

Algorithm for Detection of Maximum Solar Infrared Concentration Points with Hough Transform and Region Analysis using Matlab

Fernando Arístides Saldaña Milla, Magister¹, Luis Alberto Benites Gutiérrez, Doctor ², Guillermo David Evangelista Benites, Doctor ²

¹Universidad Católica de Trujillo Benedicto XVI, Perú, fsaldana@uct.edu.pe,

²Universidad Nacional de Trujillo, Perú, lbenites@unitru.edu.pe, gevangelista@unitru.edu.pe

Abstract: In this research work, we present the design and quantitative description of an algorithm based on the Hough transform and an analysis of irradiated regions in the celestial vault. We utilized digital processing of infrared images to locate the point of maximum solar infrared radiation concentration throughout the day. The sample consisted of 6 non-consecutive days, during which infrared images were captured using an infrared camera placed at different locations in the city of Trujillo, La Libertad, Peru; due to the refraction of radiation as it passes through air masses with varying temperatures, humidities, distances, or even their superposition, we implemented an algorithm that adaptively used the Hough transform and only searched for the sun when the sky was clear. When these conditions were not met, we employed an analysis of irradiated regions to locate a centroid with the point of maximum infrared concentration. The resulting point was expressed in Cartesian coordinates corresponding to the resolution of the capturing device. Out of an average of 180 points captured per day, 86% were detected using the Hough transform, 10.5% through the analysis of irradiated regions, and 3.5% remained undetected, typically at the beginning or end of the day.

Keywords— Hough Transform; Image Processing; Solar Infrared Power; Region Analysis; Infrared Concentration Detection.

Algoritmo para Detección de Puntos de Máxima Concentración Infrarroja Solar con Transformada de Hough y Análisis de Regiones con Matlab

Fernando Arístides Saldaña Milla, Magister¹, Luis Alberto Benites Gutiérrez, Doctor², Guillermo David Evangelista Benites, Doctor²

¹Universidad Católica de Trujillo Benedicto XVI, Perú, fsaldana@uct.edu.pe,

²Universidad Nacional de Trujillo, Perú, lbenites@unitru.edu.pe, gevangelista@unitru.edu.pe

Resumen: En este trabajo de investigación, se presenta el diseño y descripción cuantitativa del comportamiento de un algoritmo en base a la transformada de Hough y a un análisis de regiones irradiadas en la bóveda celeste, en donde se usó el procesamiento digital de imágenes infrarrojas y se ubicó el punto de mayor concentración de radiación infrarroja solar en el transcurso del día; la muestra se constituyó de 6 días no consecutivos y se tomó la captura de imágenes con una cámara infrarroja que se ubicó en diferentes puntos de la ciudad de Trujillo, La Libertad, Perú; dado que la radiación se refracta al atravesar por masas de aire a diferentes temperaturas, humedades y distancias o incluso superposición de estas, se implementó un algoritmo que usó la transformada de Hough de forma adaptativa, y que buscó el sol solo al estar el cielo despejado; cuando no se dieron esas condiciones, se usó un análisis de regiones irradiadas y se ubicó un centroide con el punto de máxima concentración infrarroja, se obtuvo el punto en la imagen en coordenadas cartesianas correspondientes a la resolución del dispositivo de captura. De un promedio de 180 puntos capturados por día, el 86% se detectó por transformada de Hough, el 10.5% por análisis de regiones y el 3.5% no hubo detección por tratarse del inicio o final del día.

Palabras Clave— Transformada de Hough; Procesamiento de imágenes; Potencia infrarroja solar; Análisis de regiones; Detección de concentración infrarroja.

I. INTRODUCCIÓN

En el presente estudio se implementó un algoritmo basado en la transformada de Hough y a un análisis de región solar irradiada que permitió, a través del procesamiento digital de imágenes, conocer el punto de máxima concentración infrarroja solar en la bóveda de celeste. Tumala [1] señaló que Aleksandr Stoletov buscó el aprovechamiento de la energía solar desde 1888 en que presentó la primera celda fotovoltaica, el aprovechamiento de la energía solar no solo fue para el uso de paneles solares sino en energía solar térmica de concentración usando torres solares que se han desarrollado desde la posguerra, y a la fecha, existen múltiples sistemas de guía para helióstatos reflejantes y las plantas de energía solar concentrada (CSP) representan una tecnología viable que ya está operativa en varios lugares del mundo [2].

Las plantas de energía solar concentrada requieren sistemas de guía que, con el uso de sensores y análisis digital computarizado, han logrado la orientación automática, incluso

a través de modelos matemáticos de geometría esférica, se ha calculado la trayectoria del sol en la bóveda celeste, esto ha permitido conocer con precisión la ubicación geográfica de puntos estableciendo la trayectoria solar de máxima potencia infrarroja.

