

Monitorización y Predicción de la Radiación Solar Mediante Visión del Paso de Nubes

Alberto Moñino Hormigo
Albertomonhor93@gmail.com
Francisco Rodríguez Rubio
rubio@us.es
Manuel Ruiz Arahál
arahal@us.es

Resumen

En este artículo se expone un método para conocer qué fracción de un campo solar se encontrará sombreada por el efecto de una nube interpuesta en la línea que une el campo solar con el sol mediante el análisis de una secuencia de imágenes tomadas antes de que suceda dicho acontecimiento. Para obtener la posición futura de una nube es necesario calcular su velocidad. Para ello se utiliza el método de Lucas-Kanade, que analiza el flujo óptico para obtener la velocidad de algunos de los puntos que se encuentran dentro de la matriz de inercia equivalente de una nube. Para obtener la velocidad aproximada de la nube se realiza una media de velocidades obtenidas de dichos puntos. Para realizar cálculos en la imagen, como las imágenes tomadas son hemisféricas, ha de realizarse un proceso para la eliminación de la distorsión, así como una serie de tratamientos de imagen. Por último, si se supone que las nubes se encuentran todas a una misma altura y que no tienen fondo se puede calcular la proyección de la nube predicha sobre el campo solar con una proyección paralela y comprobar si los puntos del campo solar pertenecen a la elipse proyectada predicha, obteniendo así qué fracción del campo se encontrará oculta bajo una nube.

Palabras clave: Predicción, Paso de nubes, Despecificación, Método de Lucas-Kanade, Momentos Invariantes.

1. Introducción

Con el gran auge de las energías renovables en la actualidad, surgen nuevas formas para la optimización de la producción de dicha energía. En concreto, en la producción de energía a partir de la transformación de la radiación solar se está investigando actualmente en nuevas formas de control de los campos solares basadas en la predicción de la cobertura de nubes. España es actualmente uno de los países pioneros en la investigación e implantación de este tipo de instalaciones para la obtención de energías limpias. España posee una localización muy adecuada para la instalación de

este tipo de tecnología, ya que la irradiancia media recibida a lo largo del año en nuestro país es muy elevada.

Para el control de un campo solar, tradicionalmente se han usado modelos de alta resolución no lineales y con una gran dinámica. Para obtener predicciones en base a estos modelos se utilizaban métodos numéricos así como por imágenes obtenidas a partir de satélites. Estas predicciones de la radiación solar tienen un horizonte de predicción bastante grande, de alrededor de 30 minutos, y son utilizados para grandes superficies, ya que, aunque un satélite sea un excelente método de obtener información en estos casos, no tiene la suficiente precisión para regiones pequeñas, lo que hace que la localización exacta de una nube resulte difícil. Estos modelos están muy expuestos a perturbaciones producidas en cortos espacios de tiempo, situación muy habitual en los sistemas meteorológicos, por lo que hace realmente difícil obtener una predicción precisa a corto plazo. [2].

Debido a estos motivos, surge la necesidad de buscar nuevos sistemas de adquisición de datos con mayor precisión, que obtengan información local del sistema. En este contexto surge la utilización de cámaras que captan imágenes de las nubes como método de adquisición de datos locales para predicciones a corto plazo, así como de redes de sensores de radiación. Las redes de sensores precisan de grandes superficies para instalar todos los sensores a una distancia suficientemente alejada del campo para obtener predicciones de la cobertura de nubes y no datos en tiempo real y con una separación adecuada entre ellos para que no fuesen datos redundantes. Esto supondría que habría que poseer grandes superficies cercanas al campo para su instalación, lo que en muchos casos hace inviable su utilización.

En contraposición, con pocas cámaras instaladas alrededor del campo solar es posible obtener una caracterización precisa de la cobertura de nubes actual. Además, mediante otras técnicas basadas en el flujo óptico es posible obtener predicciones de la distribución tridimensional de las nubes a corto plazo analizando secuencias de imágenes. Para obtener estimaciones tridimensionales es impres-

cindible la utilización de al menos dos cámaras, pero sigue siendo un número mucho menor que el que es necesario para construir una red de sensores, además de que con una red de sensores no es posible obtener una estimación tridimensional. Por este motivo, el uso de este tipo de dispositivos para la predicción de la radiación solar a corto plazo es muy prometedor.

