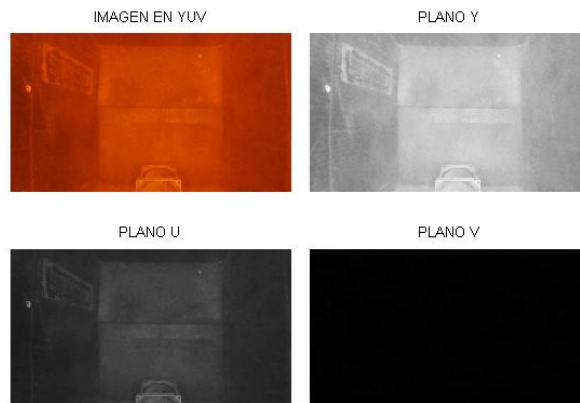
Fuente: Autores

Figura 32. Modelo YIQ y sus planos



Fuente: Autores

Figura 33. Modelo YUV y sus planos



Fuente: Autores

3.2.6 Filtros digitales. Los filtros digitales son comúnmente utilizados en proyectos relacionados al procesamiento de imágenes. En este proyecto se realiza la implementación de los filtros básicos pasa altos y pasa bajos debido a sus características que permiten realizar suavizados y detectar bordes.

Tras efectuar el proceso de filtrado en varias imágenes con material particulado se concluye que estos no aportan información que nos sea de gran utilidad debido a que el polvo produce un efecto de difuminación.

Las máscaras usadas en estos filtros son las matrices 5x5 que se muestran a continuación:

Mascara Filtro Pasa Bajos

$$\frac{1}{25} * \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}$$

Mascara Filtro Pasa Altos

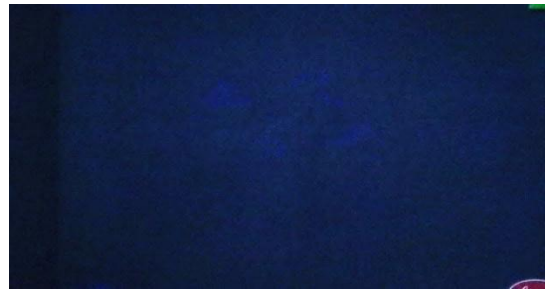
$$\frac{1}{32} * \begin{bmatrix} -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \\ -1 & -2 & -2 & -2 & -1 \\ -1 & -2 & 32 & -2 & -1 \\ -1 & -2 & -2 & -2 & -1 \\ -1 & -1 & -1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

En la Figura 34 se muestra un ejemplo de los ligeros cambios visuales que significa la aplicación de estos filtros en una imagen contaminada con material particulado de carbón.

Figura 34. Filtros digitales (a) y (b) Imágenes originales – Frame 5692 y Frame 47689 respectivamente, (c) y (d) Imágenes resultantes de aplicar filtro pasa bajos, (e) y (f) Imágenes resultantes de aplicar filtros pasa altos.



(a)



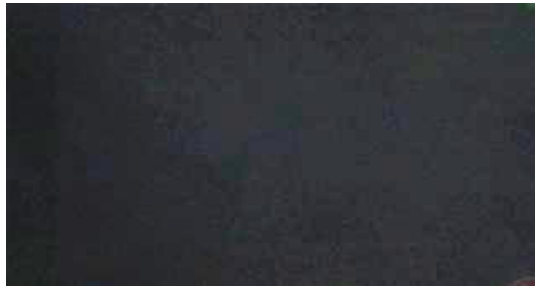
(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

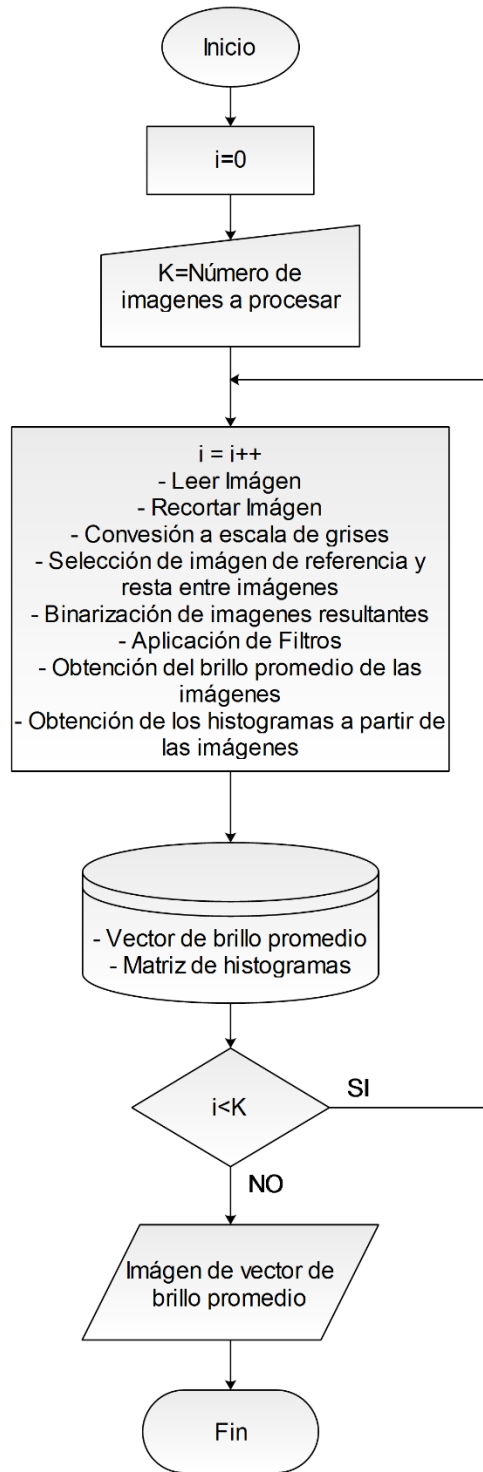
Fuente: Autores

3.2.7 Algoritmo 1. El primer código desarrollado se encarga de leer las imágenes, recortarlas, cambiar la forma de representación de las imágenes a escala de grises, restar las imágenes entre sí, binarizar las imágenes obtenidas como resultado de las restas entre imágenes, aplicar filtros para observar los efectos que tienen sobre la información contenida en las imágenes, obtener el promedio del brillo de las imágenes, generar y guardar los histogramas por cada imagen, y analizar si la cámara detecta algún cambio de brillo entre frames consecutivos del video.

Del desarrollo de este algoritmo se obtiene una imagen por cada resta efectuada, una imagen en representación de cada histograma y la generación de varios archivos de imagen por cada frame, es decir una imagen por cada modelo de color para la representación de imágenes; esto con el propósito de analizar visualmente la información que nos brinda cada fotograma y poderla relacionar con el material particulado. Con el fin de dar una explicación más clara de lo realizado para este algoritmo, se ha generado el diagrama de flujo que aparece en la Figura 35.

El desarrollo del segundo algoritmo se obtiene tras analizar la información obtenida mediante el primer código, a partir del cual, se observa que la información que nos brindan los histogramas y la media de brillo de las imágenes nos sirven para modelar el comportamiento en el tiempo del material particulado al interior del prototipo, y permiten establecer un margen en el que se pueden encontrar las imágenes que solo tienen la información de la escena contaminada por el ruido digital.

