



UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Procesamiento de Imágenes para Sistemas de Energía Eléctrica

Autores:

Jose Manuel Criollo Chapal
Kevin Andrés Álvarez Orozco
Juan Diego Betancourt Monsalve

Asignatura:

Computación Numérica

Docentes:

Jaime Valencia
Esteban Velilla

Medellín, Colombia

Índice

1. Introducción	2
2. Fundamento Teórico	2
2.1. Procesamiento de Imágenes	2
2.1.1. Representación de Imágenes y Modelos de Color	2
2.1.2. Técnicas Básicas de Procesamiento	2
2.2. Visión Artificial en Sistemas de Energía Eléctrica	2
2.2.1. Arcos Eléctricos	3
2.2.2. Inspección de Subestaciones Eléctricas	5
2.2.3. Riesgos por Vegetación Cercana a Líneas	5
2.3. Aprendizaje Automático y Redes Neuronales Convolucionales	6
2.3.1. Aplicación en Sistemas Eléctricos	6
3. Metodología	6
3.1. Descripción del Conjunto de Datos	6
3.2. Herramientas y Librerías Utilizadas	7
4. Desarrollo de la Aplicación en Python	7
4.1. Lectura de Imágenes y Video	7
4.2. Preparación de las Imágenes	7
4.3. Aplicación del Modelo	7
4.4. Mostrar Resultados	7
4.5. Modelo de Detección de Arco Eléctrico	7
5. Resultados	7
5.1. Resultados del Procesamiento de Imágenes	7
5.2. Evaluación del Modelo Propuesto	9
6. Conclusiones	9
7. Trabajo Futuro	9
Bibliografía	10

1. Introducción

El procesamiento de imágenes se ha convertido en una herramienta importante para apoyar las tareas de supervisión y mantenimiento en los sistemas de energía eléctrica. A través del análisis de fotografías, videos o imágenes térmicas, es posible obtener información útil sobre el estado de la infraestructura, detectar fallas y mejorar la planificación de las actividades de inspección. Este proyecto busca explorar estas aplicaciones desde una perspectiva práctica, combinando los conceptos básicos del procesamiento de imágenes con el desarrollo de una herramienta en Python. A lo largo del trabajo se describe el fundamento teórico, el diseño de la aplicación, los resultados obtenidos y las conclusiones derivadas del estudio.

2. Fundamento Teórico

2.1. Procesamiento de Imágenes

El procesamiento de imágenes consiste en aplicar métodos que permiten mejorar, analizar o extraer información de una imagen digital. Entre las operaciones más comunes se encuentran la reducción de ruido, el ajuste de contraste, la conversión a escala de grises y la detección de bordes. Estas técnicas permiten resaltar detalles importantes y preparar las imágenes para análisis posteriores.

El uso del procesamiento de imágenes en infraestructura eléctrica facilita la identificación de manchas, deformaciones, zonas oscuras, cambios en el color del metal, corrosión, acumulación de polvo o cualquier señal visual que indique un deterioro progresivo del equipo.

2.1.1. Representación de Imágenes y Modelos de Color

Las imágenes digitales están formadas por píxeles, que son pequeñas unidades que contienen información del color o intensidad. Los modelos de color más usados son:

- **RGB:** Representa colores mediante una combinación de rojo, verde y azul.
- **Escala de grises:** Representa solo niveles de intensidad luminosa.
- **Imágenes térmicas:** Representan temperatura, donde cada color corresponde a un rango térmico.

Las imágenes térmicas son especialmente útiles en sistemas eléctricos porque permiten detectar calentamientos anormales causados por conexiones defectuosas o equipos sobrecargados.

2.1.2. Técnicas Básicas de Procesamiento

Entre las técnicas más utilizadas se encuentran:

- **Filtrado:** Suaviza la imagen para reducir ruido.
- **Umbralización:** Separa los objetos del fondo.
- **Detección de bordes:** Resalta límites de objetos como cables, aisladores o estructuras.
- **Segmentación:** Divide la imagen en regiones útiles para análisis.

