

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS
"Francisco García Salinas"

Unidad Académica de Ciencias Químicas

Maestría en Ciencia y Tecnología Química

TESIS

Modelo de seguimiento escalonado solar con diferentes ángulos de aceptación para diversos esquemas de concentración solar.

Para obtener el grado de

Maestro en Ciencia y Tecnología Química

Presenta:

I. Q. Jesús Octavio Sigala Valdez

Directores:

Dra. María de los Angeles Hernández Ruíz

Dr. David Riveros Rosas (Externo)

Dr. Juan Manuel García González

Octubre 2020



INGENIERÍA QUÍMICA

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS
"Francisco García Salinas"

UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS QUÍMICAS

QUÍMICO FARMACÉUTICO BIÓLOGO

QUÍMICO EN ALIMENTOS

MAESTRÍA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA QUÍMICA



I.Q. JESÚS OCTAVIO SIGALA VALDEZ
PRESENTE

La Dirección de la Unidad Académica de Ciencias Químicas, le notifica que el Comité de Revisión de su Documento de Tesis de Maestría, integrada por los Docentes-Investigadores: Dr. en C. Hiram Hernández López, Dr. en C. Rogelio Cárdenas Vargas, Dr. en C. Juan Manuel García González, Dr. en C. David Riveros Rosas, Dra. en C. María de los Ángeles Hernández Ruiz. Han concluido la revisión del mismo y han dado su aprobación para su respectiva presentación.

Por lo anterior, se le autoriza la impresión definitiva de su Tesis de Maestría, a fin de dar trámite a la sustentación de su Examen de Grado de Maestría en Ciencia y Tecnología Química.

UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS QUÍMICAS ATENTAMENTE

Zacatecas, Zac; 13 de Noviembre del 2020

DR. EN C. JORGE LUIS AYALA LUJÁN
DIRECTOR DE LA UNIDAD ACADÉMICA
DE CIENCIAS QUÍMICAS

Unidad Académica
Ciencias Químicas



MAESTRÍA
EN CIENCIA Y
TECNOLOGÍA
QUÍMICA
2016-2020

CLAVE 32USU0007J

Campus UAZ Siglo XXI Carretera Zacatecas - Guadalajara Km. 6
Ejido La Escondida C.P. 98160 Zacatecas, Zac. Tel: (492) 925 6690 Ext. 4650





UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE ZACATECAS "Francisco García Salinas"



UNIDAD ACADÉMICA DE CIENCIAS QUÍMICAS

INGENIERÍA QUÍMICA

QUÍMICO FARMACÉUTICO BIÓLOGO

QUÍMICO EN ALIMENTOS

MAESTRIA EN CIENCIA Y TECNOLOGÍA

QUÍMICA



CIRCULAR

Una vez revisado el DOCUMENTO DE TESIS titulado: "Modelo de seguimiento escalonado solar con diferentes ángulos de aceptación para diversos esquemas de concentración solar" , del I. Q. Jesús Octavio Sigala Valdez con número de Matrícula 26702767. Se solicita a los Miembros del Jurado de Exámen que se citan al calce, tengan a bien aprobar la impresión del documento para continuar los trámites necesarios ante la Rectoría de la Universidad Autónoma de Zacatecas y programar la realización del Examen de Grado correspondiente.

ATENTAMENTE

Zacatecas, Zacatecas., a 04 de noviembre de 2020.

Dr. en C. Sergio Miguel Durón Torres
Responsable de la Maestría en Ciencia
y Tecnología Química.

Unidad Académica
Ciencias Químicas



MAESTRIA
EN CIENCIA Y
TECNOLOGÍA
QUÍMICA
2016-2020

REVISÓ Y APROBÓ

Dr. en C. Hiram Hernández López

Dr. en C. Rogelio Cárdenas Vargas

Dr. en C. Juan Manuel García González

Dr. en C. David Riveras Rosas

Dra. en C. María de los Ángeles Hernández Ruiz



CLAVE 32USU0007J
Campus UAZ Siglo XXI Carretera Zacatecas - Guadalajara Km.6
Ejido la Escondida C.P.98160 Zacatecas, Zac. Tel: (492) 925 6690 Ext. 4650

Agradecimientos

El presente trabajo de investigación se realizó, en la Estación Zacatecas_04 del Sistema Solarimétrico Mexicano (SSM), en las instalaciones de la Maestría en Ciencia y Tecnología Química (MCTQ), de la Unidad Académica de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Zacatecas y en colaboración con el Instituto de Geofísica de la Universidad Nacional Autónoma de México, contando con los apoyos financieros otorgados por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología CONACyT a través de la beca con registro No. 936549. Agradezco el tiempo, espacio y apoyo económico brindado por estas instituciones que han sido de gran importancia para el desarrollo y la finalización de este importante trabajo de investigación.

En primer lugar deseo expresar mi agradecimiento a la directora de esta tesis de maestría, Dra. María de los Ángeles Hernández Ruíz, por la dedicación y apoyo que ha brindado a este trabajo, por el respeto a mis sugerencias e ideas y por la dirección y el rigor que ha facilitado a las mismas. Gracias por la confianza ofrecida desde que el primer día de inicio de este proyecto.

Un trabajo de investigación es siempre fruto de ideas, proyectos y esfuerzos previos que corresponden a otras personas. En este caso deseo expresar mi más sincero agradecimiento al Dr. David Riveros Rosas y a la M en C. Adriana Elizabeth González Cabrera, del Instituto de Geofísica en la UNAM, con cuyo trabajo y apoyo estaré siempre en deuda. Gracias por su amabilidad para facilitarme el entendimiento del tema, su tiempo y sus ideas.

Asimismo, por su orientación, atención, ideas y sugerencias, mi agradecimiento al Dr. Juan Manuel García González por siempre darme el empujón para seguir adelante, muchas gracias.

Pero un trabajo de investigación es también fruto del reconocimiento y del apoyo vital que nos ofrecen las personas que nos estiman, sin el cual no tendríamos la fuerza y energía que nos anima a crecer como personas y como profesionales.

Gracias a mi familia, a mis padres y a mi hermanita, por que con ellos compartí una infancia feliz, que guardo en el recuerdo y es un aliento para seguir desarrollando mi potencial. A mi esposa amada que me ayuda a visualizar el camino y seguir despierto a las oportunidades de crecimiento.