La atmósfera es un cuerpo en constante cambio, los rayos infrarrojos sufren desviación constantemente cuando se encuentran con diversas masas de aire a temperaturas, densidades y humedad diversas por lo que éstos se refractan y por lo tanto cambian su dirección, por este motivo existe la necesidad de ubicar el punto en tiempo real, problemática detallada en el trabajo de Morató Pérez [3], quien resaltó la necesidad de incrementar la precisión de los sistemas de posicionamiento solar a través de procesamiento digital de imágenes.

Por lo mencionado, se justificó el presente bajo la siguiente pregunta de investigación: ¿Cuál es el diseño de un algoritmo para la detección de puntos de máxima concentración infrarroja solar con transformada de Hough y un análisis de regiones irradiadas en Trujillo, Perú 2022?, como objetivos se plantearon los siguientes:

A. Objetivo General

- Diseñar un algoritmo para Detección de Puntos de Máxima Concentración Infrarroja Solar con Transformada de Hough y Análisis de Regiones con Matlab.

B. Objetivos Específicos

- Describir cuantitativamente el comportamiento del algoritmo basado en la transformada de Hough y un análisis de regiones solares irradiadas para la ubicación del punto de máxima concentración solar en tiempo real.
- Determinar gráficamente la medida de variación comparativa de la trayectoria solar teórica con la trayectoria generada por el algoritmo de detección.

Para responder a la pregunta de investigación se estudió la trayectoria teórica solar con software aplicativo libre y se comparó con la respuesta del algoritmo bajo la situación descrita de forma gráfica usando coordenadas estereográficas. Se implementó y se ejecutó el algoritmo sobre imágenes infrarrojas y con los datos que se obtuvo en tiempo real, se usó la transformada de Hough como método para localizar el punto de mayor concentración infrarroja emitida por el sol en la bóveda celeste o se usó un análisis de regiones solares irradiadas, logrando un resultado discriminado y único de acuerdo con el contenido de la imagen captada y procesada

Digital Object Identifier: (only for full papers, inserted by LEIRD).
ISSN, ISBN: (to be inserted by LEIRD).
DO NOT REMOVE

digitalmente siendo comparada con la trayectoria solar teórica encontrada.

II. METODOLOGÍA

A. Materiales.

El algoritmo diseñado y analizado en este estudio requirió de un input de imágenes digitales infrarrojas, éstas son la representación bidimensional de una imagen real a través de una matriz numérica; en el caso específico de este estudio, las imágenes de la bóveda celeste capturaron mediante la cámara Pi Cammera Module V2 que gestionó la toma de las imágenes con las características principales detalladas en la TABLA I.

Se usó la versión NoIR, sin filtro infrarrojo en la lente y se obtuvo a través de su sensor, la información del espectro lumínico infrarrojo además de las habituales componentes roja, verde y azul (RGB).

TABLA I
PRINCIPALES ESPECIFICACIONES DE LA PI CAMMERA MODULE V2

Característica	Valor
Dimensiones	25 × 24 × 9 mm
Peso	3gr
Sensor	Sony IMX219
Resolución	3280 × 2464 px
Campo de visión vertical FoV	48.8 grados
Campo de visión horizontal FoV	62.2 grados
Tamaño de píxel	1.12 μm x 1.12 μm
Foco ajustable	Sí

Adicionalmente, como unidad de procesamiento para la toma de imágenes, se usó un microcomputador Raspberry Pi 3 Modelo B, que contó con las especificaciones detalladas en la TABLA II:

TABLA II
PRINCIPALES ESPECIFICACIONES DE RASPBERRY PI 3 MODELO B

Característica	Valor
Chipset Broadcom	1,2 GHz
ARM	64 bits y cuatro núcleos
LAN	Inalámbrica 802.11 b/g/n
Bluetooth	4.1 Classic y Low Energy
Coprocesador multimedia	Videocore IV
Memoria	LPDDR2 de 1 GB
Puertos de comunicación	(1) Ethernet 10/100
1 conector de vídeo/audio.	HDMI

B. Métodos.

El presente trabajo consistió en una investigación de tipo cuantitativo, puesto que los datos al finalizar el estudio fueron presentados de forma gráfica proveniente de un análisis numérico, está basado en el método inductivo – deductivo y en donde el resultado fue comparado por datos teóricos. La variable dependiente fue el algoritmo y la variable dependiente la detección de puntos de máxima concentración solar.