Para la elaboración de este trabajo no se ha realizado el cálculo de la altura, sólo se ha obtenido la posición de la nube en un plano paralelo al suelo. Se supondrá a partir de ahora una altura conocida para la realización de las tareas.

2. Adquisición de imágenes

La cámara que se ha utilizado para la toma de imágenes es la Q-24M de Mobotix. Se trata de una cámara hemisférica con una resolución de hasta 2048x1536, de bajo coste en comparación con las cámaras que se utilizan normalmente para tomar imágenes del cielo. Las imágenes adquiridas son RGB.

Para controlar la cámara, ésta dispone de un software instalado en su memoria, al cual se accede desde el computador a través del navegador. Para el almacenamiento de las imágenes se programa en la cámara un evento periódico que toma una imagen cada 5 segundos y la transfiere al ordenador mediante un protocolo SMB(Server Message Block).

3. Tratamiento de imágenes

Se han realizado una serie de tareas para poder mejorar el posterior análisis y extracción de información de la imagen. Las tareas que se describen en esta sección han de aplicarse a toda la secuencia de imágenes que se necesitan para el cálculo de velocidades, realizado en una sección posterior.

3.1. Despecificación

En primer lugar se ha realizado una transformación llamada despecificación, cuyo objetivo es solucionar la distorsión introducida en la captación de la imagen por ser la cámara hemisférica.

La imagen obtenida por la cámara tiene una función de mapeo ortográfico. La función de transformación que se necesita para remapear la imagen a una proyección rectilínea es:

$$r^{op} = f^{op} * \sin(\theta) \quad (1)$$

siendo r^{op} la distancia de un punto de la imagen original al centro de ésta, f^{op} la distancia focal de la cámara hemisférica y θ el ángulo en radianes

que forma el punto con el eje óptico. El valor de la distancia focal de la cámara no es un dato, por tanto, se elige un valor que haga que la despecificación sea adecuada por prueba y error.

Se recorta la parte central de la imagen, puesto que las nubes que se muestran fuera de esa zona están a una distancia muy elevada, por lo que no será hasta pasado bastante tiempo cuando se vean, y ya se habrán tomado otras imágenes cuando eso ocurra, además de que esa zona de la imagen se encuentra bastante deformada. Esto reduce la carga computacional ya que son muchos menos píxeles los que han de ser transformados.

Ahora se realiza la transformación para cada píxel, excepto para el centro de la imagen, ya que tiene los mismos valores que el píxel de la imagen original. En primer lugar se calcula el radio del píxel en la imagen original, es decir, la distancia al centro de la imagen y el ángulo según las siguientes fórmulas:

$$r = \sqrt{(x_{pixel} - x_{centro})^2 + (y_{pixel} - y_{centro})^2} \quad (2)$$

$$\theta = \arctan\left(\frac{x_{centro} - x_{pixel}}{y_{centro} - y_{pixel}}\right) \quad (3)$$

El ángulo θ se mantiene constante en la transformación, por lo que tan solo falta por calcular el radio que tendrá el píxel en la imagen despecificada. En la imagen despecificada, el radio de la imagen se calculará de la siguiente forma:

$$r = f * \tan(\theta) \quad (4)$$

La distancia focal que se utiliza en la ecuación (4) no es dato, por lo que, como sucede con la distancia focal de la imagen hemisférica, se elige un valor por prueba y error que haga que la despecificación sea adecuada. Para calcular el radio de la imagen despecificada basta con despejar θ de la ecuación (1) y sustituirlo en la ecuación (4) quedando la ecuación:

$$r = f * \tan\left(\arcsin\left(\frac{r^{op}}{f^{op}}\right)\right) \quad (5)$$

Una vez que se tiene el radio y el ángulo del píxel, basta con ir al píxel original, que está totalmente definido, y copiar su intensidad al píxel de la imagen despecificada. Este tratamiento se realiza sólo para dos de los planos de color de la imagen, que serán el verde y el rojo, tomando 0.6 de rojo y 0.4 de verde. El azul no se utiliza pues es el color del fondo, es decir, del cielo. A continuación se compone la nueva imagen con estos dos planos de colores.