2.2. Visión Artificial en Sistemas de Energía Eléctrica

La visión artificial aplica técnicas de análisis de imágenes para inspeccionar, reconocer o medir elementos de los sistemas eléctricos. Se utiliza en líneas de transmisión, subestaciones, transformadores y otros equipos que requieren una inspección constante.

El uso de cámaras visibles, cámaras térmicas y drones permite que las inspecciones sean más rápidas, seguras y precisas, reduciendo la intervención manual en zonas de riesgo.

2.2.1. Arcos Eléctricos

Un arco eléctrico es una descarga continua que ocurre cuando la corriente atraviesa el aire entre dos puntos con distinto potencial. Este fenómeno suele presentarse cuando el aislamiento del equipo deja de cumplir su función y el aire se ioniza, permitiendo que la corriente fluya a través de él. El arco produce temperaturas muy altas, luz intensa y un aumento rápido de presión, lo que puede dañar equipos, generar interrupciones del servicio e incluso crear un riesgo para las personas que se encuentran cerca.

Los arcos eléctricos pueden aparecer por varias razones, entre ellas:

- Aislamiento envejecido o dañado.
- Conexiones flojas, sucias o mal ajustadas.
- Acumulación de humedad, polvo o contaminación en superficies aislantes.
- Sobretensiones o sobrecargas en equipos.
- Vibración mecánica en barras o conductores.
- Conductores expuestos o elementos metálicos muy cercanos.

Los puntos donde podría generarse un arco suelen calentarse antes de la falla, por lo que las imágenes térmicas permiten detectar zonas anormales donde la temperatura empieza a subir. Este tipo de inspección es útil en tableros, interruptores, barras colectoras y transformadores.

Además de las inspecciones visuales, algunas instalaciones utilizan **detectores de arco eléctrico** que ayudan a identificar el fenómeno desde el primer instante. Entre los más usados se encuentran:

- **Detectores ópticos:** Los detectores ópticos son uno de los métodos más rápidos y confiables para identificar un arco eléctrico dentro de tableros y subestaciones. Su funcionamiento se basa en que un arco genera un destello de luz muy intenso y repentino. Cuando el sensor detecta esta luz, envía inmediatamente una señal al sistema de protección para que abra el interruptor y elimine la falla.

A diferencia de las protecciones que dependen solo de la corriente, los detectores ópticos no necesitan esperar a que la corriente aumente, por lo que pueden actuar en tiempos muy reducidos. Esto disminuye de forma importante la energía incidente del arco y reduce el riesgo para las personas y los equipos.

Un ejemplo común es el **ABB Arc Guard System TVOC-2**, utilizado en subestaciones y tableros industriales. Este dispositivo emplea sensores ópticos que reconocen la luz del arco en aproximadamente **1 ms**. Cuando se conecta a interruptores como el **ABB Emax 2**, el tiempo total de despeje puede ser cercano a **50 ms**, lo que limita considerablemente los daños causados por el arco.

Los detectores ópticos se instalan en zonas donde existe mayor riesgo, como:

- Celdas de media tensión.
- Tableros de baja tensión y barras principales.
- Seccionadores e interruptores de potencia.
- Transformadores en seco.
- Centros de control de motores.

En muchos casos, estos sistemas se combinan con sensores de corriente para que la protección actúe solo cuando ocurren simultáneamente luz de arco y aumento de corriente, evitando disparos por reflejos externos o luces intensas no relacionadas con una falla.

Los detectores ópticos son especialmente útiles en instalaciones donde:

- Hay equipos concentrados en espacios reducidos.
- La continuidad del servicio es prioritaria.
- Se requiere disminuir el daño térmico y mecánico en caso de falla.
- Se trabaja con tableros metálicos que pueden canalizar la energía del arco.

Por estas razones, este tipo de sistemas se ha convertido en una solución estándar para la mitigación de arcos eléctricos en subestaciones modernas y equipos de distribución.