El esquema del diseño se determinó de la siguiente manera:

$$X \rightarrow Y$$

Donde:

X: Diseño del algoritmo

Y: Detección de puntos de máxima concentración solar

Para iniciar el proceso, el microcomputador gestionó la captura de imágenes, en concordancia con el estudio de García García [4] que resaltó los beneficios del software libre para la adquisición y procesamiento de imágenes digitales; se analizaron 180 de 255 imágenes tomadas usando el siguiente algoritmo graficado en el diagrama de flujo mostrado en la Fig. 1; programado en Python.

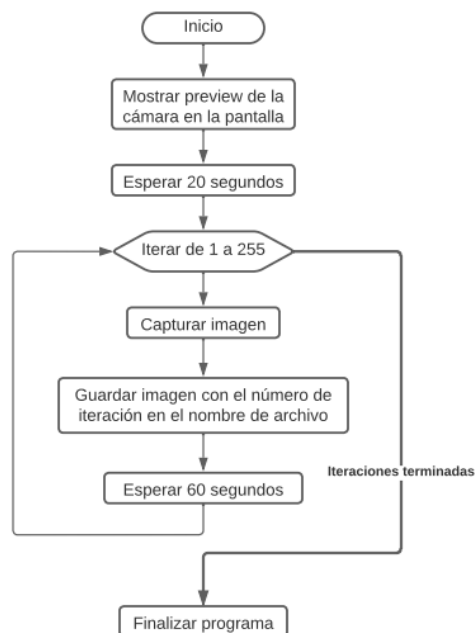


Fig. 1 Diagrama de flujo del algoritmo de captura de imágenes por Raspberry Pi 3 Modelo B

Este procedimiento se llevó a cabo en cada ubicación y día que conforma la muestra seleccionada de manera intensional no probabilística, ya que hubo la necesidad de acceder con facilidad y seguridad físicamente a los lugares seleccionados, los cuales se muestran en la TABLA III.

TABLA III
PUNTOS Y FECHAS USADOS PARA LAS MEDICIONES

Muestra	Día	Ubicación
1	22/02/2022	-8.12556300; -79.02991100
2	24/02/2022	-8.11730000; -79.04649200
3	27/02/2022	-8.12987900; -79.03762900
4	02/03/2022	-8.10853400; -79.00709000
5	05/03/2022	-8.09576700; -79.04961400
6	06/03/2022	-8.12694100; -79.04354200

Para asegurar la captura deseada, se colocó frente a la lente, un filtro pasa banda infrarroja con la curva característica mostrada en la Fig. 2

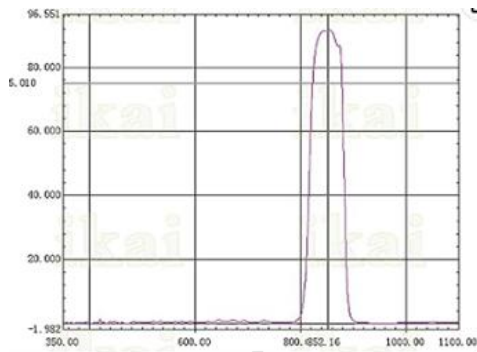


Fig. 2 Diagrama de flujo del algoritmo de captura de imágenes por Raspberry Pi

Se consideró la cámara en una posición fija durante el tiempo en que se tomaron los datos, y se obtuvieron imágenes como la mostrada en la Fig. 3



Fig. 3 Imagen obtenida por la cámara infrarroja conectada a la Raspberry Pi

La imagen se normalizó a 2 dimensiones ya que la resultante estuvo aun, en escala de grises debido al sensor que realizó la adquisición de la imagen, y ésta aún, fue tridimensional. Luego se binarizó, este es un proceso de transformación de cada píxel de la imagen a valores de 0 o 1, negro y blanco respectivamente, dependiendo del umbral de color establecido y luego se aplicó la transformada de Hough.

El algoritmo utilizado para el procesamiento de las imágenes dentro del algoritmo está diagramado en la Fig. 4. Básicamente el algoritmo que se implementó en Matlab tomó todas las imágenes correspondientes a un día contenidas en una misma carpeta, y con el nombre de archivo enumerado de acuerdo con el formato establecido en el programa, el microcomputador Raspberry Pi, con sistema operativo Windows, gestionó la selección de la imagen de la carpeta respectiva. Cada serie de imágenes fueron archivadas en una carpeta denominada “dia”, seguido del número de día al que corresponden del 1 al 6; para obtener los datos de cada serie de imágenes, se editó el número correspondiente por cada carpeta diferente y fueron declaradas las matrices que contuvieron las coordenadas de x e y en pixeles al final de la ejecución del programa así como también, las variables que almacenaron la cantidad de coordenadas que se calcularon con la transformada de Hough, de la misma manera, se almacenaron las coordenadas que se calcularon por análisis de regiones irradiadas y por último, se insertó una variable que guardó la cantidad de veces en las que, después de que se analizó la imagen, no encontró ninguna coordenada.