3.2. Transformación polinómica para corregir la distorsión radial en la lente

Tras la despecificación se obtiene una imagen que sigue teniendo una distorsión de tipo cojín (pin-cushion distortion) producida por la lente. Se produce porque los puntos de la imagen se desplazan respecto a lo que indica la ecuación de proyección de la cámara estenopeica, sobre todo la componente radial. Esto quiere decir que en vez de proyectarse sobre una línea recta, la lente distorsiona el ángulo con el que llegan los fotones, produciéndose el desplazamiento antes comentado.

Para resolver este problema es necesario aplicar a la imagen una transformación polinómica para corregir la distorsión radial en la lente. La transformación polinómica se aplica a todos los píxeles de la imagen y sigue la siguiente ecuación:

$$(x_f, y_f) = (x_i, y_i) * (1 + k_1 * r_i) \quad (6)$$

siendo (x_f, y_f) las coordenadas del punto tras la transformación, (x_i, y_i) las del punto inicial, y r_i el radio del pixel (x_i, y_i) . La variable k_1 se ha obtenido por prueba y error, sabiendo que tiene que ser mayor que cero, y que la imagen debe reducir su tamaño. El algoritmo recorre la nueva imagen copiando los píxeles equivalentes de la imagen distorsionada. Se podrían incluir mas términos en el polinomio que es función del radio, pero no es necesario ya que no se busca una transformación con gran precisión.

El problema de este método es que el sistema de ecuaciones (5) es un sistema incompatible.

$$\begin{aligned} i_f &= i_i * (1 + k_1 * r_i) \\ j_f &= j_i * (1 + k_1 * r_i) \\ r_i &= \sqrt{i_i^2 + j_i^2} \end{aligned} \quad (7)$$

Para encontrar una solución a este problema se crea una tabla de equivalencias entre radios partiendo de la ecuación (6). Serán dos vectores con el mismo número de componentes en los que el valor de una posición corresponde con la transformación del pixel que ocupa la misma posición en el otro vector.

$$\begin{aligned} r_f &= \sqrt{i_f^2 + j_f^2} \\ &= \sqrt{i_i^2 * (1 + k_1 * r_i)^2 + j_i^2 * (1 + k_1 * r_i)^2} \\ &= (1 + k_1 * r_i) * \sqrt{i_i^2 + j_i^2} = r_i * (1 + k_1 * r_i) \end{aligned} \quad (8)$$

El procedimiento consiste en recorrer la nueva imagen a completar, calculando el radio que tiene cada pixel, buscando en el vector de radios transformados el radio más cercano al obtenido, y se obtiene el equivalente con distorsión sabiendo que ocupará la misma posición en el vector de radios

sin distorsión y se calcula el ángulo θ , que es igual en ambas imágenes, utilizando la ecuación (9).

$$\theta = \arctan\left(\frac{i_f}{j_f}\right) \quad (9)$$

Teniendo el radio y el ángulo de los píxeles de ambas imágenes, se conocen las coordenadas del pixel de la imagen distorsionada y de la nueva imagen, entonces se copia la intensidad del pixel de la imagen distorsionada a la nueva imagen, ya sin distorsión.

Por último, a la imagen obtenida tras la despecificación y la transformación polinómica hay que realizarle un suavizado. Este proceso es necesario para solucionar el problema debido a la aproximación realizada durante la transformación polinómica, tras la cual, algunos píxeles de la imagen no fueron transformados, quedando sin intensidad.

4. Caracterización de nubes

Para obtener las propiedades de las nubes se ha de binarizar la imagen obtenida tras el tratamiento. La binarización se realiza con un umbral variable.

La primera propiedad necesaria es el área de las regiones. Ésta se utilizará para eliminar aquellas regiones que sean pequeñas o grandes. Serán pequeñas aquellos puntos que no fueron eliminados con el suavizado, así como aquellas nubes que son muy pequeñas y no son necesaria tenerlas en cuenta. Las grandes el destello producido por el sol, que en caso de que ninguna nube se encuentre muy próxima de forma que disminuya la intensidad de los rayos, tendrá un tamaño mucho mayor que las nubes. Para eliminar dichas regiones, basta con vaciar las posiciones que ocupan las regiones en el vector de estructuras.

Las otras propiedades serán el centro de gravedad, los ejes de la elipse de inercia equivalente y la orientación de la elipse. Las elipses se utilizarán para aproximar la forma de las nubes. Con estas propiedades se tiene caracterizada la posición y el tamaño de una nube en la imagen.