Figura 35. Diagrama de flujo usado para la generación del primer código con las imágenes tomadas en el primer prototipo y MATLAB r2009a



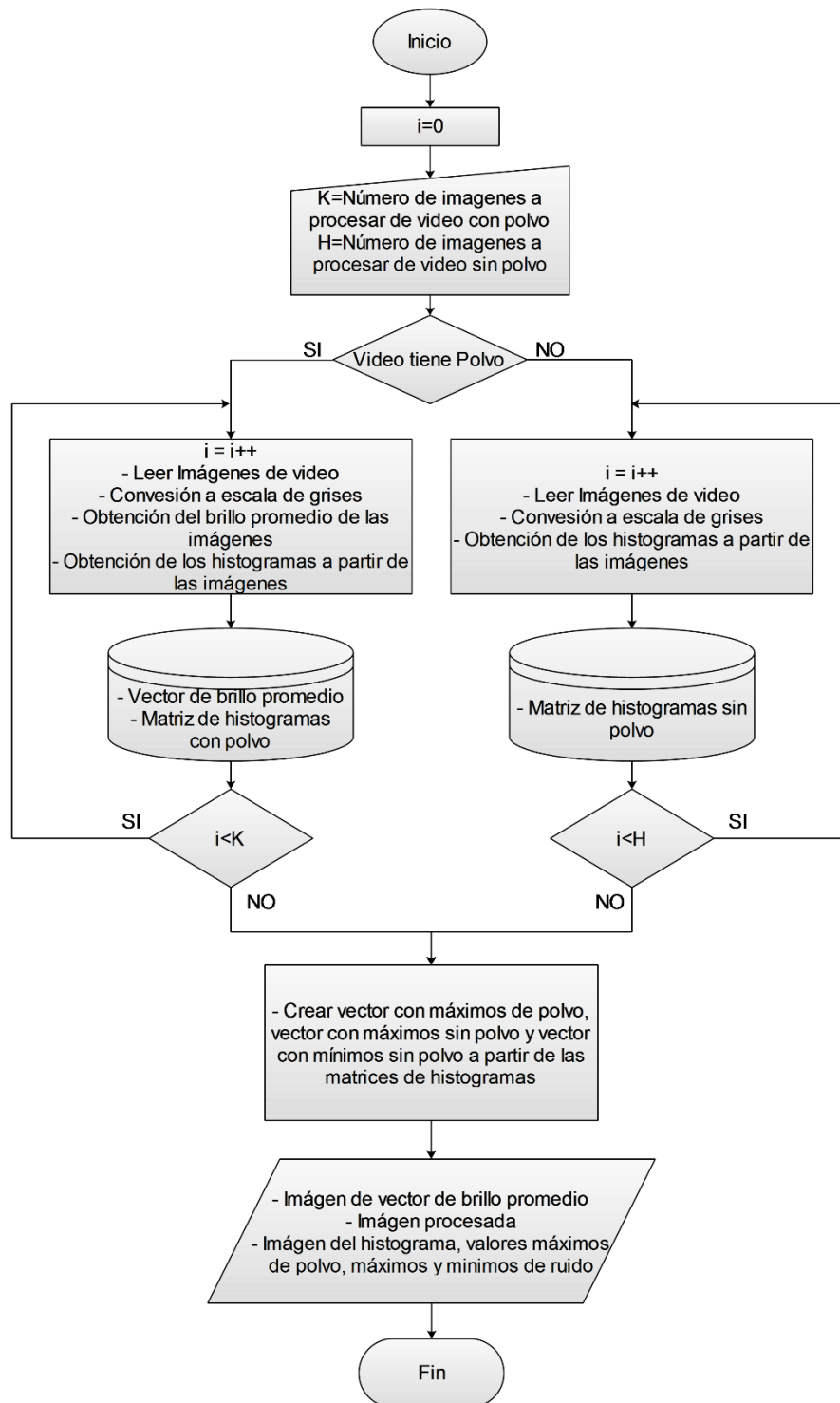
Fuente: Autores

3.2.8 Algoritmo 2: El diagrama de flujo del segundo código desarrollado se expone en la Figura 36, este describe el procedimiento y operaciones que realiza en búsqueda de la detección del material particulado teniendo en cuenta los problemas detectados con el algoritmo 1.

El segundo código en gran parte consiste en leer un archivo de imagen previamente generado con un software alternativo ("Free Video to JPG Converter"), extraer la información del brillo de las imágenes, generar y guardar un vector con esta información, generar una matriz a partir de un vídeo sin material particulado, almacenando la información de los histogramas de las imágenes trabajadas en cada fila con el fin de establecer los niveles máximos y mínimos en los que pueden estar variando los histogramas por causa del ruido inherente a las condiciones de trabajo, generar una segunda matriz a partir de los histogramas de las imágenes de un segundo vídeo en donde exista la presencia del material particulado con el propósito de establecer los niveles máximos que se puede presentar con respecto a la concentración del material, y finalmente guardar una imagen por cada fotograma procesado, creando una imagen con el histograma de la imagen actual, los valores máximos de concentración del material, y los valores máximos y mínimos del ruido.

Del trabajo con este algoritmo se concluye que es útil reducir la cantidad de imágenes guardadas en el disco duro ya que permite reducir el tiempo de ejecución del código y se evalúa la posibilidad de no generar ninguna imagen durante el procesado, debido al tiempo que implica el tener acceso a la escritura en el disco y la gran cantidad de veces que se requiere hacer esto.

Figura 36. Diagrama de flujo usado para la generación del segundo código con las imágenes tomadas en el segundo prototipo y MATLAB r2009a



Fuente: Autores

3.2.9 Algoritmo 3. Para la explicación de este algoritmo se propone el diagrama de flujo que se encuentra en la Figura 37, en el cual se describe el procedimiento y operaciones a realizar en búsqueda de la detección del material particulado.

Debido a la dificultad que implica el tener tantos archivos de imagen en el computador y la significativa cantidad de veces que se debe recurrir a la lectura del disco duro, se recurre a un nuevo software alternativo (aTube Catcher) que nos permita cambiar el formato al vídeo teniendo en cuenta los formatos permitidos por MATLAB R2009a (AVI).

Durante el desarrollo de las pruebas realizadas, se observan algunos problemas relacionados con el cambio de formato de video (véase sección 5.2.11 para más detalles), lo que nos induce a buscar alguna herramienta que nos permita trabajar con los videos en MP4 directamente.