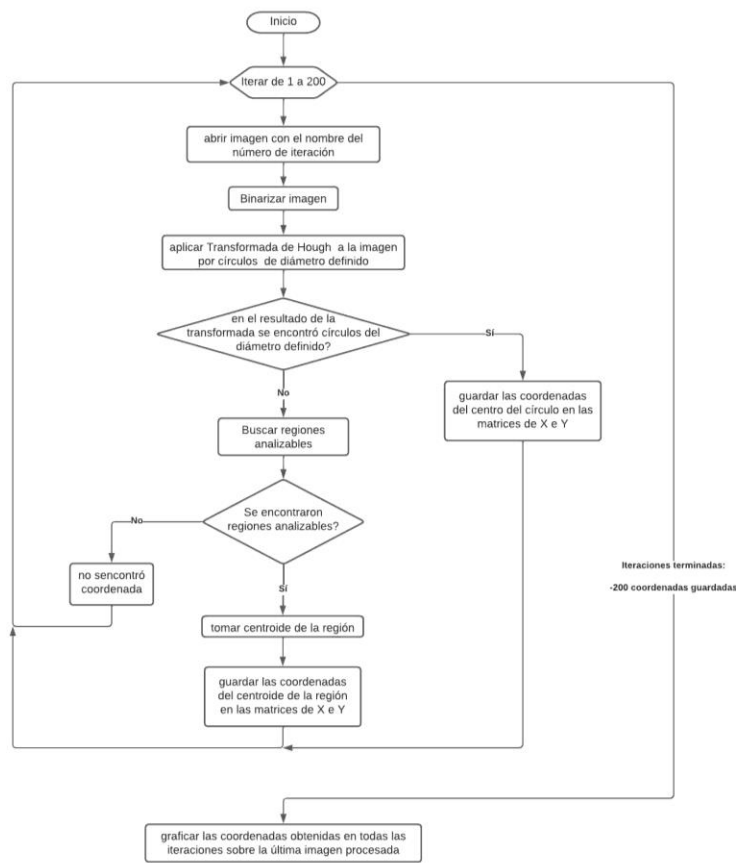


Fig. 4 Diagrama de flujo del algoritmo usado para procesar las imágenes

Para el proceso de normalización bidimensional de las imágenes se usó la función “rgb2gray”, se declaró la cantidad de imágenes que se analizaron a través de un bucle “for”, y se excluyeron, de las 255 imágenes procesadas, las que no correspondieron al rango de horario escogido para el análisis (de 12:00 a 15:00 horas) teniendo como resultado 180 imágenes. El tratamiento previo de cada imagen dio como resultado la binarización de cada una de ellas, en este proceso se pasó de tener una imagen bidimensional en escala de grises con valores digitales de 0 a 255, a una imagen bidimensional binaria en la que solo hubo unos y ceros que fueron representados por pixeles blancos y negros, se definió el umbral del valor del pixel que tomó el color blanco o negro con el parámetro “Sensitivity” en 0.69, lo que significó que los valores digitales por arriba de 178 (69% de 255) serán blancos y los que estén por debajo serán negros, el resultado se aprecia visualmente en la Fig. 5 y Fig. 6 respectivamente.

Se aplicó la transformada de Hough sobre la imagen binaria y se buscó circunferencias cerradas y dieron como resultado una matriz tridimensional con la ubicación cartesiana de las circunferencias encontradas en las dos primeras dimensiones, y su magnitud en la tercera dimensión, además, en el proceso realizado se buscaron estas dimensiones y se registraron con un flag en 1 al aparecer una circunferencia de índice mayor a 30000, lo que indicó la presencia de un

círculo a través de la transformada de Hough, se continuó con el siguiente proceso y se guardaron las dos primeras dimensiones de la variable “peaks”, también se guardó la cantidad de veces en que las coordenadas fueron halladas por este método. Si no se encontró una circunferencia por el método de la transformada de Hough, se aplicó el método de análisis por regiones irradiadas, que de acuerdo con el estudio de Bustamante [5], quien resaltó su eficacia en la cuantificación y dimensionamiento de áreas de interés, así como también su elevado costo computacional, el análisis de regiones, no brindó información de la forma de la región, por el contrario, brindó solo la información de la región con radiación más intensa y por tanto, en su versión binaria, la más grande.