5. Cálculo de velocidades

La última característica a extraer de las imágenes es la velocidad de una nube a partir de una secuencia de imágenes tomadas en un Δt , con una separación de tiempo entre imágenes constante. El objetivo de este cálculo es poder estimar la posición de la nube pasado un tiempo $\Delta t'$. Esto es sencillo, pues conociendo el $\Delta t'$, la velocidad de un punto determinado y su posición. Para obtener la velocidad se va a utilizar el flujo óptico, que

es el patrón de velocidades aparentes que tienen los objetos con respecto de la cámara.

Se parte de una secuencia de imágenes, las cuales tienen píxeles con un nivel de gris $I(x, y)$. Como son varias las imágenes y se encuentran ordenadas en el tiempo se añade una nueva coordenada t , que es la posición de la imagen dentro de la secuencia, teniendo así $I(x, y, t)$. Si se supone que la luminosidad no varía, para estimar el flujo óptico se puede considerar que el nivel de gris de un objeto no va a variar entre dos imágenes consecutivas de la secuencia al producirse el movimiento, ya que la velocidad de las nubes es pequeña en comparación con el tiempo entre una imagen y otra.

$$\frac{\partial I}{\partial x}V_x + \frac{\partial I}{\partial y}V_y + \frac{\partial I}{\partial t} = 0 \quad (10)$$

En la ecuación (10) se tiene una ecuación con dos incógnitas, por lo que existen infinitas soluciones para resolverse. Para hallar una solución a este problema se aplica el Método de Lucas-Kanade. Se acepta la hipótesis de que píxeles cercanos dentro de la imagen poseen la misma velocidad, por lo que aplicando la misma ecuación a distintos píxeles con las mismas incógnitas se obtiene un sistema sobredeterminado, que ya si es posible resolverlo, por ejemplo, mediante el método de los mínimos cuadrados, obteniendo una estimación de la velocidad. Los términos que tienen derivadas parciales se pueden reescribir como gradientes, obteniendo el siguiente sistema de ecuaciones para los puntos p, q, r, \dots pertenecientes a la vecindad considerada:

$$\begin{aligned} I_x(p) * V_x + I_y(p) * V_y &= -I_t(p) \\ I_x(q) * V_x + I_y(q) * V_y &= -I_t(q) \\ I_x(r) * V_x + I_y(r) * V_y &= -I_t(r) \\ &\vdots \end{aligned} \quad (11)$$

Este sistema de ecuaciones puede reescribirse de forma matricial de la forma $A * v = b$ con

$$A = \begin{pmatrix} I_x(p) & I_y(p) \\ I_x(q) & I_y(q) \\ I_x(r) & I_y(r) \\ \vdots & \vdots \end{pmatrix}, \quad b = - \begin{pmatrix} I_t(p) \\ I_t(q) \\ I_t(r) \\ \vdots \end{pmatrix}$$

$$y \quad v = \begin{pmatrix} V_x \\ V_y \end{pmatrix} \quad (12)$$

Para obtener la velocidad de la nube se va a obtener una media de velocidades. Se calcularán las velocidades aproximadas de 20 vecindades situadas sobre los ejes de la elipse que representa la nube. Este cálculo se realiza para todas las nubes detectadas en la tarea anterior. El resultado del Método de Lucas-Kanade será la velocidad media de la nube aplicada al centro de gravedad de

la nube. Teniendo una secuencia de más de dos imágenes se pueden calcular más velocidades de esa nube a lo largo del tiempo siempre y cuando la nube no desaparezca. Con todas las velocidades obtenidas de la secuencia se vuelve a realizar una media entre todas ellas y una vez que se tiene esa velocidad es posible calcular la posición de la elipse tras un tiempo $\Delta t'$ aplicando la ecuación (13) que se muestra a continuación.

$$(x_f, y_f) = (x_i, y_i) + v_m * \Delta t' \quad (13)$$

6. Obtención de coordenadas 3D

Se pretende obtener los parámetros intrínsecos de la cámara para la obtención de las coordenadas 3D de las nubes aplicando las ecuaciones de proyección de una cámara estenopeica.

En primer lugar, las posiciones de las nubes que se han obtenido están referenciadas a la esquina superior izquierda de la imagen. Para trabajar con distancias reales es necesario trasladar este sistema de coordenadas a uno con origen en el centro de la imagen, es decir, a un sistema de coordenadas con origen en lo que sería el estenopo en una cámara estenopeica, y a continuación, transformar las distancias obtenidas en píxeles a metros, ya que el campo solar está medido en metros.