A mis amigos, que siempre me han prestado su apoyo moral y humano, necesarios en los momentos difíciles de este trabajo y esta profesión.

A todos muchas gracias.

Índice general

| | |
|---|-----------|
| 1. Introducción | 18 |
| 1.1. La energía solar | 19 |
| 1.2. Histórico del modelado matemático de la radiación solar directa en una superficie plana. | 20 |
| 2. Antecedentes | 24 |
| 2.1. La radiación solar | 24 |
| 2.2. Factor de Turbidez de Linke | 28 |
| 2.3. Albedo | 28 |
| 2.4. Ángulo sólido | 29 |
| 2.5. Modelos de estimación de la radiación solar | 33 |
| 2.6. Sistemas de seguimiento solar | 34 |
| 3. Consideraciones generales | 38 |
| 3.1. Justificación | 38 |
| 3.2. Hipótesis | 39 |
| 3.3. Objetivos | 40 |
| 4. Modelo y metodología | 41 |
| 4.1. Descripción del modelo ESRA | 41 |
| 4.2. Metodología | 44 |

| | |
|--|-----------|
| 5. Resultados y Discusión | 48 |
| 5.1. Irradiación solar diaria promedio mensual | 50 |
| 5.2. Análisis comparativo de los datos obtenidos | 57 |
| 6. Conclusiones | 65 |
| A. Cálculo de la irradiación solar | 73 |
| B. Rutinas para el cálculo de la irradiancia | 75 |

Índice de figuras

| | |
|---|----|
| 1.1. Espectro solar en el tope de la atmósfera y a nivel del mar [3]. | 19 |
| 2.1. Ángulo sólido. | 30 |
| 2.2. Diagrama para la formación del ángulo sólido a partir de la posición del sol [24]. | 30 |
| 2.3. Área del segmento de la esfera. | 31 |
| 4.1. Diagrama de flujo modeloCieloCl.m. | 45 |
| 4.2. Diagrama de flujo CaptadorSolarV4.GyDNI. | 47 |
| 5.1. Irradiación diaria promedio mensual (Wh/m^2) para 4 esquemas considerados. | 51 |
| 5.2. Gráfica en la que se presenta la comparación de la irradiación global (Wh/m^2) de los datos medidos por la estación solarimétrica Zacatecas_04 y los obtenidos mediante la rutina de cálculo modeloCieloCl.m. | 59 |
| 5.3. Gráfica para la comparación de irradiación solar global para el esquema con seguimiento continuo tipo heliotropo (Wh/m^2) de los datos calculados en Zacatecas (altura 2440 m) y Ciudad de México (altura 2250 m). | 63 |

Índice de tablas

| | |
|--|----|
| 2.1. Clasificación de la radiación solar según su longitud de onda [4]. | 24 |
| 2.2. Parámetros de Albedo para diferentes superficies [22]. | 29 |
| 5.1. Comparación de las mediciones de irradiación solar mensual entre los diferentes esquemas de estudio. | 52 |
| 5.2. Comparación en porcentajes de la irradiación solar alcanzada para cada uno de los esquemas considerados en este trabajo. | 53 |
| 5.3. Comparación de la Irradiación mensual obtenida para cinco esquemas escalonados a diferentes intervalos de tiempo. | 55 |
| 5.4. Comparación en porcentajes para superficie con seguimiento continuo, inclinada con latitud y rotación escalonada según ángulo acimutal. | 56 |
| 5.5. Datos de irradiación solar directa normal, difusa y global medidos en la estación solarimétrica Zacatecas_04 y los datos obtenidos con la rutina de cálculo modeloCieloCl.m para los doce meses del año 2019. | 58 |
| 5.6. Diferencia porcentual entre los datos medidos por la estación solarimétrica Zacatecas_04 y los datos calculados con la rutina modeloCieloCl.m, para los doce meses de 2019. | 60 |
| 5.7. Datos de irradiación goblal mensual entre los distintos esquemas calculados para Zacatecas altura 2,440 m por el modelo de seguimiento escalonado con la rutina CaptadorSolarV4_GyDNI.m. para los doce meses de 2019. | 61 |

| | |
|--|----|
| 5.8. Datos de irradiación goblal mensual entre los distintos esquemas calculados para la Ciudad de México altura 2,250 m, obtenidos con el modelo realizado en la Facultad de Ciencias de la UNAM. | 62 |
| 5.9. Diferencia entre los datos calculados para los esquemas especificados de la Ciudad de México altura 2,250 m y Zacatecas altura 2,440 m. | 64 |

Lista de variables

| | |
|------------|--|
| θ | Ángulo de incidencia |
| θ_z | Ángulo cenital |
| β | Ángulo de inclinación de la placa respecto a la horizontal |
| α | Altura solar |
| δ | Declinación |
| ϕ | Latitud |
| ω | Ángulo horario |
| ω_e | Ángulo horario al amanecer |
| γ_s | Ángulo acimutal solar |
| δ_R | Integral de Rayleigh |
| m | Masa óptica relativa |
| ϵ | Factor de corrección |
| I_0 | Constante solar |
| γ | Ángulo acimutal de la superficie |
| ρ | Albedo |
| B_C | Componente horizontal directa de la radiación |
| D_C | Componente horizontal difusa de la radiación |
| B_{incl} | Componente inclinada directa de la radiación |
| D_{incl} | Componente inclinada difusa de la radiación |
| I_h | Irradiación global incidente sobre la superficie horizontal |
| I_I | Irradiación global incidente sobre la superficie inclinada |
| DNI | Irradiancia directa normal |
| R_d | Factor de transposición |
| $T_L(M)$ | Factor de Turbidez de Linke |
| $T_L(M2)$ | Factor de Turbidez de Linke para una aeromoza igual a 2 |
| β' | Ángulo entre la línea del eje y la proyección del mismo en el plano horizontal |
| γ' | Ángulo entre la proyección de la línea del eje sobre el plano horizontal y el meridiano local. |

Modelo de seguimiento escalonado solar con diferentes ángulos de aceptación para diversos esquemas de concentración solar

Resumen

En la última década la industria de los energéticos ha tomado un gran impacto social, ambiental y económico debido al aumento exponencial del uso de los energéticos fósiles, fuentes energéticas que poseen variados problemas en su uso los cuales van desde baja eficiencia energética, alto nivel de contaminación en su uso y reserva. Con las actuales oscilaciones del precio del petróleo y el de otros combustibles fósiles, los gobiernos mundiales han llegado a la conclusión de que es necesario fomentar la investigación y desarrollo de tecnologías de energías renovables, para su explotación global.