Fig. 5 Imagen digitalizada en escala de grises



Fig. 6 Imagen binarizada

A la región encontrada, se le determinó el centroide y las diagonales mayores; la coordenada del centroide fue guardada como una coordenada más, incrementando la variable “regiones” para luego escribir un mensaje en la consola (interface hombre-máquina). De acuerdo con la salida en la consola y después del procesamiento de las imágenes correspondientes a un día, por ejemplo, se pueden apreciar grupos de imágenes que han sido obtenidas por análisis de regiones irradiadas, este resultado es posible solo cuando la transformada de Hough no ha detectado un círculo, por lo que la imagen binaria es analizada de forma individual mostrando en la Fig. 7:

En la Fig. 7 se presentan imágenes binarizadas en las que el sol no tiene forma circular dado que está incompleto, como se aprecia en las imágenes 10 y 178 de la Fig. 7, o bien, porque fue distorsionado por una nube, como en la imagen 10 de la Fig. 7; en esos casos, el algoritmo de análisis de regiones irradiadas tomó la región más grande y su centroide como coordenada; finalmente, si no encontró una circunferencia o región, se procedió a incrementar la variable “noFound”.

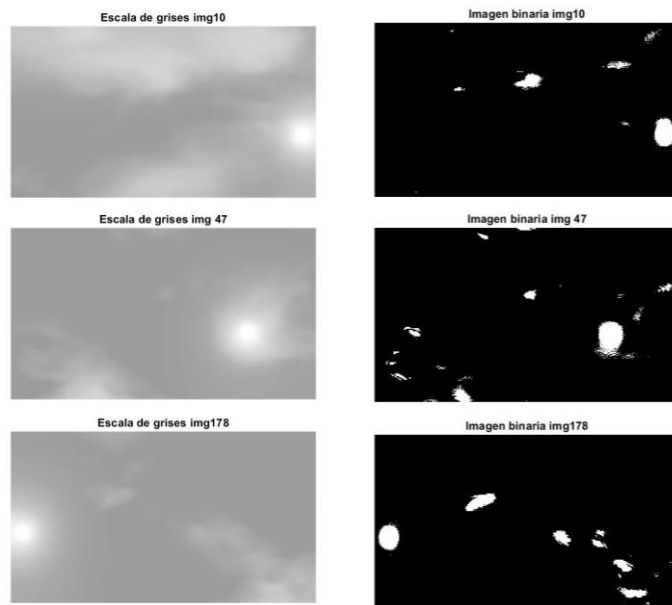


Fig. 7 Comparación entre imágenes representativas en escala de grises e imágenes binarias procesadas por análisis de regiones

Como se ha detallado en el análisis previo a la implementación del algoritmo, en cada iteración del bucle “for” se guardó la coordenada obtenida, ya sea por la transformada de Hough o por análisis de regiones. Se graficó la trayectoria de la sucesión de puntos con máxima concentración infrarroja, como se aprecia en la Fig. 8.

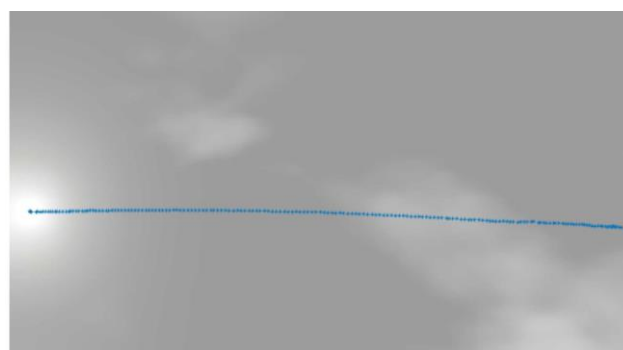


Fig. 8 Superposición de puntos obtenidos con el algoritmo e imagen capturada

Se superpuso una imagen con los datos de las coordenadas, con excepción de los puntos en donde no se haya encontrado coordenada. Se realizó una representación en ejes de ordenadas y se generó una aproximación de la trayectoria en cada uno de los puntos calculados y su correspondiente gráfica de ajuste cuadrático, que permitió trazar la ruta solar promedio de cada uno de los puntos.

Completado el procedimiento de toma de datos, se hizo necesario comparar los datos obtenidos con la trayectoria teórica del sol en la bóveda celeste en las horas comprendidas por la muestra, para lo cual y en concordancia con Carvajal

Carrasco [6], quien resaltó la precisión del cálculo de posición solar apoyándose en su amplio respaldo matemático; se utilizó la herramienta web SunEarthTools, que tiene la capacidad de mostrar la trayectoria teórica solar sobre cualquier punto del planeta ingresando la fecha y la posición GPS, ésta se muestra en la Fig. 9, en donde la curva amarilla es la trayectoria solar correspondiente a todo el día; el círculo amarillo de borde naranja sobre la línea, representa al sol en la hora indicada por el usuario y la zona de color amarillo translúcido es el área por la cual se desplazará la trayectoria solar durante todo el año.