Para trasladar el sistema de referencia a la posición de la cámara hay que restar a las coordenadas de todos los centros de gravedad de las elipses la mitad del número de filas o columnas de la imagen. Además, como las imágenes fueron tomadas desde el suelo, con un sistema de coordenadas en Y que apuntaba al sur y un eje X que apuntaba al oeste, para realizar las proyecciones sobre el suelo, deben estar en un sistema de coordenadas coherente. En el sistema de referencia del mundo el eje Y apunta hacia el norte y el eje X hacia el este. Es necesario realizar una rotación de 180 grados de todas las coordenadas obtenidas. Para ello se multiplican las coordenadas obtenidas por la matriz de rotación de la ecuación (14).

$$R = \begin{pmatrix} \cos(180) & \sin(180) \\ \sin(180) & \cos(180) \end{pmatrix} \quad (14)$$

Para hacer la transformación de píxeles a metros hay que hacer uso de la geometría proyectiva. Las ecuaciones de proyección de un punto en el espacio 3D a un punto en la imagen tienen la siguiente forma:

$$x = -f * \frac{X}{Z} \quad y = -f * \frac{Y}{Z} \quad (15)$$

En lugar de la distancia focal en metros, se van a transformar las ecuaciones (15) para que no dependan ni de la posición del punto en la imagen,

que está medida en metros, ni de la distancia focal, también medida en metros. Aplicando las ecuaciones (16) y (17) es posible obtener dichas ecuaciones pero dependiendo de parámetros que estén medidos en píxeles.

Se sabe que la distancia focal en píxeles viene dada por la ecuación (16) donde m_x es un parámetro de la cámara que se interpreta como un factor de conversión de píxeles a metros. Si se aplica este factor de conversión a una distancia real del mundo 3D, por ejemplo, a la del eje X se obtiene la ecuación (17) donde Δj es una distancia en la imagen medida en píxeles, y x es una distancia medida en metros.

$$\alpha_x = f * m_x \quad (16)$$

$$x = \frac{\Delta j}{m_x} \quad (17)$$

Si se introduce las ecuaciones (17) y (16) en la ecuación (15) se puede despejar α_x y α_y , pues todos los demás términos son conocidos en las imágenes que se están analizando, quedando las ecuaciones que se muestran en la ecuación (18). Ya no se va a obtener f de las imágenes, sino que se va a obtener α_x y α_y .

$$\alpha_x = -\Delta j * \frac{Z}{X} \quad \alpha_y = -\Delta i * \frac{Z}{Y} \quad (18)$$

Para obtener estos parámetros se ha utilizado una imagen tomada de una cuadrícula en la que se puede medir la distancia entre dos puntos y la distancia a la que se encuentra la cuadrícula de la cámara. Las ecuaciones 18, para el caso que se está tratando en el que Z es constante, se pueden utilizar indistintamente para puntos como para distancias, pues al aplicar incrementos, se obtienen incrementos. Con esta imagen, de las que se conocen propiedades de objetos que aparecen en ella, se eliminan las incógnitas Z, X e Y, quedando por tanto sólo las incógnitas α_x y α_y .

La imagen utilizada para calcular estos parámetros se muestran en la figura 1

De la imagen se obtiene un valor de α_x y α_y igual para ambos de 163. Finalmente, reordenando las ecuaciones (18), y una vez ya se han obtenido los parámetros α_x y α_y se puede obtener las coordenadas de un punto en el espacio 3D con las ecuaciones (19) en función de las coordenadas del punto en la imagen medido en píxeles con respecto al centro de la imagen.

$$X = -j * \frac{Z}{\alpha_x} \quad Y = -i * \frac{Z}{\alpha_y} \quad (19)$$

Se puede ver que estas ecuaciones dependen de la distancia del objeto a localizar en el mundo real en



Figura 1: Imagen cuadriculada para la obtención de los parámetros intrínsecos de la cámara.

el eje Z. Por este motivo, las transformaciones inversas desde el mundo 2D al mundo 3D no siempre son posibles. Es necesario obtener este parámetro mediante otro método. Una posible solución que no está contemplada en este trabajo es usar más cámaras para realizar una triangulación del punto 3D y así obtener la coordenada Z del punto. Obteniendo esta coordenada basta con aplicar las ecuaciones (19) para obtener las otras dos coordenadas del punto y estar así totalmente definido.