El potencial energético del Sol, se muestra como una de las alternativas con mayor adaptabilidad para los usos domésticos e industriales; dicho potencial aun en su naturaleza variable de acuerdo a la hora del día, época del año y situación atmosférica, presenta como constante energética 1360 W/m^2 .

En este apartado es de suma importancia el cuantificar la radiación solar que alcanza la superficie terrestre, principal problema en el aprovechamiento del energético renovable, que desde principios del siglo XX se ha abordado ampliamente. Varios modelos matemáticos de la radiación solar directa se han realizado utilizando diversas estrategias de seguimiento solar; la importancia de estos sistemas radica en la necesidad de optimizar la cantidad de radiación solar en cualquier tipo de colector.

En este trabajo de investigación se plantea el análisis matemático de la radiación solar incidente en una superficie plana mediante el lenguaje MATLAB de diversos esquemas de seguimiento solar en condiciones de cielo claro para las coordenadas geográficas y condiciones

climatológicas de Zacatecas (Latitud 22.7725 N, longitud 102.6436 E y altitud 2,240 m).

Se escribieron rutinas de cálculo para los esquemas de seguimiento:

- Seguimiento continuo de tipo heliotropo, inclinada con latitud y rotación según el ángulo acimutal. Seguimiento inclinado con la latitud.
- Seguimiento inclinado con la latitud.
- Seguimiento continuo que rota sobre el eje horizontal Este-Oeste según la altura solar.
- Seguimiento fijo.

La finalidad principal es encontrar el método de seguimiento solar mas eficiente para el lugar de estudio, de esta manera continuar con el análisis del seguimiento escalonado a 1, 30, 60, 120 y 240 minutos respectivamente.

El modelo de cielo claro desarrollado por el Atlas Europeo de la Radiación Solar (ESRA por sus siglas en inglés), el factor de turbidez de Linke, la irradiación total difusa por el cambio de ángulo sólido, el parámetro de Albedo y la masa óptica relativa son conceptos que se trabajaron para desarrollar el modelo analizado en esta tesis.

Los datos obtenidos de los cálculos de irradiación solar promedio diaria mensual, se presentan en forma de tablas y gráficas con la finalidad de realizar el análisis correspondiente. Se hace una comparación de los datos obtenidos para cada uno de los meses del año 2019, para los diferentes esquemas de seguimiento solar. Se analizaron los datos y también se presentan en los valores en forma de porcentaje mensual, a manera de control, se considera el esquema de seguimiento continuo al sol de tipo heliotropo con el 100 %, esto se hace debido a la naturaleza del mismo esquema, el cual proporciona la máxima energía solar posible.

Se muestra a manera de validación, diferentes comparaciones con los datos calculados con las rutinas elaboradas, con respecto a los datos obtenidos de mediciones de la estación

solarimétrica Zacatecas_04 ubicada en el Campus UAZ Siglo XXI, edificio 6 de la Universidad Autónoma de Zacatecas. De la misma manera se analizaron y compararon los datos obtenidos mediante un modelo similar en al Ciudad de México presentados por Ramírez en el año 2017 en su tesis de licenciatura, en la Facultad de Ciencias de la UNAM.

Al hacer la comparación de los diferentes casos de seguimiento solar se observa lo siguiente:

- (a) Llega más cantidad de radiación solar por mes, a las superficies que cumplen con algún esquema de seguimiento del sol, con respecto a aquellas superficies que no se mueven.
- (b) La superficie a la que menos captación de radiación solar incide mensualmente es la superficie horizontal. La irradiación solar, por mes estimada para este caso se encuentra aproximadamente en un 25 % por debajo del máximo valor calculado correspondiente al seguimiento de captación solar de tipo heliotropo.

Respecto al análisis comparativo de los datos obtenidos se puede apreciar que:

- (a) El modelo de cielo claro elaborado por ESRA tiene un comportamiento muy cercano a la realidad para la ubicación geográfica Latitud 22.7725 N, longitud 102.6436 E y altitud 2,240 m relacionado con el Campus UAZ Siglo XXI en Zacatecas teniendo una diferencia con los datos obtenidos por la estación solarimétrica Zacatecas_04 con un valor máximo de 0.13 % para el mes de Enero del mismo año.

Abstract

In the last decade, the energy industry has been taken a big impact socially, ambiently, and economically due to the exponential increment in the use of fossil energetics, energy resources that have several problems due to low energetic efficiency, high-level pollution in storage and use. With the oscillations of the current price of petroleum and other fossil energetics, global governments have determined the necessity to develop the research of renewable energy technologies, for global exploitation.

The energetic potential of the Sun has shown as an alternative with a higher level of adaptation for domestic and industrial use; said potential due to their variable nature depending on the time of the day, the season of the year, and the atmospheric situation shows an energetic constant of 1360 W/m^2 .

In this section is important to clarify the importance of quantification of the solar radiation that reaches the terrain surface, the main issue in the exploitation of renewable energetic, since the beginning of the XX century has approached widely. Several mathematic models of direct solar radiation have made using different strategies in solar tracking; the main importance of these solar tracking methods consists of the necessity to optimize the amount of solar radiation in any solar collector system.

This research work proposes the mathematical analysis of the incident solar radiation on a flat surface through MATLAB programming language of several solar tracking schemes on clear sky conditions to geographical coordinates and climate conditions of Zacatecas (Latitude 22.7725 N, length 102.6436 E and altitude of 2,240 m). In this paper, programming routines have been written for the next tracking schemes:

- Continous tracking in the form of heliotrope, tilted with latitude and with azimuthal angular rotation.
- Tilted tracking with latitude.

- Continuous tracking that rotates in the horizontal axis West-East according to the solar altitude.
- Fixed tracking.