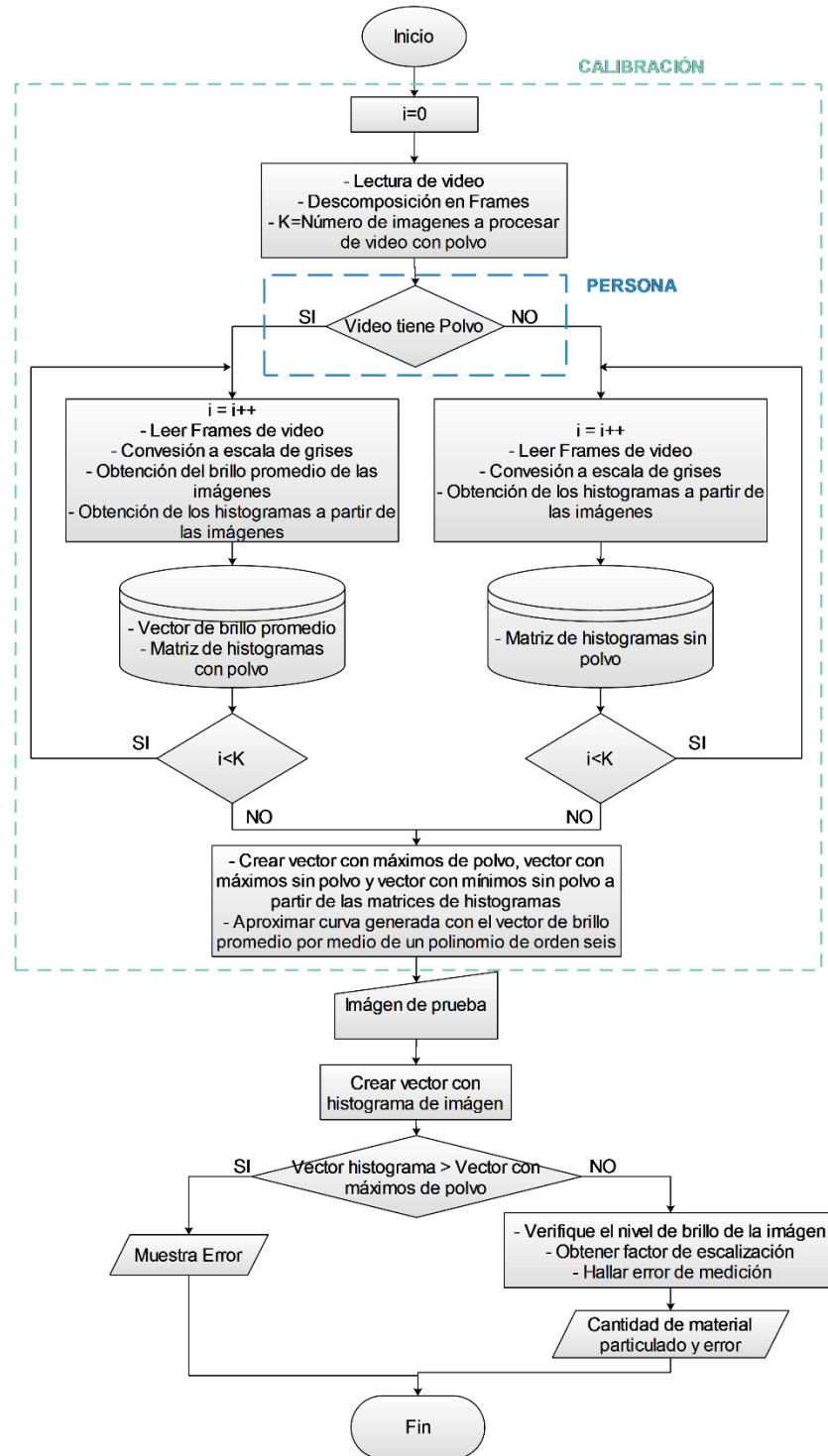
Dentro de los cambios más notables de este algoritmo se tiene que todo el proceso se lleva a cabo por medio de la versión de MATLAB R2014a, la cual permite realizar la lectura de los frames del video en formato MP4 sin necesidad de recurrir al uso de programas adicionales.

Otra de las diferencias en este algoritmo es que no se genera ni se guarda imagen alguna, todos los valores que se consideraron necesarios fueron guardados en matrices y vectores de tal forma que las veces que se accedió a leer y escribir en el disco duro fue reducido.

Éste algoritmo integra los algoritmos uno y dos de manera que es posible realizar la lectura del vídeo directamente en formato MP4. Una vez cargado el vídeo en memoria se descompone en fotogramas o frames, a estos frames se les realiza un cambio de modelo de color (RGB-Escala de Grises) y se almacena en un vector la información del brillo, se obtiene el factor de escalización a partir del vector construido con el brillo medio de las imágenes, se construye una matriz donde cada fila contiene los valores de los histogramas por cada imagen y se obtienen vectores que contienen los niveles mínimo y máximo de ruido al igual que las máximas variaciones del material particulado; adicionalmente, se obtiene una curva aproximada por un polinomio de orden seis con la que se determina el porcentaje de error de la medición del polvillo de carbón presente en el ambiente.

Finalmente, se logra obtener resultados importantes en cuanto a la detección del material particulado al interior del prototipo y el margen de error correspondiente a este. Estos logros se explican detalladamente más adelante en la sección 5.2.11.

Figura 37. Diagrama de flujo usado para la generación del cuarto código con las imágenes tomadas en el segundo prototipo y MATLAB r2014a

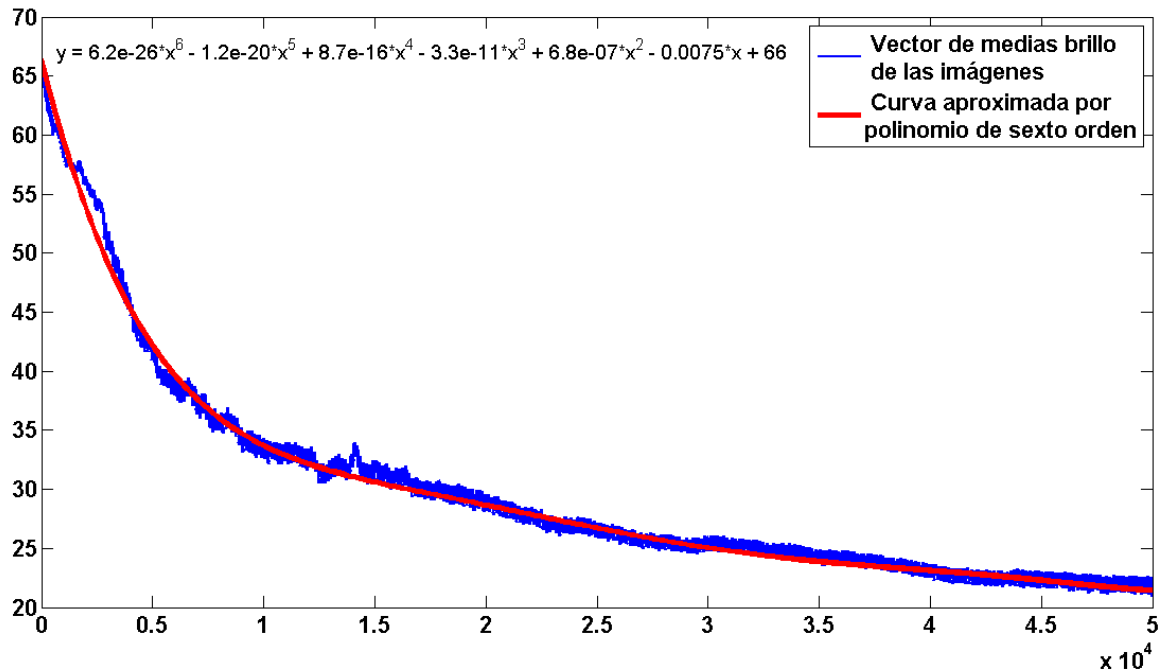


Fuente: Autores.

3.2.9.1 Cantidad de Polvo, Aproximación de curvas y Error de medición. Tras el análisis de cada uno de los Frames en los que es descompuesto el video tomado al interior del prototipo 2 mientras la cantidad de polvo se asienta, se obtiene la curva color azul oscuro que puede ser observada en la Figura 38, la cual, representa los valores máximos de brillo y por lo tanto también del polvo presente en cada instante de tiempo durante el desarrollo de cada una de las pruebas. A esta curva obtenida se le realiza una aproximación mediante un polinomio de grado seis a través de la herramienta “Basic Fitting Tool” de MATLAB, aproximación que se encuentra representada por medio de la curva de color rojo en la Figura 38 y es usada posteriormente para determinar el error que tendrá el resultado de la medición de la cantidad de polvo suspendido en el aire al interior del prototipo.