Figura 1: Detector óptico ABB TVOC-2 Arc Guard System



Figura 2: Interruptor automático Emax 2

- **Detectores acústicos:** registran el sonido de alta frecuencia producido durante la descarga.
- **Sensores de alta velocidad en protecciones:** analizan cambios bruscos en la corriente para disparar sistemas de protección.

Estos detectores permiten activar mecanismos de protección de forma casi inmediata, reduciendo daños y evitando que el arco se mantenga por un periodo prolongado.

2.2.2. Inspección de Subestaciones Eléctricas

Las subestaciones son puntos clave del sistema eléctrico, ya que allí se realiza la transformación de niveles de tensión, la protección de líneas y la distribución hacia diferentes zonas. Debido al tipo de equipos que manejan, requieren inspecciones frecuentes para garantizar un funcionamiento seguro y estable.

Dentro de una subestación, las imágenes visibles y térmicas permiten revisar:

- Zonas calientes en transformadores, interruptores y barras.
- Fugas de aceite en equipos de potencia.
- Aisladores quebrados, sucios o contaminados.
- Cambios en la coloración de superficies metálicas que indiquen corrosión.
- Desalineación o deformación en estructuras de soporte.

Las subestaciones también emplean **detectores de arco eléctricos** que actúan como una capa adicional de protección. Estos sistemas detectan luz intensa o cambios bruscos en la corriente y ordenan la apertura inmediata del interruptor principal. Su uso es común en:

- Compartimientos de barras.
- Celdas de media tensión.
- Gabinetes con interruptores de potencia.
- Tableros con grandes corrientes de operación.

La combinación de inspecciones visuales, cámaras térmicas y sistemas automáticos de detección ayuda a identificar fallas antes de que evolucionen y permite planificar mantenimientos con mayor precisión.

2.2.3. Riesgos por Vegetación Cercana a Líneas

La vegetación que crece cerca de las líneas eléctricas representa un riesgo importante para la continuidad del servicio. Cuando un árbol o rama está demasiado cerca del conductor, puede generar:

- Cortocircuitos por contacto directo.
- Descargas parciales cuando la humedad es alta.
- Arcos eléctricos entre el cable y partes del árbol.
- Daños mecánicos por caída de ramas sobre los conductores.

Las imágenes aéreas capturadas con drones o satélites permiten observar el crecimiento de la vegetación desde arriba, medir distancias y planificar labores de poda antes de que aparezca cualquier riesgo. Este tipo de monitoreo visual es más rápido que las inspecciones manuales y permite cubrir áreas extensas en poco tiempo.

2.3. Aprendizaje Automático y Redes Neuronales Convolucionales

El aprendizaje automático permite que los sistemas reconozcan patrones mediante entrenamiento. En las imágenes, se usan modelos capaces de identificar formas, texturas, bordes y otros elementos presentes en una escena.

Las redes neuronales convolucionales son uno de los métodos más eficientes para trabajar con imágenes, ya que extraen características de manera automática y permiten:

- Clasificar equipos eléctricos.
- Identificar daños visibles.
- Detectar zonas calientes en imágenes térmicas.
- Reconocer deformaciones o cambios en componentes.
- Analizar la invasión de vegetación.

Una vez entrenadas, estas redes pueden analizar nuevas imágenes y ayudar a automatizar parte del proceso de inspección.

2.3.1. Aplicación en Sistemas Eléctricos

Los modelos pueden aprender a:

- Distinguir entre un aislador sano y uno dañado.
- Identificar conexiones flojas.
- Detectar puntos con riesgo de arco eléctrico.
- Reconocer vegetación peligrosa.
- Analizar transformadores y equipos críticos.

Esto permite un monitoreo continuo y una detección temprana de fallas.