Los semiejes de las elipses obtenidos de las imágenes están medidos en píxeles. Para trabajar con ellos es necesario convertirlos a metros. Como en este caso α_x y α_y tienen el mismo valor, se puede aplicar directamente las ecuaciones 19 para incrementos de x o de y indistintamente. Por tanto, para obtener los valores en metros basta con sustituir j o i por un Δj o Δi , y se obtendrá ΔX o ΔY respectivamente, medido en metros. Para la orientación no es necesario realizar ningún tipo de conversión.

7. Cálculo de proyecciones

En esta última sección se pretende obtener qué fracción del campo solar se verá afectada por la nube tras un Δt para que el algoritmo de control pueda anticipar estas perturbaciones.

Los datos de entrada son el centro de gravedad de la elipse predicha, sus ejes y su orientación. A partir de ahora se supondrá que las nubes se encuentran en un plano paralelo al suelo, ya que no es posible con una única cámara conocer la profundidad de una nube, imposibilitando la estimación del volumen de la nube. Como la altura no se ha podido calcular, se supondrá una altura $Z=500$ para todas las nubes quedando como un parámetro para que en el futuro se pueda incorporar como variable de entrada.

En primer lugar, para conocer la proyección de la

nube es necesario conocer la fuente de luz que provoca dicha proyección, que en este caso es el sol. Para obtener la posición del sol mediante las ecuaciones solares se utiliza un algoritmo presentado en [1] e implementado en MATLAB por Vincent Roy. Consiste en una función con argumento de entrada la posición de la cámara y la hora en la que se tomó la imagen y con argumento de salida el zenit y acimut con respecto a la posición de la cámara, que definen completamente la posición del sol.

Una vez se tiene la posición del sol, se procede al cálculo de las proyecciones. Se puede suponer que el sol se encuentra a una distancia infinita, por tanto, los rayos procedentes de él vienen desde el infinito, simplificando esto mucho los cálculos, ya que las líneas procedentes de un punto en el infinito son todas paralelas. Se realiza entonces una proyección paralela. Como se ha supuesto que las nubes se encuentran en un plano paralelo al suelo, sólo es necesario proyectar el centro de gravedad de la elipse, ya que los ejes de la elipse y su orientación no cambian al realizar la proyección.

Para calcular la posición del centro gravedad proyectado basta con calcular la ecuación de la recta que pasa por el centro de gravedad a una altura Z y que tiene la misma dirección que el vector de dirección de los rayos solares, que está totalmente definido por las ecuaciones solares. Siendo θ el zenit, que se mide desde el suelo y ψ el acimut, medido desde el norte con sentido positivo hacia el este se tiene que:

$$i = \sin(\pi - \psi) \quad (20)$$

$$j = -\cos(\pi - \psi) \quad (21)$$

$$k = \tan(\theta) \quad (22)$$

con i en dirección este y j en dirección norte. A partir de la ecuación (20) el vector de dirección de los rayos de sol tendrá la misma dirección que (i,j,k), pero con sentido opuesto.

A partir de las coordenadas del centro de gravedad de la elipse (x_e, y_e, z_e) y del vector de dirección u se obtiene la ecuación de la recta buscada.

$$\frac{x - x_e}{-\sin(\pi - \psi)} = \frac{y - y_e}{\cos(\pi - \psi)} = \frac{z - z_e}{-\tan(\theta)} \quad (23)$$

Si se conoce que la cota del punto buscado es $z = 0$, se puede despejar x_p e y_p , coordenadas del punto proyectado, de un sistema de ecuaciones de dos ecuaciones y dos incógnitas, que posee una única solución.

$$\begin{aligned} x_p &= x_e - \frac{z_e * \sin(\pi - \psi)}{\tan(\theta)} \\ y_p &= y_e + \frac{z_e * \cos(\pi - \psi)}{\tan(\theta)} \end{aligned} \quad (24)$$

El algoritmo pensado para conocer la fracción del campo que se encontrará perturbado por el efecto de la nube consiste en conocer qué puntos del campo solar se encuentran dentro de la elipse que simula su efecto proyectada. Un punto del campo cuya suma de distancias a los focos de la elipse proyectada sea menor al tamaño del eje mayor de dicha elipse se encontrará sujeta a la perturbación de una nube, es decir, que estará sombreada, siendo a el semieje mayor.