Con base en los valores obtenidos de las curvas presentes en la Figura 38 se establece que el valor máximo de polvo que puede llegar a ser medido en cada uno de los Frames del video (100% de contaminación) es la cantidad de polvo usado en miligramos al interior del prototipo, medido previamente con ayuda de una miligramera

Figura 38. Curva de máximo brillo registrado por Frame de un video y su correspondiente aproximación polinómica de sexto grado.

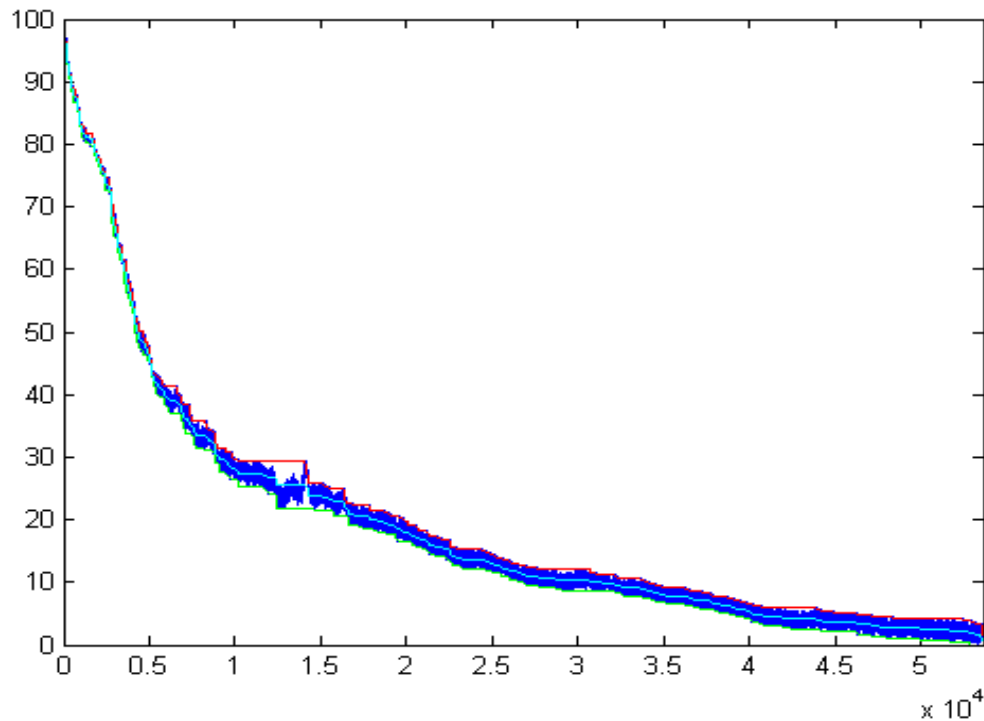


Fuente: Autores

El error aproximado correspondiente a la medición de la cantidad de polvo presente en el aire es del 10% y es obtenido luego de determinar las curvas de color verde y rojo que envuelven a las curvas del máximo brillo por Frame de color azul oscuro y brillo promedio de color cian presentes en la Figura 39. Las curvas color verde y rojo presentes en la Figura 39, aportan una idea superficial del error aproximado a observar en los resultados que entrega el GUI. El error aproximado se calcula por medio de la Ecuación 2 teniendo en cuenta la curva de brillo por Frame (valores reales) y su correspondiente curva aproximada por un polinomio de sexto orden (valores teóricos). El resultado de realizar la diferencia entre los valores teóricos y reales se muestra en la Figura 40.

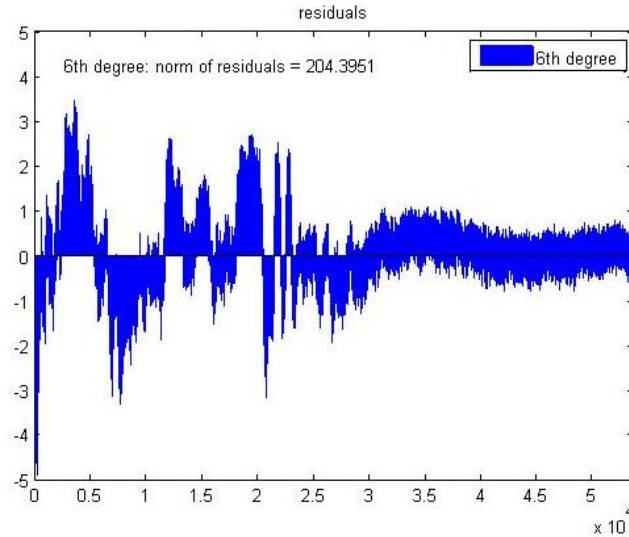
$$Error(\%) = \frac{Valor\ teorico - Valor\ real}{Valor\ teorico} * 100 \quad \text{Ecuación (2)}$$

Figura 39. Curva de máximo brillo registrado por Frame de un video, curva promedio y error aproximado



Fuente: Autores

Figura 40. Resultado de la diferencia entre la curva de máximo brillo por Frame de un video y su correspondiente curva aproximada por polinomio de sexto orden



Fuente: Autores

3.2.10 GUIDE. Una vez establecida la forma en cómo se van a analizar las imágenes y los parámetros de los archivos a utilizar durante las mediciones, se procede a la elaboración de un GUIDE (Graphical User Interface Development Enviroment) en MatLab, el cual permite ensamblar los diferentes códigos elaborados para mostrar de una manera más sencilla las alertas de los niveles excesivos del material particulado.

Como primer paso se establecen los objetos, con los que va a contar la interfaz (botones, campos de texto, ejes gráficos, etc.) y las acciones que van a ejecutar.

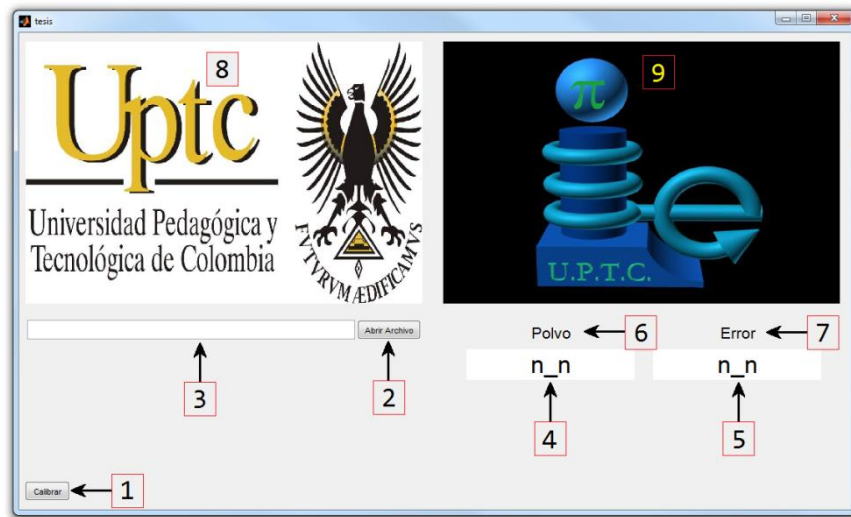
Como objetivos en el diseño de la interfaz se establece que ésta debe poseer las siguientes características:

- Calibración del sensor para una medida correcta del material particulado.
- Un nivel de seguridad que restrinja el proceso de calibración del sensor.
- La medición del porcentaje de polvo al ingresar un archivo el cual puede ser una imagen (jpg) o un vídeo (mp4).