Fig. 9 Herramienta web SunEarth Tools

Con estas herramientas, se realizó una comparación gráfica del segmento correspondiente a las horas 12:00 a 15:00 y la representación gráfica de la data obtenida, como se indica en la Fig. 10



Fig. 10 Superposición de datos del día 2 y trayectoria teórica.

Para cuantificar el error de los datos obtenidos por el algoritmo, se realizaron mediciones con escala estereográfica como se muestra en la Fig. 11.

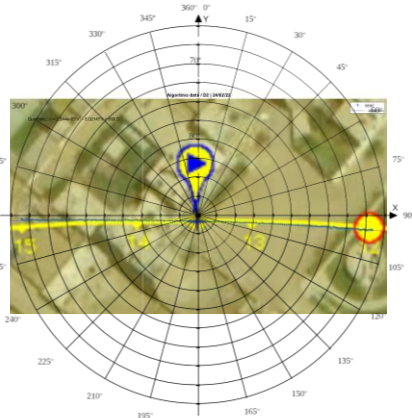


Fig. 11 Superposición de datos del día 2, trayectoria teórica y escala estereográfica

De la Fig. 11, se puede apreciar que, mientras el azimut calculado a las 15:00 del 22-02-22 era de 263°, el algoritmo ubica este punto en ~265.25°.

III. RESULTADOS

A. Algoritmo.

El algoritmo implementado en Matlab para sistema operativo Windows se presenta a continuación:

```

dia = 'dia1';
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Seleccionar imagen

mat1 = zeros(1,50);
mat2 = zeros(1,50);

for n=1:255
    if n<10
        z='000';
    elseif n>9 && n<100
        z='00';
    elseif n>99 && n<1000
        z='0';
    end

    img = join([dia '/' z int2str(n) '.jpg']);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Detectar bordes
    im = rgb2gray(imread(img));

    b =
    imbinarize(im,'adaptive','ForegroundPolarity','dark','Sensitivity',0.69);
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

    %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% aplicar la transformada de
    Hough
    radii = 60:1:70;
    h = circle_hough(b, radii, 'same', 'normalise');
    [w1,h1,p1 ]= size(h);

    for i=1:p1
        check=h(:, :, i);
        ncheck = nnz(check);
        if ncheck > 30000
            flag = 1;
            break;
        else
            flag = 0;
        end
    end

    if flag == 1 %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% si hay circulos
        peaks = circle_houghpeaks(h, radii, 'nhoodxy', 15,
        'nhoodr', 21, 'npeaks', 1);

        mat1(1,n) = peaks(1);
        mat2(1,n) = peaks(2);

        disp([int2str(n), '   circunferencia calculada por
        transformada de Hough ', 'X= ', int2str(peaks(1)), ' Y=
        ', int2str(peaks(2))])

        else %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% no se encontraron circulos por
        Hough

            b =
            imbinarize(im,'adaptive','ForegroundPolarity','dark','Sensitivity',0.69); %% Binarizar

            %imshow(b);
            %%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% buscar regiones analizables
            s =
            regionprops(b, 'Centroid', 'MajorAxisLength', 'MinorAxisLength');
            if length(s) ~= 0
                centroids = cat(1,s.Centroid);
                centers = s.Centroid;
                diameters =
                mean([s.MajorAxisLength;s.MinorAxisLength]);
                radii = diameters/2;
    
```

```

mat1(1,n) = centroids(1,1);
mat2(1,n) = centroids(1,2);
disp([int2str(n), ' circunferencia calculada por
transformada de análisis de regiones ', 'X=
',int2str(centroids(1,1)), 'Y= ',int2str(centroids(1,2))])
else
disp('no se encontraron circunferencias')
end
end
end
end
lastImage = nnz(mat1);
img = join([dia '/' z int2str(lastImage) '.jpg']);
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Graficar
im = rgb2gray(imread(img));
figure()
imshow(im);
hold on
plot(nonzeros(mat1),nonzeros(mat2), '*')
hold off

```

B. Comportamiento y cuantificación del algoritmo.

A través del análisis gráfico comparativo mostrado en la Fig. 12 y la medición con escala estereográfica se logró cuantificar la similitud entre los data obtenida a través del algoritmo implementado y la trayectoria teórica del sol en la bóveda celeste.