3. Metodología

3.1. Descripción del Conjunto de Datos

El modelo utilizado para detectar arcos eléctricos fue entrenado previamente en la plataforma Roboflow, una herramienta en línea que permite organizar imágenes, etiquetar objetos y entrenar modelos de detección de manera sencilla. Roboflow facilita la preparación del conjunto de datos, ya que permite cargar las imágenes, clasificarlas, dibujar las zonas donde aparece el arco eléctrico y generar una versión lista para entrenamiento. Gracias a esto, el modelo pudo aprender a reconocer las características visuales del arco y posteriormente ser usado dentro de la aplicación.

Para este entrenamiento se usaron imágenes reales donde se identificaba claramente la presencia o ausencia de un arco eléctrico. Además del material fotográfico, se emplearon **videos de arcos eléctricos** obtenidos de diferentes fuentes. De estos videos se **extrajeran fotogramas (frames)** en los que el arco era visible, los cuales fueron añadidos al conjunto de datos. Este proceso permitió aumentar la cantidad de ejemplos y mejorar la variabilidad del material de entrenamiento, ya que los arcos no siempre aparecen en la misma forma o intensidad en cada cuadro del video.

Todos los fotogramas recopilados fueron etiquetados manualmente, marcando con cuadros las zonas exactas donde se observaba el arco. Con este procedimiento, el modelo aprendió a identificar características visuales típicas del arco eléctrico, como su brillo intenso, la forma irregular que presenta y el color característico que cambia rápidamente. Toda la detección realizada por la aplicación se basa en este conjunto de datos previamente preparado y optimizado.

3.2. Herramientas y Librerías Utilizadas

Para el desarrollo se usaron varias herramientas y librerías. Roboflow se empleó para cargar el conjunto de datos, organizarlo y entrenar el modelo de detección. En la aplicación se utilizó Python junto con librerías como PIL para abrir y redimensionar imágenes, OpenCV para dibujar las cajas de detección y trabajar con videos, Matplotlib para mostrar resultados y os y shutil para manejar carpetas y archivos. Con estas librerías fue posible procesar imágenes, extraer fotogramas de videos y ejecutar el modelo ya entrenado.

4. Desarrollo de la Aplicación en Python

4.1. Lectura de Imágenes y Video

El sistema permite trabajar tanto con imágenes individuales como con videos. Cuando se usa un video, primero se abre el archivo y se obtiene su información básica, como los fotogramas por segundo. A partir de esto, se extraen imágenes cada medio segundo y se guardan en una carpeta temporal para analizarlas una por una. Si se carga una imagen, simplemente se lee el archivo y se prepara para el siguiente paso.

4.2. Preparación de las Imágenes

Antes de enviar una imagen al modelo de detección, es necesario dejarla en el tamaño adecuado. El modelo trabaja con imágenes de 640×640 píxeles, así que cada fotograma o imagen cargada se redimensiona a este tamaño. Este proceso asegura que todas las entradas tengan el mismo formato y que el modelo pueda analizarlas sin problemas.

4.3. Aplicación del Modelo

Una vez que la imagen está lista, se envía al modelo entrenado para detectar arcos eléctricos. El modelo analiza la imagen y devuelve, cuando encuentra algo, la ubicación donde aparece el arco y el nivel de confianza de esa detección. Este procedimiento se repite para cada fotograma extraído del video, lo que permite saber en qué momentos ocurre un arco y en cuáles no.

4.4. Mostrar Resultados

Después de obtener las detecciones, el sistema dibuja un recuadro alrededor del arco eléctrico identificado. También se muestra el nombre de la clase detectada y su nivel de confianza. Esto facilita la revisión visual y permite confirmar si la detección es correcta. Además, se genera una lista con todos los fotogramas donde se encontró un arco, lo que ayuda a ubicar rápidamente los instantes relevantes del video.

4.5. Modelo de Detección de Arco Eléctrico

El modelo empleado fue previamente entrenado en la plataforma Roboflow utilizando imágenes donde se marcaron manualmente las zonas donde aparecían arcos eléctricos. Gracias a este proceso, el modelo aprendió a reconocer las características típicas del arco, como su forma, brillo y color. En la aplicación desarrollada, simplemente se carga este modelo ya entrenado y se utiliza para analizar las imágenes y determinar si en ellas aparece un arco eléctrico.