- Observar la dirección del archivo en disco que provea la escena a la cual se le hará la medición del material particulado.
- Observar la imagen actualmente usada en el proceso de medición del polvo presente en la escena.
- Visualizar el porcentaje de la cantidad de polvo presente en la imagen.
- Observar un historial de la cantidad de polvo medido en las imágenes.
- Un sistema que alerte en caso de presentarse concentraciones excesivas de material particulado.

Una vez hecho un bosquejo de lo que se quiere mostrar en pantalla se procede a realizar un estudio de los objetos con los que cuenta el GUIDE. Se seleccionan para la pantalla principal dos Push Button (1, 2), tres Edit Text (2, 3, 5), dos Static Text (6, 7), y finalmente dos axis (8, 9); ejemplo de esto se puede observar en la Figura 41.

Figura 41. Partes de la pantalla principal del GUI.



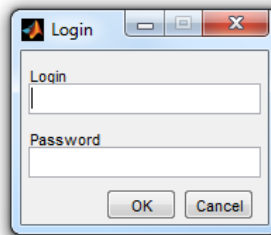
Fuente: Autores.

El Push Button Calibrar (1), es el que nos permite realizar una calibración del sistema para que independientemente a las condiciones de la escena a la que se le hagan las mediciones de la cantidad de material particulado en el aire, el programa nos entregue una medida correcta.

Dado a que realizar una calibración incorrecta puede significar una medida errónea, se protege mediante la validación de un usuario y contraseña el acceso al cambio de los parámetros de medición. En la Figura 42 se puede observar la ventana que se abre al presionar el botón Calibrar.

Una vez validados el usuario y contraseña se continúa con el proceso de calibración el cual se lleva a cabo por medio de un vídeo con formato mp4; éste debe ser un vídeo en donde se presente una escena con la máxima cantidad de polvo y una escena sin polvo, o un vídeo, en el que solo se presente la escena sin polvo.

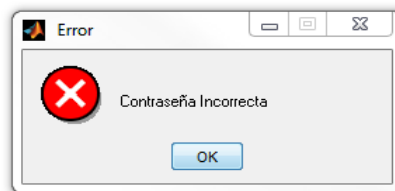
Figura 42: Ventana de validación de Administrador.



Fuente: Autores.

En el caso, de que los datos de validación sean erróneos aparece un cuadro de dialogo de error semejante al de la Figura 43 y no se permite la modificación de ningún dato.

Figura 43: Ventana de error en la validacion de usuario.



Fuente: Autores

La principal ventaja que tiene la calibración del vídeo en donde solo se presenta la escena sin polvo es la velocidad de calibración, esto se debe a que por lo general estos vídeos tienen duraciones de hasta segundos; la información que se obtiene de estos vídeos son el rango en el que se encuentra el ruido inherente a las condiciones de trabajo. Su desventaja se centra en que al no obtener información del comportamiento del polvo en la escena, no se puede ofrecer información del error que se puede presentar en la medida.

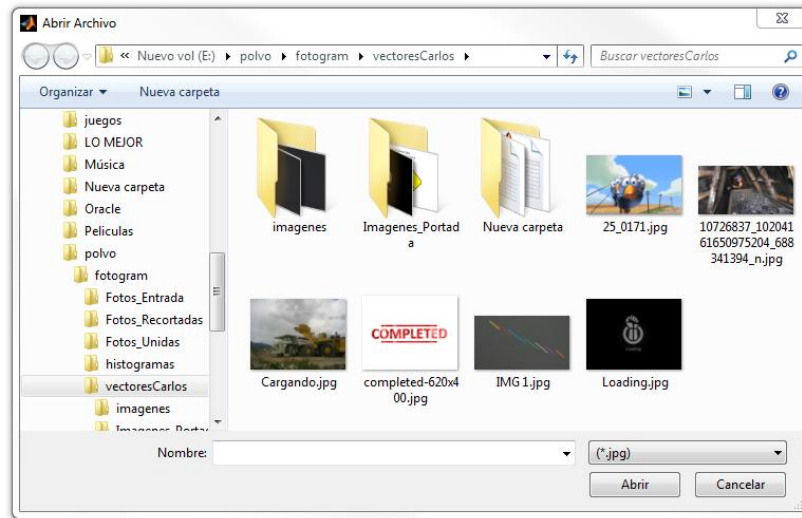
El vídeo en donde se presenta la escena con la máxima cantidad de material particulado suspendido en el aire y sin éste, posee la ventaja de que se puede establecer un porcentaje de error en la medida; su desventaja es el tiempo que conlleva realizar la calibración, ya que estos vídeos por lo general tienen una duración aproximada de 30 minutos, debido a que ese es el tiempo que tiende a durar la decantación de todo el material en las condiciones con las que se realiza éste trabajo.

Al empezar el proceso de calibración, la interfaz muestra una imagen en (8) (véase Figura 41) que indica que ha empezado el proceso de calibración; igualmente, al terminar el proceso de calibración la interfaz mostrará una imagen en (8) que indicará que el proceso de calibración ha concluido; posteriormente, la interfaz estará lista para importar un archivo al que se le desee evaluar la cantidad de material particulado.

Para cargar el archivo de imagen que se desea examinar, se hace clic en el botón Push Buton y luego en abrir Archivo (2) (véase Figura 41) el cual abre una ventana similar a la que se muestra en la Figura 44 que nos permite buscar el archivo en el ordenador. Al seleccionar el archivo deseado, nos aparecerá la dirección del archivo en Edit Text (3) (véase Figura 41) y la imagen o conjunto de imágenes aparecerán secuencialmente, en axes (8) (véase Figura 41), aquí se restringen los formatos de imágenes a jpg y formatos de vídeo a mp4.

Lo primero que se evalúa en las imágenes es verificar si ésta contiene información del material suspendido o si por el contrario solo presenta ruido. Al verificar que la imagen contiene información del material particulado se comprueba mediante un filtro que la imagen no presente objetos externos a la escena original, y posteriormente, se hace una comparación con los valores calibrados de las cantidades de polvo. En la Figura 41 se muestra la cantidad de polvo por medio de (4), su margen de error en (5), mediante puntos sucesivos correspondientes al brillo en (9) se va construyendo un historial de las imágenes examinadas, en (6) se muestra en términos de porcentaje la cantidad de material particulado presente en la imagen actual, y finalmente, el porcentaje de error máximo que se presenta en la calibración por medio de (7). Estos datos son solo para que el usuario interprete adecuadamente los datos de cantidad de polvo que presenta la escena de la imagen.