The main purpose is to find an efficient solar tracking method for the study location. This manner follows with step tracking analysis to 1, 30, 60, 120, and 240 minutes respectively. Clear sky model developed by the European Solar Radiation Atlas, Linke turbidity factor, total diffuse radiation by the change of a solid angle, Albedo parameter and, relative optical mass are concepts that have been worked to develop the analyzed modeling method on this thesis.

Obtained data of the average monthly diary solar irradiation calculations are shown in form of tables and graphs to perform the corresponding analysis. Data comparison is made for each of the months of the 2019 year, to the different solar tracking schemes. Data analysis has been work and is shown as monthly percentual values, control case is defined as the continuous solar tracking heliotrope type with 100%, due to the natural behavior of the scheme which provides the maximum value of solar energy possible.

Shown for validation different comparisons with the calculated data, regarding the measured data by the solar station Zacatecas_04 located at the UAZ Siglo XXI Campus in Zacatecas in the sixth building of the Universidad Autónoma de Zacatecas. In the same way, were analyzed and compared data obtained with a similar model develop in Mexico City presented by Ramírez in the 2017 year in her bachelors' degree thesis, at the Facultad de Ciencias de la UNAM.

Making a comparison of the different cases of solar tracking, the following is observed:

- (a) More solar radiation reaches each month, to the surfaces that comply with some scheme of sun-tracking, with respect to those surfaces that do not move.

- (b) The surface to which the least collection of solar radiation affects monthly is the horizontal surface. The solar irradiation per month estimated for this case is approximately 25 % below the maximum calculated value corresponding to the monitoring of heliotrope-type solar collection.

Regarding the comparative analysis of the data obtained, it can be seen that:

- (a) The clear sky model prepared by ESRA has a behavior very close to reality for the geographical location Latitude 22.7725 N, longitude 102.6436 E and altitude 2,240 m related to the UAZ Siglo XXI Campus in Zacatecas, having a difference with the data obtained by the station Solarimetric Zacatecas .04 with a maximum value of 0.13 % for the month of January of the same year.

Capítulo 1

Introducción

El aumento exponencial en la generación y explotación de combustibles fósiles para su uso como energéticos habituales [1], ha tomado un gran impacto ambiental, social y económico derivado al alto nivel de contaminación en su uso, práctica y reserva; por lo tanto es imprescindible el encontrar nuevas formas de optimización para el uso de energías amigables o verdes tomando de esta manera un papel fundamental en el desarrollo científico y tecnológico de la última década [2].

Con las actuales oscilaciones del precio del petróleo y el de otros combustibles fósiles, los gobiernos del mundo han llegado a la conclusión de que es necesario fomentar la investigación y el desarrollo de tecnologías de energías renovables, para su explotación global para el año 2030 [3]. El uso de las energías renovables se ha extendido globalmente con el paso del tiempo, en particular, la energía solar es de principal interés debido a que el Sol es una fuente inagotable de energía [4]; en el estado de Zacatecas estudios anteriores [5][6] demuestran su gran viabilidad energética con respecto al recurso solar, tanto para procesos fotovoltaicos como fototérmicos.

El potencial energético del sol es variable de acuerdo a la hora del día, época del año y situación atmosférica: condiciones climatológicas y condiciones de contaminación. Sin embargo se estima que la energía solar es la fuente renovable más abundante de nuestro planeta.

Según datos tomados de la Agencia Internacional de la Energía en su reporte publicado en Septiembre del 2014 [7], las tecnologías para el aprovechamiento del recurso solar serían las mas usadas para el año 2050, y con ello, se lograría reducir notablemente la emisión anual de gases de efecto invernadero previniendo un aproximado de 6 billones de toneladas de dióxido de carbono por año.

1.1. La energía solar

La radiación solar que llega al límite externo de la atmósfera es de 1360 W/m^2 . Sobre la superficie terrestre, en regiones de baja latitud y alta heliofanía (“transparencia” de la atmósfera) pueden llegar, a mediodía, hasta poco más de 1000 W/m^2 véase Fig.1.1 donde se ilustra la irradiancia espectral solar a nivel del mar y fuera de la atmósfera. Esta densidad de energía permite aplicaciones térmicas de la energía solar de temperatura, tales como los colectores solares planos o los cultivos bajo cubierta [3].

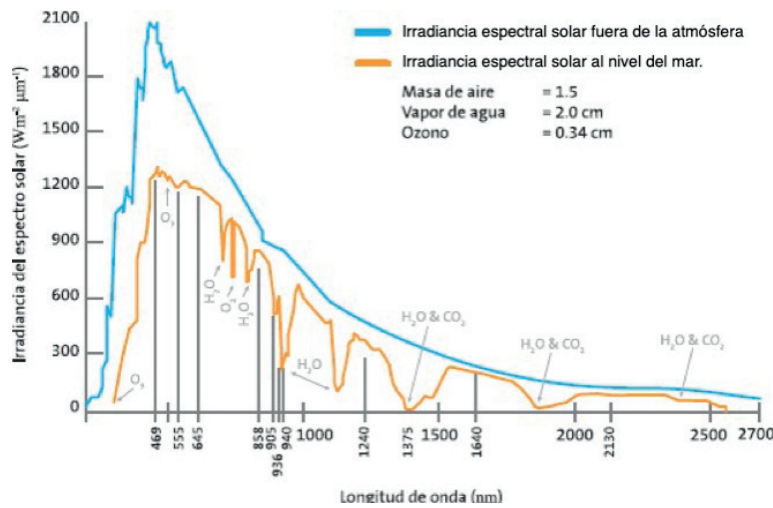


Figura 1.1: Espectro solar en el tope de la atmósfera y a nivel del mar [3].

En términos generales, las tecnologías de aprovechamiento de la energía solar pueden clasificarse en solares térmicas y solares fotovoltaicas; respecto a las primeras existen diversas

aplicaciones, que van desde los colectores solares planos para calentamiento de fluidos como agua con aplicaciones de uso en casa habitación o agua de proceso a bajas temperaturas [8]. En el caso particular de concentradores solares ya sea de disco parabólico, canal parabólico y superficies planas se han realizado aplicaciones a la industria de generación de vapor o fluidos a elevadas temperaturas, así como en conjunto con la implementación de un pequeño motor Stirling y así generar energía eléctrica [9].