5. Resultados

5.1. Resultados del Procesamiento de Imágenes

En esta sección se presentan los resultados obtenidos al aplicar el modelo de detección de arco eléctrico sobre las imágenes de prueba. El objetivo es mostrar, de manera clara, cómo se ve la imagen

original antes del procesamiento y cómo cambia una vez que el modelo analiza la escena y determina si existe un posible arco.

Primero se muestra la imagen original sin ningún tipo de marcado ni anotación. Esta imagen corresponde a una escena típica en una subestación eléctrica, donde pueden aparecer anomalías visuales que podrían confundirse con un arco eléctrico.:



Figura 3: Imagen original sin procesamiento.

Posteriormente, se presenta la misma imagen después del análisis realizado por el modelo entrenado. Aquí se dibuja un recuadro alrededor del área donde el modelo considera que podría haber un arco eléctrico. Además del recuadro, el sistema incluye un valor numérico que representa la confiabilidad o probabilidad estimada por el modelo de que el objeto detectado sea realmente un arco.

En el ejemplo mostrado, el modelo asignó una confiabilidad del **55 %**, lo que significa que, según las características visuales presentes en la imagen, existe una probabilidad moderada de que se trate de un arco eléctrico. No es una certeza absoluta, pero sí una indicación importante que sugiere una posible anomalía que debe ser revisada más de cerca.

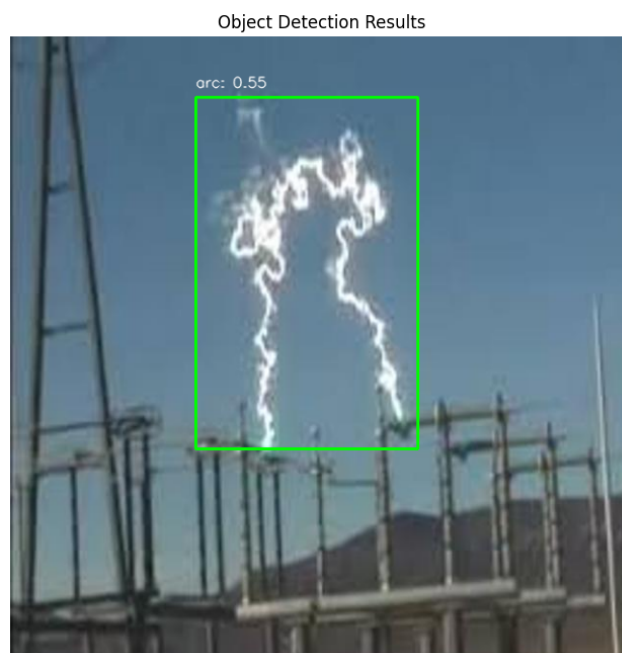


Figura 4: Imagen original despues del procesamiento.

Este tipo de resultados permiten visualizar de forma intuitiva el comportamiento del modelo, ya

que no solo identifica regiones de interés, sino que también expresa el nivel de confianza asociado, lo cual es esencial para la interpretación técnica del sistema.

5.2. Evaluación del Modelo Propuesto

El desempeño del modelo demuestra que es capaz de reconocer patrones visuales característicos de un arco eléctrico, incluso cuando estos son irregulares o se presentan con baja intensidad luminosa. Aunque la confiabilidad no siempre es alta, el modelo proporciona una herramienta útil para preseleccionar imágenes críticas dentro de un conjunto más amplio, reduciendo así el tiempo de inspección manual.

6. Conclusiones

El desarrollo de esta aplicación permitió demostrar que el procesamiento de imágenes y el uso de este tipo de modelos pueden convertirse en una herramienta de apoyo importante para la detección temprana de arcos eléctricos en sistemas de energía. A través del análisis de imágenes y fotogramas de video, el modelo fue capaz de identificar patrones visuales asociados a la presencia de un arco, mostrando recuadros de detección y estimando un nivel de confianza para cada predicción.