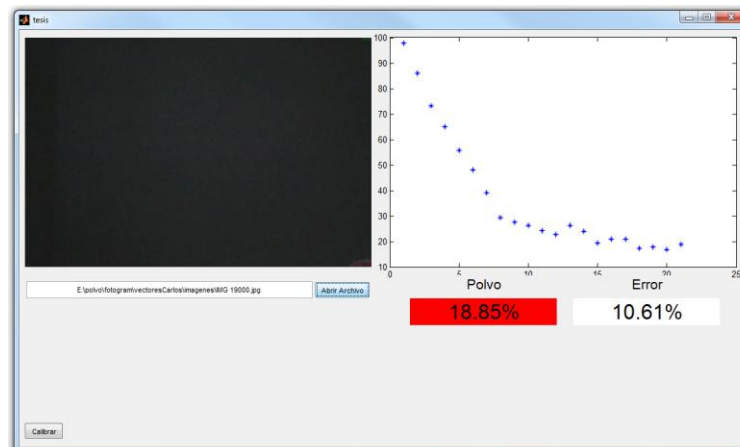
Figura 44: Ventana para seleccionar los archivos de interés.



Fuente: Autores.

En la Figura 45 se puede observar el historial de algunas imágenes a las que se les ha hecho el análisis de polvo, además se muestra la imagen actual, el porcentaje de polvo obtenido y el porcentaje de error máximo del vídeo de calibración. Además se nota que el porcentaje de polvo presente en la escena se encuentra resaltado en rojo, lo que indica un nivel crítico de polvo presente, éste porcentaje puede verse resaltado también en amarillo y verde, lo que nos indica que el porcentaje de polvo puede ser peligroso o estar dentro de los parámetros, en que la cantidad considera segura, en la parte derecha se observa el historial de las imágenes examinadas.

Figura 45: Interfaz en funcionamiento.



Fuente: Autores.

3.2.11 Ejecución de instrucciones y ciclos máquina. A lo largo del proyecto se desarrollan diversos algoritmos con el objetivo de generar un único algoritmo que permita detectar la cantidad de material particulado suspendido en el aire, que incluya una interfaz gráfica, y realice el procesamiento necesario haciendo uso del menor tiempo posible.

Como punto de referencia en cuanto a la reducción del tiempo de ejecución del código, tenemos que entre el primer y segundo algoritmo generados los cuales consistían básicamente en la lectura, etiquetado, recorte, generación de histogramas de las 53648 imágenes, la generación del grafico del comportamiento del brillo durante todo el proceso y desarrollo de las pruebas individuales de uso de filtros, cambio del modelo de color, binarización, etc. El número de ciclos de maquina ejecutados por este código fue de 88438×10^9 .

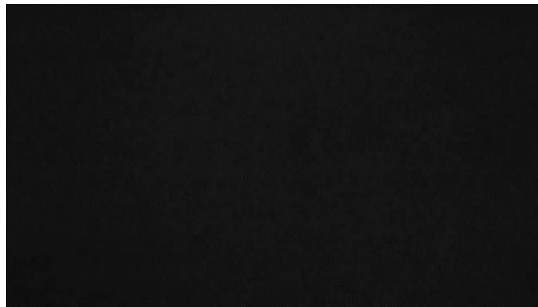
Dado que el tiempo de procesado es excesivo por la cantidad de veces que el procesador debe acceder al disco duro durante la lectura y escritura de las imágenes se ve la necesidad de optimizar el código, de tal manera que represente un menor tiempo de ejecución del código, por lo que se descarta la generación de imágenes, logrando reducir el tiempo de ejecución del código a 64800×10^9 ciclos de máquina.

Aunque al realizar la ejecución del tercer algoritmo con el video convertido mediante el software “aTube Catcher” a formato AVI o MPEG1 reduce notoriamente el tiempo de procesamiento, tras realizar repetidas pruebas se observa la aparición de errores inesperados en la conversión del video que afectan el procesamiento realizado, en búsqueda de la detección del polvo.

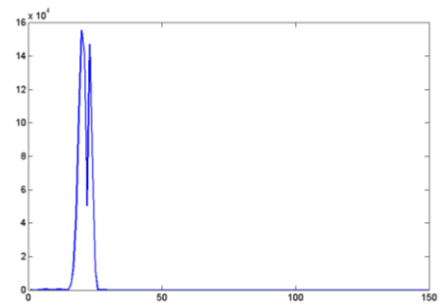
Algunos ejemplos de los problemas observados tras realizar el cambio del formato de video y posterior análisis se encuentran en la Figura 46, en los que se evidencia que el cambio de formato con el software “aTube Catcher” puede llegar a generar la modificación o perdida de la información contenida en algunas secciones del video; pero que no llegan a ser fácilmente percibidas por el ojo humano.

Finalmente, se opta por recurrir al uso de la versión de MATLAB r2014a para el desarrollo y ejecución de los algoritmos 3 y 4, ya que esta versión permite realizar la lectura de videos directamente, en formato MP4. Con esta elección e implementación de estos últimos algoritmos se consigue una notoria reducción en el tiempo de procesamiento, ya que el procesamiento y análisis de la misma información tarda aproximadamente, 8400×10^9 ciclos de máquina.

Figura 46. Daños observados tras realizar el cambio de formato con aTube Catcher



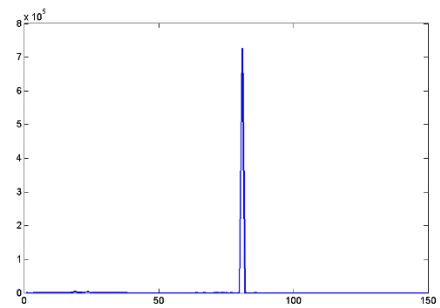
(a) Frame 733 de video convertido



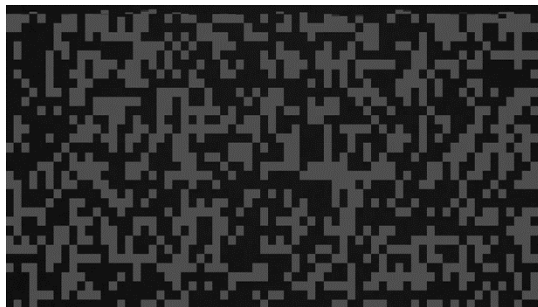
(b) Histograma del frame 733



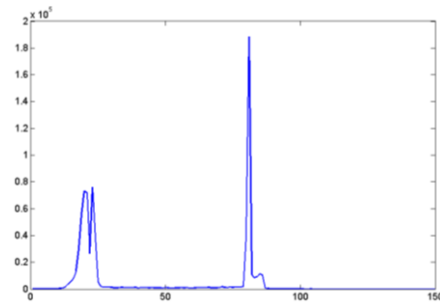
(c) Frame 734 de video convertido



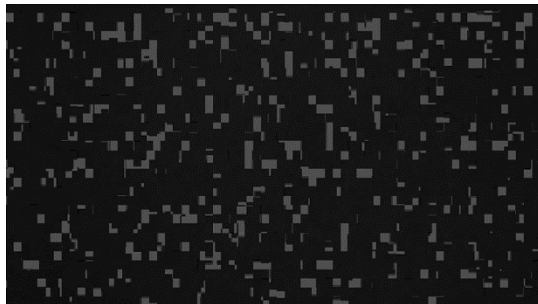
(d) Histograma del frame 734



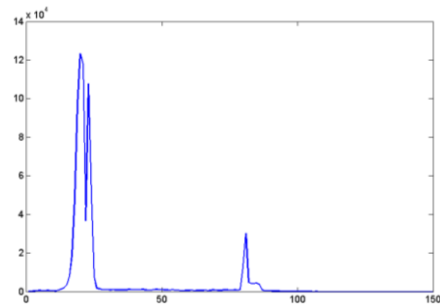
(e) Frame 735 de video convertido



(f) Histograma del frame 735



(g) Frame 736 de video convertido



(h) Histograma del frame 736

Fuente: Autores

4. CONCLUSIONES

El diseño, iluminación interior, sistema de dispersión del material particulado, ubicación de la cámara y alisado interno del prototipo, evitan realizar trabajos adicionales e innecesarios durante el procesamiento digital de las imágenes capturadas, facilitando la detección del material particulado suspendido en el aire y la obtención de resultados que puedan contribuir al desarrollo de futuros trabajos enfocados a mejorar la calidad de vida de los trabajadores expuestos a este tipo de contaminación.