En relación a las aplicaciones fotovoltaicas se tiene que la radiación solar se convierte directamente en electricidad, mediante el llamado efecto fotovoltaico el cual se presenta al iluminar la superficie de unión entre los dos diferentes materiales los cuales forman un panel o celda fotovoltaica. Usando paneles solares respaldados con una batería, es posible suministrar energía a una gran variedad de aplicaciones pequeñas y aisladas [10].

Cuantificar la radiación solar que alcanza la superficie terrestre ha sido un problema que desde principios del siglo XX se ha abordado completamente. Varios modelos para la estimación de la radiación difusa sobre planos inclinados se desarrollaron en la década de 1960 [11]. En el año 2018 Adriana E. Gonzalez y colaboradores [12] desarrollaron diversas estrategias de seguimiento escalonado del sol sobre superficies planas, con la finalidad de determinar la precisión para el sistema de seguimiento solar y así mismo la porción de energía que no es posible coleccionar, dependiendo el tiempo entre cada intervalo o escalón de medición en el seguimiento del Sol.

1.2. Histórico del modelado matemático de la radiación solar directa en una superficie plana.

El modelado de la radiación solar directa en una superficie horizontal se puede realizar utilizando varias estrategias del seguimiento al sol; la importancia de los sistemas de seguimiento solar radica en la necesidad de optimizar la cantidad de radiación solar en cualquier

tipo de colector. Actualmente existen varios trabajos en literatura para la optimización de la energía solar interceptada por los diferentes esquemas de configuración del equipo en uno o dos ejes Sumathi en el año 2017 [13], recapitula diferentes métodos de seguimiento solar así como los algoritmos que mayor eficiencia presentan para colectores solares. Huang y colaboradores por su parte desarrollan en el año 2016 un controlador inteligente capaz de dar seguimiento al sol de manera aleatoria [14]. Sin embargo estos trabajos se centran en los sistemas de seguimiento continuo del Sol y la optimización fotovoltaica de los paneles solares.

Se encuentran también diversos trabajos como el presentado por Shehzad y colaboradores [15] que presentan un modelo para la estimación de la radiación solar considerando el flujo laminar de Oldroyd-B a través de una superficie térmica estratificada con nanopartículas de diversos compuestos de Carbono en presencia de radiación térmica, dicho trabajo es representativo debido al alto índice de acercamiento o eficiencia a datos obtenidos en el lugar de estudio mayor a 75 %. Es importante mencionar que en el trabajo de investigación antes mencionado se hace notar la complejidad para el cálculo de la radiación solar debido al estudio del fluido en las condiciones antes señaladas, cálculos que para el estudio práctico de la radiación solar se vuelven obstaculizantes para el uso y optimización de la misma. Un estudio que da base al trabajo de investigación realizado es el presentado por Naves y Rehman [16], trabajo que propone el uso del modelado de rayos para el análisis y optimización de un colector solar con un reflector plano, análogamente se utilizaron esquemas de seguimiento solar mediante el cambio angular pero a diferencia del trabajo de Rehman se implementó un cambio en la medida del ángulo sólido y su cambio debido a los ángulos acimutal y cenital durante un día solar específico, cambio que incrementa de manera teórica la similitud de comportamiento solar presente en la realidad.

En este trabajo de investigación los resultados están presentados para diversos esquemas de seguimiento solar para las condiciones geográficas de Zacatecas (Latitud 22.7725 N, longitud 102.6436 E y altitud 2,240 m). Los mismos esquemas fueron aplicados para datos de radiación obtenidos mediante el uso del modelo de cielo claro desarrollado por el European

Solar Radiation Atlas (ESRA) [4]; la radiación solar fue calculada en sus principales componentes mediante rutinas en MATLAB; las cuales fueron: radiación global, radiación directa normal y radiación difusa. Estos datos fueron la base para el cálculo de la irradiación diaria sobre un superficie plana a diferentes estrategias de seguimiento solar, tales como: el seguimiento escalonado y la porción de concentración debido al ángulo de aceptación variante con diferentes intervalos de tiempo.

La tesis se presenta en seis capítulos con la finalidad de ir de lo general a lo específico. En el primer capítulo se presenta la introducción del trabajo tratada en esta tesis de maestría, presentando el histórico del modelado solar así como de los avances del mismo para su uso en la simulación y optimización de la energía solar como alternativa factible en su uso cotidiano. El segundo capítulo hace alusión a la identificación y descripción del sistema teórico referido al sistema solar y la explicación de diversos temas relacionados con el modelaje del mismo, sus características y su proyección al modelo matemático realizado y ejecutado con MATLAB. La justificación del proyecto así como la hipótesis y objetivos generales y particulares se presentan en el tercer capítulo como las consideraciones generales del trabajo de investigación. El análisis y desarrollo del modelo de cielo claro elaborado por ESRA así como la metodología en la elaboración de las rutinas empleadas en este proyecto se presenta en el cuarto capítulo. Todo lo referente al análisis y discusión de los resultados arrojados por las rutinas de los diferentes esquemas y condiciones que se estipularon en el trabajo elaborado se presentan en el quinto capítulo, así mismo se presentan en el mismo capítulo la validación del modelo realizado por medio de comparaciones con datos medidos por la estación solarimétrica Zacatecas_04 y modelos semejantes en características presentados por la facultad de ciencias de la UNAM para el año 2019; en el sexto y último capítulo presentamos las conclusiones de la investigación determinando los puntos más importantes de la misma. Se presenta de la misma manera dos apéndice donde se muestran las líneas de las rutinas `modeloCieloCl.m` y `CaptadorsSolarV4_GyDNI.m` programadas en MATLAB, dichas líneas establecen los criterios de modelación solar para los parámetros elegidos en este

trabajo.