$$\text{si } \overline{PF_1} + \overline{PF_2} < 2 * a \implies P \in \text{elipse} \quad (25)$$

La posición de los focos vendrá dada por las ecuaciones (26) donde α define la orientación de la nube, (x_{F_1}, y_{F_1}) y (x_{F_2}, y_{F_2}) la posición de los focos 1 y 2 respectivamente y (x_p, y_p) la posición de la proyección del centro de gravedad y $c = \sqrt{a^2 - b^2}$.

$$\begin{aligned} x_{F_1} &= x_p + c * \cos(\alpha) \\ y_{F_1} &= y_p + c * \sin(\alpha) \\ x_{F_2} &= x_p - c * \cos(\alpha) \\ y_{F_2} &= y_p - c * \sin(\alpha) \end{aligned} \quad (26)$$

Por último, se comprueba la ecuación (25) para todos los puntos del campo solar, completando una matriz de ceros del mismo tamaño que el campo con un uno en caso de que se cumpla. Como se ha supuesto que el centro de coordenadas se encuentra en la cámara, pues es en el sistema de referencia en el que se calculó el centro de la elipse, para hacer la comprobación es necesario añadir la posición del campo solar con respecto al sistema de referencia, es decir, con respecto a la cámara. Suponiendo que el campo solar sea rectangular y que sea paralelo a los ejes de coordenadas, si L_x es la longitud del campo en x y L_y es la longitud del campo en y , y la posición de la esquina superior izquierda del campo se encuentra en (x_{campo}, y_{campo}) , la condición se puede formular de la siguiente forma:

$$\begin{aligned} j &\in [1, L_x] \\ i &\in [1, L_y] \\ H(i, j) &= 1 \text{ si } \sqrt{(x_{campo} + j - x_{F_1})^2 + (y_{campo} - i - y_{F_1})^2} + \\ &\quad \sqrt{(x_{campo} + j - x_{F_2})^2 + (y_{campo} - i - y_{F_2})^2} < 2 * a \end{aligned} \quad (27)$$

donde $H(i, j)$ es la matriz compuesta por unos y ceros que indica que partes del campo solar se predice que estarán cubiertas tras un tiempo $\Delta t'$ introducido por el operario, es decir, que es la entrada del algoritmo de control que se buscaba.

8. Resultados

Se muestran los resultados obtenidos con los algoritmos reseñados anteriormente.

En primer lugar, en la figura 2 se muestra una imagen original, antes de realizar ningún acción sobre ella. A continuación, en la figura 3 se muestra la imagen obtenida tras realizar el tratamiento de la imagen.

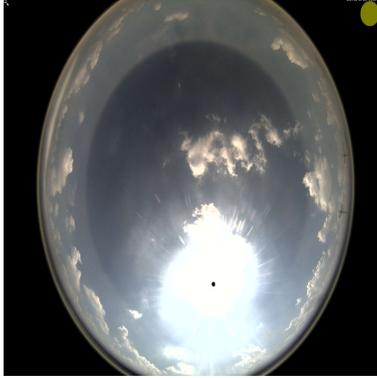


Figura 2: Imagen original.



Figura 4: Posición estimada tras el análisis de una secuencia.

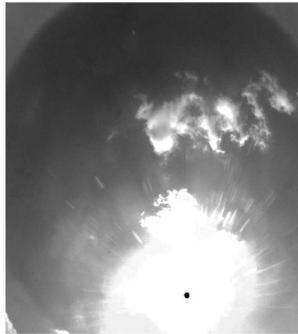


Figura 3: Imagen tratada.

En la figura 4 se pueden observar los resultados obtenidos de una secuencia de 7 imágenes, con un intervalo entre ellas de 5 segundos. La X verde marca la posición predicha de la imagen tras un Δt de 5 minutos y 40 segundos. Las elipses que aparecen tienen un color más negro cuanto más antigua sea la imagen. Se puede observar como la posición obtenida es coherente con el movimiento que tiene la nube.