Las oleadas o turbulencias de polvo que se presentan dentro del prototipo afectan notablemente la medida del material particulado debido a que la cámara escogida en modo de vídeo detecta y enfoca esas oleadas, y no permite optimizar la exposición para que el área de medición incluya toda la escena.

Para descartar el ruido inherente de las imágenes mediante la técnica de binarización se encontró un umbral del nivel de ruido para descartar los píxeles que se presentan por debajo de éste. Este método resulta poco efectivo debido a que los valores de los píxeles de las imágenes capturadas que presentan una cantidad muy pequeña de material particulado suspendido en el aire, se encuentran por debajo de este umbral.

La resta entre imágenes que comúnmente es usada para la detección de movimiento resulta útil para determinar la presencia de material particulado suspendido en el aire en lugar de la cantidad de material, debido a que la forma de dispersión y comportamiento que tiene el material particulado dentro del prototipo es caótico.

El mismo tipo de material particulado suspendido en el aire a diferentes distancias del lente de la cámara presenta tonalidades que difieren entre ellas, lo que corresponde a variaciones en la medición de la cantidad del material particulado y que pueden llegar a ser tomadas como mediciones erróneas.

5. RECOMENDACIONES

Adquirir equipos para el procesamiento de imágenes que sean compatibles con los ya existentes o equipos completos que sean independientes, y que no necesiten adaptaciones caseras que pueden suponer errores en la etapa de adquisición de las imágenes.

Adquirir una cámara de vídeo que enfoque toda la escena (enfoque múltiple) y que permita ajustar la cantidad de luz que recibe el sensor para formar una imagen, con el fin de optimizar la medición del material particulado.

Adquirir uno de los Nano-recubrimientos químicos para superficies ya existentes, ya que estos generan un efecto hidrofóbico y oleofóbico sobre las superficies evitando que partículas contaminantes se adhieran menos a las superficies (grasa, petróleo, polvo y cal).

6. TRABAJOS A FUTURO

Optimizar las medidas con una cámara de vídeo que enfoque toda la escena (enfoco múltiple) y que permita ajustar la exposición (cantidad de luz suficiente que recibe el sensor para formar una imagen).

Analizar de una manera más precisa el material particulado en suspensión en un ambiente de baja iluminación con videos que sean tomados a más de 30FPS, haciendo uso de cámaras que trabajen en diferentes regiones del espectro electromagnético.

Realizar un patronamiento de las medidas obtenidas mediante la comparación con aquellas que son entregadas por uno de los equipos de medición certificados ya existentes en el mercado.

Realizar una adaptación del algoritmo actual para realizar la detección de la cantidad de material particulado suspendido en el aire por medio del análisis de un vídeo en línea.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Restrepo Echeverri Daniel, and Builes Rios Sergio Hernan, "Detección y control De atmósferas explosivas en minas subterráneas De carbón usanDo programación estructurada," *Revista Educación en Ingeniería*, vol. 7, pp. 10-21, 2012.
- [2] Pejic Lilianan Medic, Torrent Querol Enrique, and Madariaga Garcia José, "Un nuevo método para la evaluación del riesgo de explosión en minería subterránea," *Industria y minería*, pp. 13-24, 2012.
- [3] Scandoleira Cesar Fernando, and Falla Hidalgo Renaldo, "Metodología innovadora para la determinación de material particulado en suspensión y sus aplicaciones en la industria minera," *Revista del Instituto de Investigación de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica*, vol. 12, pp. 7-11, 2012.
- [4] Huang Zhian, Zhang Yinghua, Gong Jianhua, and Gao Yukun, "Research on light sensor controllable onboard spraying dust-removal technology in fully-mechanized coal face," in *Image and Signal Processing (CISP), 2010 3rd International Congress on*, 2010, pp. 4126-4129.
- [5] Baquero Blandon Kelly, and Molina Jorge, "Análisis de los factores que influyen en la explosividad del polvo de carbón en las minas subterráneas," *Revista Ingeniería y Competitividad*, vol. 14, pp. 147-160, 2013.
- [6] Domínguez Fernandez Juan José, "El tiempo de trabajo y su incidencia en la seguridad y salud laborales en la minería del carbón," *Revista jurídica de Castilla y León*, pp. 4-33, 2012.
- [7] Andrade Jaramillo Veronica and Gómez Ingrid Carolina, "Salud laboral investigaciones realizadas en Colombia," *Pensamiento psicológico*, vol. 4, 2013.
- [8] Ospina Juan Manuel, Manrique Garzon Fred Gustavo, and Guio José Alfredo, "Salud y trabajo: minería artesanal del carbón en Paipa, Colombia Health and work: Artisanal coal mining in Paipa (Province of Boyacá), Colombia Saúde e trabalho: mineração artesanal," *Avances en Enfermería*, vol. 28, 2010.
- [9] Ospina Juan Manuel, González Nubia, and Fernández Lady, "Evidencia temprana de alteración funcional por exposición respiratoria: minería artesanal del carbón en Paipa, Colombia," *Rev. Fac. Nac. Salud Pública*, vol. 29, pp. 445-453, 2012.
- [10] Quiroz Arcentales Leonardo, L. J. Hernández-Flórez, C. A. A. Calderón, K. Medina, R. Robledo-Martínez, and S. D. Osorio-García, "Enfermedad y síntomas respiratorios en niños de cinco municipios carboníferos del Cesar, Colombia," *Rev. salud pública*, vol. 15, pp. 66-79, 2013.
- [11] Arciniegas Suarez Cesar Augusto, "Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM10," *revista. luna. azul*, vol. 34, pp. 195-213, 2012.
- [12] Caceres Hernandez José Manuel. 1962, Principales métodos utilizados para la medida de la concentración del polvo y su peligrosidad en los lugares de trabajo. 1, 10. Available: <http://boletines.secv.es/upload/20120210111948.196201361.pdf>
- [13] Villegas Bernal Natalia and Vásquez Sara, "Impacto de la ley del carbón en la salud de los mineros americanos.(Impact of the coal act on the health of american miners)|