Fig. 12 Comparación con superposición de datos y trayectorias teóricas

C. Variación comparativa

TABLA IV
VARIACIÓN COMPARATIVA Y CANTIDAD DE COORDENADAS POR DÍA

Descripción	Día 1	Día 2	Día 3	Día 4	Día 5	Día 6
Variación Máxima	~2.5°	~1.8°	~2.8°	~2.4°	~1.8°	~1.8°
Variación Mínima	~0.5°	~0°	~0°	~2.1°	~1°	~0.5°
Coordenadas obtenidas de 180	172	176	161	180	180	180
Coordenadas obtenidas por Hough %	88.95	91.03	91.17	85.36	72.56	81.26

De los datos obtenidos se elaboró la TABLA IV, que contiene las cantidades de coordenadas y la variación obtenida con los métodos comprendidos en el algoritmo.

IV. DISCUSIÓN

Con respecto al objetivo de este estudio, se han obtenido resultados que indican que la transformada de Hough es una herramienta viable para obtener el punto de máxima concentración infrarroja solar a través del procesamiento de imágenes digitales de la bóveda celeste, en contraste con el procedimiento de Iriarte Cornejo [7], que analizó el reflejo focalizado del sol sobre una plataforma bidimensional y ya que en ese estudio no se usó una cámara con sensor infrarrojo, fue necesario establecer una medición indirecta; en ambos estudios se obtienen resultados que demuestran la efectividad de los algoritmos de procesamiento de imágenes para automatizar el proceso de ubicar al sol en la bóveda celeste, considerando el aporte de este estudio que, además de ello, ha logrado ubicar el punto en escenarios en los que el sol no era visible por agrupaciones de gases en la atmósfera.

Como se aprecia en la Fig. 12, la forma de la trayectoria obtenida con el algoritmo corresponde a la forma de la trayectoria teórica obtenida de SunEarthTools; sin embargo, existe una desviación de hasta 2.4° en la orientación de trayectoria producto del algoritmo, aunque es inevitable notar que en todos los casos, esta desviación tiene el mismo sentido, el de las manecillas del reloj, por lo que se puede estimar el motivo de esta desviación pueda ser el error del dispositivo de orientación usado para ubicar la cámara, ya que para este fin se usó el magnetómetro digital embebido en un móvil motorola G20 con sistema operativo Android con precisión ±1°.

Se aprecia una mayor cantidad de coordenadas obtenidas por transformada de Hough, lo cual es conveniente dado que aplicar la transformada a una imagen tiene menor costo computacional que hacer un análisis de regiones, ya que este, está basado en un cálculo de entropía en la imagen y un posterior conteo de píxeles, lo que sería más parecido a una búsqueda por fuerza bruta; esta predominancia de hallazgos de coordenadas por transformada de Hough, beneficia a una posible implementación en computadores con menos potencia o sistemas embebidos.

Es necesario considerar también que los resultados obtenidos en el presente estudio podrían estar afectados por la temporada del año en que fueron tomados los datos, ya que, en los primeros meses del año, los días tienden a estar más despejado, por lo que sería pertinente, realizar un estudio derivado en los meses en los que predominen los días nublados y realizar el respectivo contraste.

Un gran punto a discutir con respecto del procedimiento aplicado en el presente estudio y el realizado por Iriarte Cornejo [7], es que ambos estudios difieren en la metodología de medición de las trayectorias, dado que Iriarte realiza mediciones directas ya que él solo requiere los datos en ese instante para alimentar la entrada de error de un controlador de

lógica difusa, el cual orientará un actuador con dos grados de libertad que establecerá los valores de elevación y azimut []; mientras que en el presente estudio, se utilizó una medición gráfica a través de la escala estereográfica con la finalidad de comparar los datos obtenidos con la trayectoria teórica, por lo que es pertinente sugerir un estudio derivado, que permita la automatización del proceso de transformación de data cartesiana en una imagen a data con elevación y azimut útil para una comparación directa.

Finalmente, se afirma que se ha comprobado la hipótesis del presente estudio, sin embargo se ha encontrado discordancia con respecto a lo establecido por Correa y otros [8], quienes concluyen que el delineado de una imagen digital a través de la binarización es una gran fuente de error, mientras que en el algoritmo implementado se puede apreciar que es un paso fundamental para poder iniciar el procesamiento de la imagen y que el algoritmo es capaz de detectar la coordenada incluso cuando existe una deformación en la esta; por lo cual se propone un estudio derivado que permita variar el umbral de binarización en la imagen y realizar mediciones que permitan encontrar un valor de binarización que influya significativamente en las imágenes obtenidas. Pero se concuerda con [9] quien usa un algoritmo de transformada de Hough que se adapta usada en la búsqueda de un centro de figuras circulares o parcialmente circulares en una imagen siendo optimizada la eficiencia del algoritmo y usado en una máquina para rayos X. El uso del procesamiento de imágenes para hallar el centro de una circunferencia lo realizó [10] y se concuerda que el uso de la transformada de Hough dentro de un algoritmo de búsqueda solar queda satisfecha.