Aunque el modelo no siempre ofrece valores de confianza elevados, sí logra resaltar regiones donde existe la posibilidad de que ocurra un arco eléctrico. Esto convierte al sistema en un mecanismo útil para prefiltrar grandes cantidades de imágenes, permitiendo que los operadores humanos se concentren en revisar únicamente los casos más relevantes. Este enfoque reduce el tiempo de inspección manual y aporta una capa adicional de seguridad ante posibles fallas en equipos eléctricos.

Además, se evidenció que la combinación de herramientas como Roboflow, OpenCV y Matplotlib facilita el desarrollo de aplicaciones capaces de analizar imágenes de manera automatizada. El proceso de preparación del conjunto de datos, especialmente la extracción de fotogramas desde videos reales, jugó un papel fundamental, ya que permitió mejorar la variedad de escenarios con los que el modelo fue entrenado.

En general, el proyecto demuestra que las técnicas de visión artificial pueden integrarse sin mayores dificultades en procesos de inspección eléctrica, apoyando la prevención de fallas y permitiendo una supervisión más eficiente de las infraestructuras críticas.

7. Trabajo Futuro

Aunque los resultados obtenidos fueron satisfactorios, existen varias cosas por mejorar que permitirían aumentar la precisión del sistema y ampliar su utilidad en aplicaciones reales. En futuros trabajos se podrían considerar las siguientes actividades:

- **Ampliar el conjunto de datos:** Incluir más imágenes y videos de diferentes subestaciones, cámaras y condiciones de iluminación ayudaría al modelo a generalizar mejor y aumentar la confiabilidad de las detecciones.
- **Integrar imágenes térmicas:** Los arcos eléctricos suelen producir aumentos bruscos de temperatura, por lo que combinar imágenes visibles con imágenes térmicas permitiría detectar fallas incluso cuando no se observan cambios visuales claros.
- **Optimizar el modelo:** Entrenar versiones más avanzadas del modelo, o aplicar otras técnicas, podría mejorar las predicciones y reducir falsos positivos.
- **Implementar un sistema en tiempo real:** Adaptar la aplicación para que procese video en vivo permitiría detectar arcos eléctricos al instante, funcionando como un mecanismo adicional de protección.
- **Desarrollar una interfaz gráfica:** Una interfaz amigable permitiría que operadores sin conocimientos avanzados de programación puedan usar la herramienta fácilmente durante inspecciones o mantenimientos.

- **Generar reportes automáticos:** El sistema podría crear automáticamente informes con las imágenes detectadas, los niveles de confianza y los momentos exactos del video donde aparece el arco.

Estas mejoras permitirían que el proyecto evolucione desde un prototipo funcional hacia una herramienta robusta para inspecciones eléctricas asistidas por visión artificial.

Referencias

- [1] Azion. (2024). *¿Qué es el procesamiento de imágenes?*. Recuperado de <https://www.azion.com/es/learning/performance/que-es-el-procesamiento-de-imagenes/>
- [2] Ultralytics. (2024). *Innovating with computer vision AI in energy*. Recuperado de <https://www.ultralytics.com/es/blog/innovating-with-computer-vision-ai-in-energy>
- [3] Gonzalez, R. C., & Woods, R. E. (2008). *Digital Image Processing* (3rd ed.). Pearson.
- [4] ABB. Arc Guard System™ TVOC-2 — Protección contra arco eléctrico. Recuperado de <https://new.abb.com/low-voltage/products/circuit-breakers/arc-guard>
- [5] Electroenergy. ¿Qué es un arco eléctrico? Recuperado de <https://electroenergyic.com/que-es-un-arco-electrico/>
- [6] Wikipedia. Arco eléctrico. Recuperado de https://es.wikipedia.org/wiki/Arco_elctrico
- [7] Universidad de Córdoba. Arco eléctrico: guía de recomendaciones prácticas. Recuperado de <https://www.uco.es/catedraprevencion/index.php/es/doc-tecnica/128-arco-electrico-guia-de-recomendaciones-practicas>