La importancia de este trabajo radica en haber logrado constituir un modelo matemático adaptado al comportamiento del módulo desarrollado en una aplicación del programa MATLAB y de esta manera permitir visualizar los cambios de comportamiento de la radiación solar para futuros usos afines.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. La radiación solar

La radiación solar es la energía electromagnética que de forma natural es recibida desde el Sol y es la que ha permitido la vida en la Tierra. Esta es la responsable de casi todos los fenómenos meteorológicos y de sus variaciones en el transcurso del día y del año. Además, también depende del comportamiento de la radiación electromagnética al incidir y penetrar la atmósfera terrestre; se presentan varios fenómenos a lo largo de la trayectoria de los rayos solares antes de llegar a la superficie de la Tierra. Cuando la radiación alcanza el límite superior de la atmósfera, cada longitud de onda es afectada de forma diferente dando origen a distintos tipos de radiación solar, en la tabla 2.1 se muestra un clasificación general de la radiación solar de acuerdo a su longitud de onda [4]:

Tabla 2.1: Clasificación de la radiación solar según su longitud de onda [4].

| Radiación solar | |
|------------------------|--------------------------------|
| Tipo de radiación | Longitud de onda (λ) |
| Radiación visible | $0.36 \mu m - 0.76 \mu m$ |
| Radiación infrarroja | $< 0.76 \mu m$ |
| Radiación ultravioleta | $400 nm - 100 nm$ |

Es necesario definir algunos conceptos útiles en la práctica y desarrollar el tema para profundizar en el estudio de la Energía Solar y su posterior uso.

- *Radiación directa.*

Es la que se recibe directamente del Sol sin haber sido dispersada por la atmósfera terrestre, es decir, es la parte de la radiación extraterrestre que logra atravesar la atmósfera sin cambiar significativamente su dirección, pero si su magnitud. Este tipo de radiación es la que produce la sombra en los objetos en los que incide [17]. Se utiliza el subíndice “b” para indicar la radiación directa.

- *Radiación difusa.*

Es la energía recibida después de que su dirección ha cambiado debido a la dispersión atmosférica. Los principales procesos de absorción son la dispersión de Rayleigh que consiste en la dispersión de la luz visible o cualquier otra radiación electromagnética por partículas cuyo tamaño es mucho menor que la longitud de onda de los fotones dispersados y la de Mie la cual consiste en la dispersión de la luz visible por partículas cuyo tamaño son mayores que la longitud de onda de los fotones que se dispersan [18]. Se utiliza el subíndice “d” para indicar la radiación difusa.

- *Radiación global.*

Es la radiación total que incide sobre una superficie horizontal, es igual a la suma de la radiación difusa y la directa horizontal.

- *Irradiancia.*

Es la energía que incide instantáneamente sobre una superficie por unidad de área. Se presenta generalmente con el símbolo “G”, junto con los subíndices indicados: G_0 ,

G_b , G_d , para la irradiancia extraterrestre, directa o difusa. Las unidades comúnmente utilizadas para la irradiancia son W/m^2 .

- *Irradiación.*

Es la potencia radiativa por unidad de área (J/m^2) que incide o se emite en una superficie durante un periodo de tiempo determinado. Es la integral de la irradiancia durante el periodo de tiempo en cuestión. Por lo general se usa el símbolo “I” para la irradiación por hora, y “H” para el periodo de un día. Se utilizan los mismos subíndices, por ejemplo: H_0 (irradiación extraterrestre), I_d (irradiación difusa en una hora)

La Ec. (2.1) representa la relación entre la irradiancia y la irradiación en un periodo de tiempo de t_1 a t_2 .

$$I = \int_{t_1}^{t_2} G(t)dt. \quad (2.1)$$

- *Masa óptica relativa.*

Se define como la razón de la masa de atmósfera a través de la cual el haz de radiación solar atraviesa para llegar a la Tierra y de la masa óptica del recorrido vertical en dirección cenital. A posición del zenit de un punto determinado sobre la Tierra a nivel del mar la masa del aire es igual a 1. Cuando el sol se encuentra en un ángulo de 60° con respecto al zenit (θ_2), $m = 2$. Para ángulos de zenit de 0° a 70° a nivel del mar, una buena aproximación es:

$$m = \left(\frac{1}{\cos(\theta_2)} \right). \quad (2.2)$$

El efecto de la curvatura de la Tierra se debe tomar en cuenta para ángulos mayores [17].

- *Tiempo solar.*

Es el tiempo basado en el movimiento angular aparente del Sol en el cielo; con el medio día solar es el instante en que el Sol cruza el meridiano del observador [17].

- *Tiempo civil o tiempo estándar.*

El también llamado tiempo estándar local, no coincide con el solar. Es necesario convertir el tiempo estándar a tiempo solar, por lo cual se deben aplicar dos correlaciones. La primera rectifica la diferencia entre el meridiano del observador y el meridiano en el cual el tiempo estándar local está basado. La segunda toma en cuenta las variaciones de velocidad en la rotación en la Tierra a lo largo del año, ya que, estas variaciones repercuten en el tiempo que le toma al Sol pasar por el meridiano del observador. La diferencia en minutos establecida entre el tiempo solar y el tiempo estándar está dado por la Ec. (2.3) [17]:

$$TiempoSolar - TiempoEstandar = 4(L_{st} - L_{Loc}) + E, \quad (2.3)$$

donde: L_{st} es el meridiano estándar para la zona del tiempo local, L_{Loc} es la longitud del lugar en cuestión (en grados) y E está dada por la Ec. (2.4) dada en minutos:

$$E = (229)[0,000075 + (0,001868) \cos B - (0,032077) \text{sen} B - (0,014615) \cos 2B - (0,04089) \text{sen} 2B]. \quad (2.4)$$

donde: B está dada por la Ec. (2.5) y n es el día juliano específico a calcular [17]:

$$B = (n - 1) \left(\frac{360}{365} \right). \quad (2.5)$$

2.2. Factor de Turbidez de Linke

El factor de turbidez de Linke $T_L(M)$ describe el grado de transparencias de la atmósfera [21]. Es una función que permite cuantificar la dispersión y difusión de la radiación solar que atraviesa la atmósfera causada por los componentes atmosféricos, como partículas sólidas y partículas líquidas existentes en un cielo despejado o cielo claro. La atenuación de la radiación solar es causada principalmente por tres factores: la dispersión molecular, la dispersión y absorción de la radiación por el vapor de agua y las gotas de agua, la dispersión y absorción de la radiación por el polvo en la atmósfera.