V. CONCLUSIONES

Dados los resultados obtenidos, se concluye que es posible usar la transformada de Hough para obtener la coordenada cartesiana del punto de máxima concentración infrarroja solar en una imagen digital que contenga información del espectro correspondiente.

Se concluye que, si bien la transformada de Hough es altamente eficiente ubicando esta coordenada dentro de la muestra seleccionada para este estudio, ha sido necesario combinar el resultado de la implementación de esta transformada con el análisis de regiones irradiadas como acción de contingencia ante imágenes en las que el sol se encuentre distorsionado o no se encuentre por completo en el área de visión del sensor.

Se concluye en discordancia con Iriarte Cornejo, (2013), que el proceso de binarización de la imagen aporta significativamente a la detección de formas dentro de esta, considerando que en el presente estudio hemos variado el umbral de binarización a 69% y la información resultante se ha sometido a un algoritmo que implementa la transformada de Hough y el análisis de regiones de forma adaptativa, obteniendo un mínimo de 172/180 y un máximo de 180/180 coordenadas correspondientes al punto central de la

circunferencia correspondiente al sol o ala forma con mayor tamaño, correspondiente al punto de máxima potencia infrarroja solar dada la naturaleza de las imágenes digitales que corresponden a la muestra de este estudio.

Dado el comportamiento del algoritmo de usar mayoritariamente la transformada de Hough con respecto al análisis de regiones, se concluye que se ha obtenido un algoritmo que si bien, cuenta con una componente de alto costo computacional, como puede ser el análisis de regiones; solo existe como un medio de contingencia en caso falle el primero y más eficiente.

Se concluye finalmente, que dadas las características y capacidades del algoritmo, objeto de este estudio, debe tenerse en cuenta la naturaleza de las imágenes, ya que los resultados obtenidos se basan en que este reciba un input que contenga únicamente información del espectro infrarrojo, por lo que el hardware de captura y preprocesamiento de las imágenes que sean sometidas a este algoritmo es altamente relevante dado que, la evaluación que este realiza es sobre la forma y solo en imágenes de dos dimensiones.

REFERENCIAS

- [1] S. Tummala, P. Harishitha, B. Pravallika, S. Alekya and M. Mamatha, *Performance analysis of c-Si & CdS solar cells*, Materials Today: Proceedings. 2023. ISSN 2214-7853, <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.373>
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323037690>
- [2] B.S. Emerick, F.G. Battisti and A. Da Silva, *Geometric optimization of a solar tower receiver operating with supercritical CO2 as working fluid*, Applied Thermal Engineering, Volume 228. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120318>.
- [3] J. Morató Pérez, *Diseño y desarrollo de un sensor solar ultra-preciso empleando procesamiento de imagen para sistemas de control de orientación de satélites*. Sevilla: Universidad de Sevilla, 2020.
- [4] G. García García, *Procesamiento de imágenes solares para la obtención de mapas sinópticos*, Madrid: Universidad Complutense de Madrid, 2020.
- [5] S.H. Bustamante, *Algoritmos de procesamiento de imagen aplicados a la detección de figuras geométricas y sus propiedades espaciales*. Valparaíso: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso. 2014.
- [6] E. R. Carvajal Carrasco, *Diseño y construcción de un helióstato con seguimiento solar en dos ejes para redireccionar radiación incidente hacia un disco concentrador parabólico*, Valparaíso: Universidad Técnica Federico Santa María, 2018.
- [7] C. Iriarte Cornejo, *Automatización de Sistema de Control para Helióstatos*, Instituto Tecnológico de Chihuahua, 2013.
- [8] E.N. Correa, A. Pattini, L.M. Córca, M. Fornés & G. Lecino, *Evaluación del factor de visión de cielo a partir del procesamiento digital de imágenes hemisféricas. Influencia de la configuración del canon urbano en la disponibilidad del recurso solar*, Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente, pp 43-48. 2005
- [9] J. Cauchie, V. Fiolet, D. Villers, *Optimization of an Hough transform algorithm for the search of a center*, Pattern Recognition, Volume 41, Issue 2, 2008, Pages 567-574, ISSN 0031-3203, <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2007.07.001>
- [10] J. Cauchie, V. Fiolet, D. Villers, *Optimization of an Hough transform algorithm for the search of a center*, Pattern Recognition, Volume 41, Issue 2, 2008, Pages 567-574, ISSN 0031-3203, <https://doi.org/10.1016/j.patcog.2007.07.001>