- Impacto da lei de carvão na saúde de mineração americana," *Revista CES Salud Pública*, vol. 4, pp. 106-110, 2014.
- [14] Castañeda Roman, "Coherencia espacial de la luz en el espacio-fase: procedimientos no-paraxiales e implicaciones físicas", *Revista de la Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, vol. 37, pp. 37-59, 2013.
 - [15] Cachón Guillén Vladimir, "Las analogías en la formulación de la teoría electromagnética de la luz de Maxwell," *En-claves del pensamiento*, vol. 7, pp. 11-33, 2013.
 - [16] Ramirez López Jesús, "El método BioAlberic: origen, desarrollo y aplicación en el control de los factores de riesgo cardiovascular," *CorSalud*, vol. 5, pp. 150-154, 2013.
 - [17] Vélez Serrano José, A. Moreno Díaz, Á. Sánchez Calle, and J. Esteban Sánchez-Marín, "Visión por computador," *Recuperado el*, vol. 16, 2003.
 - [18] Pérez Maria, Jiménez Ebrahimzadeh, M. Verdejo, L. Chaves, and M. Lao, "Propuesta de una metodología para la determinación del color del tejido vegetal."
 - [19] Byatt Antonny Sturm, "Reflexionando sobre el color."
 - [20] Mejía Pedro Alejandro, Pilar Catellanos Norma. Ábrego, M. M. M. González, A. C. Orea, and J. L. J. Pérez, "Aplicaciones biofísicas de la fotoacústica," 2012.
 - [21] Sanz Peñahora Maria, "Iluminación en el puesto de trabajo. criterios para su evaluación y acondicionamiento," ed: Madrid, Ediciones INSHT, Año, 2011.
 - [22] Froner Barbara, Purves Stephen, J. Lowell, and J. Henderson, "Percepción de la información visual: el papel del color en la interpretación sísmica," *First Break*, vol. 31, 2013.
 - [23] Zuccarello Pedro Diego, "Development and implementation of a selective change-driven vision sensor for high speed movement analysis," 2013.
 - [24] Lezama León Evangelina, "Datos" 2011.
 - [25] Ponce González Mónico, "Visión por computador para UAS," 2012.
 - [26] García Asencio and Bartolomé José, "Herramienta en Matlab para seguimiento de patrones en secuencias de vídeo," 2012.
 - [27] Laorden Fiter Eduardo, "Descripción, comparación y ejemplos de uso de las funciones de la toolbox de procesamiento digital de imágenes de MATLAB®," 2012.
 - [28] J.-s. Zhang, S.-l. Niu, Y. Li, and Y.-g. Zhao, "Spray Dust Removal Device Based on the Image Contrast," in *Computer Distributed Control and Intelligent Environmental Monitoring (CDCIEM), 2012 International Conference on*, 2012, pp. 638-641.
 - [29] Zheng Wanng and M. Xianmin, "Fractional-Order Differentiate Adaptive Algorithm for Identifying Coal Dust Image Denoising," in *Computer, Consumer and Control (IS3C), 2014 International Symposium on*, 2014, pp. 638-641.
 - [30] Rodriguez Ramón Osvaldo and Donato Vallin González, "Transformada de Fourier en aplicación en el diseño de filtros digitales para el procesamiento de imágenes."
 - [31] Alba Mancebo Pérez, "Desarrollo de una interfaz gráfica en Matlab para la aplicación de detección de humos mediante procesamiento digital de imágenes," 2013.

- [32] Martínez Juan and Bedoya Carol, "Un Nuevo Modelo Basado en Funciones Exponenciales para un Sistema de Levitación Magnética Uniaxial," *Revista Facultad de Ingeniería*, pp. 63-75, 2013.
- [33] Yiang Zhang, "Face Detection Based on Color Model and Grayscale Value Distribution," *Advanced Materials Research*, vol. 341, pp. 535-539, 2012.
- [34] Veloz Nicolas Savino, "Control de vibraciones mecanicas en un sistema interferometrico" 2012.
- [35] Rica Roberto Gutiérrez, " Crossing barriers in planetesimal formation: The growth of mm-dust aggregates with large constituent grains " 2010.
- [36] Llobregat Rubio Ruben, "Procesado digital de imágenes de video para la detección de humo," 2011.
- [37] Sucar L. Enrique and Gómez Giovanni, "Visión Computacional," *Instituto Nacional de Astrofísica, Óptica y Electrónica, Puebla, México*, 2011.
- [38] In *Recomendaciones para la digitalización de documentos en los Archivos*, A. d. C. y. León, Ed., 4 ed. Valladolid, p. 51.
- [39] Molina Bernardo and Molina Bolaño Tomás, "Esteganografía—El arte de transmitir información inadvertidamente," *Generación Digital*, 2011.
- [40] Muñoz Guamán Walter and Randall Ingram Benjamin, "Implementación y evaluación de tres técnicas de marca de agua en imágenes digitales," 2011.
- [41] Ménguez Díaz Daniel, "Manual de fotografía fácil Corrección," 2014.
- [42] Arreola Nava, Nava Conejo, Zepeda Bovino, I. T. Torres, B. S. García, and M. T. Martínez, "Estudio de la curva de crecimiento de fetos bovinos usando mediciones por ultrasonido," *Revista Biológicas*, vol. 13, pp. 53-57, 2013.
- [43] Quijije Mejía Pablo and Sanjines Flores, "Análisis de compresion y descompresion de imagenes en escala de grises usando la transformada wavelet y sus ventajas con respecto a la transformada de fourier," 2010.
- [44] Reina Jhovana and Olaya Javier, "Ajuste de curvas mediante métodos no paramétricos para estudiar el comportamiento de contaminación del aire por material particulado PM10," 2013.
- [45] Fernández Morales Antonio, "Estimación de índices de desigualdad y pobreza a través del ajuste econométrico de curvas de Lorenz," 2014.
- [46] Tabares and J. Hernández, "Aproximación por lógica difusa de la serie de tiempo "demanda diaria de energía eléctrica"," *Revista Facultad de Ingeniería*, pp. 209-217, 2013.
- [47] Freeman Mary and Thomas Paul Lane, "Generated code from graphical user interface," ed: Google Patents, 2011.
- [48] Kraus Arnoldo, "Escritos sobre el polvo," *Revista de la Universidad de México*, 2012.
- [49] López de la Sierra, "Elaboración de un Documento de Protección Contra Explosiones," 2013.
- [50] Carvajal Rodriguez Cristian and Mora Sandoval Juan, "Detector de gas metano para minas de carbon," 2011.
- [51] Bueno Mendoza Alberto, Carmela Esther and Bueno San Miguel, "Rocas y metales de labor en las cultura andinas," *Investigaciones Sociales*, vol. 15, pp. 475-499, 2014.

- [52] González Román, "Silicosis en Costa Rica: Un problema de Salud Pública," *Acta Académica*, p. 1925, 2011.
- [53] Gómez Yepes Melissa and Cremades Oliver Lazaro, "Morbi-mortalidad laboral por exposición al polvo de madera en los carpinteros del Quindío (Colombia)," 2011.
- [54] Tanarro Gozalo Cecilia, Sosa Rodríguez Maria, Traspaderne, "Problemática en el establecimiento de valores límite: el caso de las nanopartículas," *Seguridad y Salud en el Trabajo*, pp. 16-27, 2011.
- [55] Nervardo Mojica Hugo, "Estudio para la recuperación del medio ambiente ocasionado por explotación de minas de carbón en el municipio del Espino," 2013.
- [56] Diario Oficial de la Federación, "Norma Oficial Mexicana Nom-023-Stps-2003, trabajos En Minas-Condiciones De Seguridad Y Salud En El Trabajo Indice."
- [57] Colombia, *Norma: ventilación y control de polvos en las explotaciones mineras*: Ministerio de Minas y Energía, Dirección General de Minas.
- [58] Bernal Mendez Bernardo and Turno Sierra Emilio, "NTP 403: Sistemas supresores de explosión (II): factores de diseño y aplicaciones prácticas."
- [59] National Instrumens. (2014, 22/09/2013). "LabVIEW VISION - Fundamentos del Procesamiento Digital de Imágenes". 22/10/2014, from <https://decibel.ni.com/content/docs/DOC-31879>.