La necesidad de reducir el factor de turbidez a una masa dada para obtener datos comparables implica una gran complejidad para su uso práctico como la caracterización de la transparencia atmosférica. Es así, que Linke propuso que la definición del factor de turbidez pudiera cambiar con el proposito de disminuir la dependencia con respecto a la masa. Dependencia que mayoritariamente es debida a la absorción selectiva. Uno de los métodos más usados consiste en considerar el factor de turbidez a la atmósfera limpia la cual contiene vapor de agua en su composición, a partir de este cambio la dependencia del factor de turbidez debido a la influencia de la absorción selectiva puede ser eliminada en un grado considerable. Bajo estas consideraciones el factor de turbidez de Linke se iguala para una masa de aire igual a 2 ($T_L(M2)$) y es la forma en la que se utilizó en este proyecto [22].

2.3. Albedo

El albedo es un parámetro que indica la fracción de energía incidente que refleja una superficie [23]. En este trabajo se utilizó un albedo de $\rho = 0,2$ para el suelo en todos los casos considerados; en la Tabla 2.2 se presentan los diferentes valores del albedo para las diferentes superficies. Esto con la finalidad de entender las condiciones del suelo como de las características atmosféricas constantes a fin de poder comparar únicamente las ventajas de cada esquema de seguimiento utilizado [22].

Tabla 2.2: Parámetros de Albedo para diferentes superficies [22].

| Superficie | Albedo aproximado |
|----------------------|-------------------|
| Cuerpo negro | 0 |
| Bosque | 0.05 - 0.2 |
| Pasto | 0.1 - 0.25 |
| Superficies oscuras | 0.1 - 0.2 |
| Arena seca | 0.25 - 0.4 |
| Arcilla | 0.15 - 0.35 |
| Arena | 0.2 - 0.4 |
| Albedo prom. Tierra | 0.36 |
| Granito | 0.3 - 0.4 |
| Hielo glacial | 0.3 - 0.4 |
| Recubrimiento de sal | 0.5 |
| Nieve fresca | 0.9 |
| Agua | 0.1 - 1 |
| Superficie blanca | 1 |

2.4. Ángulo sólido

El ángulo Sólido es un concepto geométrico que da una idea cuantitativa de la apertura con que se ve desde un punto una superficie determinada. Puede considerarse como el análogo tridimensional de lo que representa un ángulo en el plano, de allí su nombre. En la Figura 2.1 se muestra la representación geométrica del ángulo sólido [24].

De manera general, se puede definir al ángulo sólido como:

$$\Omega = \frac{S}{R^2}, \quad (2.6)$$

donde

- Ω es el ángulo sólido.
- S es la superficie del sector esférico cortado sobre la esfera auxiliar.

- R es el radio de la esfera auxiliar.

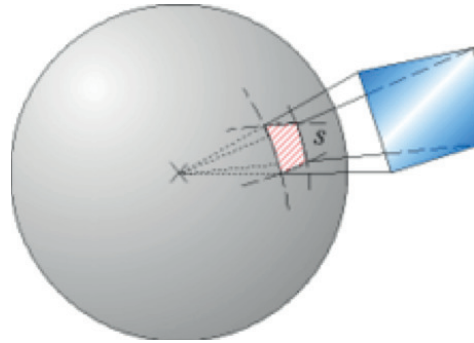


Figura 2.1: Ángulo sólido.

Este ángulo es de vital importancia ya que ayuda a predecir el cambio especular de la radiación en la superficie plana, de tal forma es posible, encontrar de manera efectiva a partir de los ángulos cenital y azimutal la forma en la que se comporta la irradiación difusa, esto partiendo de un comportamiento homogéneo de la misma. Por lo cual, se toma como base la Figura 2.2 [24].

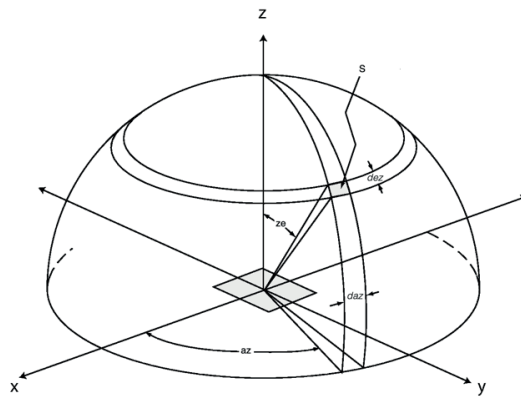


Figura 2.2: Diagrama para la formación del ángulo sólido a partir de la posición del sol [24].

De esta manera el problema radica en encontrar el área del segmento de la esfera suponiendo que dicha área no disminuirá a partir del ángulo azimutal; tomando de referencia la Figura 2.3 se tiene que:

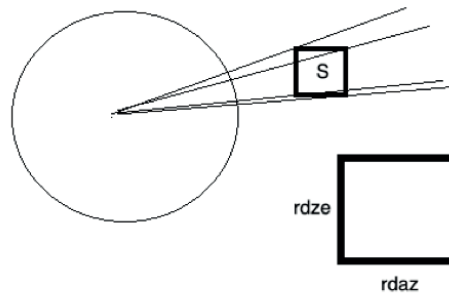


Figura 2.3: Área del segmento de la esfera.

$$S = s^2. \quad (2.7)$$

Por los componentes que conforman a s , se obtiene la Ec. (2.8):

$$S = s_{\theta_z} * s_{\psi}. \quad (2.8)$$

Por la definición de ángulo plano tenemos las ecuaciones (2.9 y 2.10):

$$\theta_z = \frac{s_{\theta_z}}{R}, \quad (2.9)$$

$$\psi = \frac{s_{\psi}}{R}. \quad (2.10)$$

Por sustitución en la Ec. (2.9) se obtienen las ecuaciones siguientes:

$$s_{\theta_z} = \theta_z * R, \quad (2.11)$$

$$s_{\psi} = \psi * R. \quad (2.12)$$

Por lo tanto usando la Ec. (2.7) se obtiene:

$$S = \theta_z * \psi * R^2. \quad (2.13)$$

Usando la definición del ángulo sólido tenemos que:

$$\Omega = \frac{S}{R^2} = \frac{\theta_z * \psi * R^2}{R^2} = \theta_z * \psi. \quad (2.14)$$