La precisión de la posición estimada se puede comprobar en la figura 5. Se puede observar, comparando con la posición predicha tras el análisis, que el método de predicción utilizado tiene una precisión considerable, aunque se añade que con horizontes de predicción elevados, el método está muy expuesto a perturbaciones del tipo rachas de viento.

La proyecciones en el campo se pueden observar en la figura 6. En el caso que se muestra, ninguna nube proyecta su sombra sobre el campo, por



Figura 5: Imagen para comprobar los resultados.

lo que la matriz H resultante será una matriz de ceros.

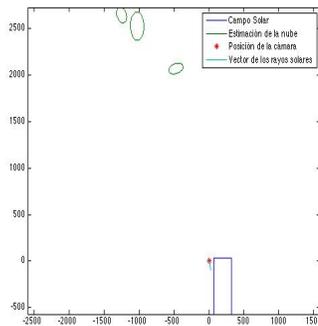


Figura 6: Posición estimada tras el análisis de una secuencia.

9. Conclusión

Es posible obtenerse proyecciones precisas de las nubes para condiciones en la que no existen perturbaciones como es el viento. Cuando se habla del viento como perturbación se refiere a que exista una variación considerable en su velocidad o dirección.

Al ser el algoritmo diseñado para cualquiera que sea el número de nubes que haya en el momento, da cierta versatilidad, ya que no hay que centrarse en una única nube, sino que pueden ser estudiadas todas a la vez, sin olvidar que las nubes que se mueven en una misma imagen tienen una relación, ya que aproximadamente todas las nubes se mueven con la misma dirección. La velocidad también debe ser parecida en todas las nubes, pues si no existen perturbaciones, todas están sometidas a las mismas corrientes de viento. Esto permite realizar ciertas comprobaciones de la veracidad de los resultados obtenidos.

Las condiciones meteorológicas son muy variables a lo largo del tiempo, por lo que las predicciones que se realizan están muy expuestas a las perturbaciones antes comentadas. Por este motivo, se recomienda que los horizontes de predicción utilizados no sean excesivamente largos. También se recomienda que las cámaras no se sitúen muy alejadas del campo solar, pues esto conllevaría a realizar predicciones con grandes horizontes de predicción.

Se proponen aquí, como solución a tomar para mejorar el problema del sol, tomar tres imágenes en vez de una, como se explica en *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment* [2], y realizar una combinación de las tres formando lo que se llama una imagen HDR. En este libro se propone

tomar imágenes con tiempos de exposición diferentes, que son de 5, 20, y 80 milisegundos. Se necesita, por tanto, una cámara que permita realizar un ajuste manual del tiempo de exposición.

Es necesaria la instalación de más de una cámara para obtener la altura de las nubes. Esta característica es totalmente necesaria para la estimación del porcentaje de campo que se encuentra tapado por la nube. Para hallar la altura de una nube se podría realizar una triangulación de puntos singulares, como podrían ser los extremos de las nubes, pues si se conoce la posición del punto en las distintas imágenes, y se conoce la posición relativa de las cámaras la obtención es trivial resolviendo las distintas ecuaciones obtenidas. En caso de que se obtuvieran varias alturas debido a la profundidad que las nubes poseen, se podría utilizar la menor, pues es la que afecta en mayor medida a las proyecciones. La instalación de más cámaras también puede ayudar a comprobar resultados, en caso de que no se encuentren muy alejadas y sean capaces de observar la misma nube. A pesar de ello, Este cálculo forma parte de un trabajo diferente, que no afecta a los algoritmos expuestos en este artículo.

Agradecimientos

Los autores desean expresar su agradecimiento al ministerio de Ciencia e Innovación por la financiación de este trabajo con el proyecto de referencia DPI2013-44135-R.

Referencias

- [1] Ibrahim Reda and Afshin Andreas, (2008) *Solar Position Algorithm for Solar Radiation Applications*, National Renewable Energy Laboratory (NREL).
- [2] Jan Kleissl, (2013) *Solar Energy Forecasting and Resource Assessment*, pp 196-228, Academic Press.
- [3] Javier Gonzalez-Jimenez, (1999) *Visión por Computador*, Thomson-Paraninfo.
- [4] Manuel Ruiz Arahal, *Apuntes de Sistemas de Percepción*.
- [5] Mobotix, *Camera Manual Q24M*.
- [6] Wikipedia contributors(25 May 2015) *Fisheye lens*, Wikipedia, The Free Encyclopedia, 663995745.