Con la Ec. (2.14), se obtiene el ángulo sólido en grados cuadrados formado por el captador solar, en lo siguiente se utilizará el ángulo sólido para adecuar la irradiación difusa que la superficie plana captará; dicha adecuación se obtiene convirtiendo los grados al cuadrado en esteradianes (sr) el cálculo se efectúa como se muestra en la Ec. (2.15):

$$grados^2 = \left(\frac{\pi}{180} \right)^2 sr. \quad (2.15)$$

Partiendo del supuesto que una esfera completa tiene un ángulo sólido de 4π sr; se puede suponer que la mitad de este ángulo será la proporción de la bóveda celeste, siendo este ángulo 2π sr con el cual es posible encontrar la proporción de irradiación difusa que la superficies horizontal podrá captar, siendo el cálculo de la manera siguiente:

$$Porción \ de \ irradiación \ difusa = \frac{\Omega}{2\pi}. \quad (2.16)$$

Si la porción de irradiación difusa se multiplica por el dato de la irradiación calculada se obtiene la irradiación total difusa por el cambio de ángulo sólido Dif_{as} dado en la Ec. (2.17)

$$Dif_{as} = Porción \ de \ irradiación \ difusa * D_C \quad (2.17)$$

2.5. Modelos de estimación de la radiación solar

Ante los elevados costos que significaba la evaluación de la radiación solar incidente en determinado lugar por el costo de los equipos de registro, y dada la urgencia de lograr la factibilidad del uso de otras fuentes de energía alternativa a los combustibles fósiles, en la década de los años setenta diversos investigadores en ciencia y tecnología han ensayado la aplicación de métodos alternativos de evaluación de la radiación solar con instrumentos y métodos más económicos y sencillos [27], para lograr esto, se ha profundizado el conocimiento sobre la dinámica de la radiación solar, de manera que con la obtención de tablas y ábacos de cálculo de la radiación solar teórica [28], más el conocimiento de las características de los otros parámetros meteorológicos y atmosféricos, se han logrado desarrollar modelos de estimación de la radiación solar [29].

Uno de los primeros modelos fue el desarrollado por Angstrong y Prescott [25, 26], basado en datos de horas de sol diarias, denominado también heliofanía. Aunque los equipos de registro de horas de sol son menos costosos que los piranómetros, son igualmente onerosos para la generalidad de características de la radiación solar incidente sobre la superficie del lugar de estudio, por su alto grado de depresión económica.

Estudios posteriores para el modelado matemático de la radiación solar global en superficies horizontales han sido elaborados mediante la modificación del modelo desarrollado por Angstrong y Prescott y se han usado ampliamente en la estimación de la irradiancia global solar. Skeiker y colaboradores [30], encontraron la relación que existe entre la radiación global solar y diversos factores astronómicos como la constante solar, la distancia Tierra-Sol, la declinación solar y el ángulo horario del sol; así como la correlación de factores geográficos, geométricos, físicos y meteorológicos para el modelado del recurso solar. Dicho modelo presenta un error máximo de 8.3%.

El histórico de los estudios de investigación para la estimación de la radiación global solar puede ser resumida de la siguiente manera: Tiris y colaboradores [31], desarrollaron ecuaciones empíricas para el promedio mensual diario para la irradiación global horizontal, radiación normal y difusa con la máxima fracción de horas de luz solar. En otro estudio, Tiris y colaboradores [32] emplea correlaciones para el promedio mensual diario global y la radiación solar difusa para un cielo despejado con motivos estadísticos y concluyeron con las bases para el modelo empírico de la radiación solar global.

El trabajo de investigación expuesto por Ramírez y colaboradores [33], presenta un modelo matemático solar en diferentes esquemas de seguimiento al sol para la ciudad de México, en dicho trabajo se expone de manera simplificada el modelo de cielo claro desarrollado por el Atlas Europeo de la Radiación Solar y su uso en la elaboración de rutinas en un ambiente matemático para la programación mediante MATLAB de dicho modelo. Se presenta también las bases de los esquemas de seguimiento solar que se seleccionaron y se utilizaron para este trabajo de investigación, los cuales se presentan en la siguiente sección.

2.6. Sistemas de seguimiento solar

Los sistemas de seguimiento solar son necesarios para favorecer la captación de energía solar, especialmente en aplicaciones tales como los sistemas de concentración.

Los seguidores solares se pueden agrupar en dos tipos: seguidores de un eje y seguidores de dos ejes. En el primer grupo se encuentran los seguidores solares de un eje que son listados a continuación:

- **Seguidor de eje vertical.** Este tipo de sistema de seguidor solar es mejor conocido como seguidor acimutal. El eje de rotación es colineal con el eje cenital. La superficie tiene una inclinación fija respecto a la horizontal generalmente igual a la latitud local. Para maximizar la radiación incidente sobre la superficie tiene que satisfacer la Ec.

(2.18), la cual se obtuvo de la Ref. [33]:

$$\frac{d(\cos \theta)}{d\gamma} = -\sin \theta_z \sin \beta \sin (\gamma_s - \gamma) = 0. \quad (2.18)$$

La Ec. (2.18) se cumple, si y solo si se cumple la igualdad de la Ec. (2.19),

$$\gamma_s = \gamma. \quad (2.19)$$

Con estas condiciones se obtienen las ecuaciones siguiente:

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \theta_z + \sin \beta \sin \theta_z, \quad (2.20)$$

$$\beta = cte. \quad (2.21)$$

- **Seguidor de eje horizontal.** El eje de rotación de este seguidor permanece siempre paralelo a la superficie de la Tierra. Se orienta en dirección Este-Oeste o bien, en la dirección Norte-Sur.

a) Plano que rota sobre un eje horizontal orientado en la dirección Este-Oeste con ajuste diario. En este caso, la radiación es normal a la superficie en el medio día solar. La Ec. (2.22) presenta la disposición geométrica de la radiación solar en su forma normal.

$$\cos \theta = \sin^2 \delta + \cos^2 \delta \cos \omega. \quad (2.22)$$

La inclinación de la superficie tiene que ajustarse diariamente de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\beta = |\phi - \delta|. \quad (2.23)$$

El ángulo acimutal de la superficie está dado por las ecuaciones siguientes:

$$Si (\phi - \delta) > 0 \quad , \quad \gamma = 0^\circ, \quad (2.24)$$

$$Si (\phi - \delta) < 0 \quad , \quad \gamma = 180^\circ. \quad (2.25)$$

b) Plano que rota sobre un eje horizontal Este-Oeste con ajuste continuo para maximizar el ángulo de incidencia.

$$\cos \theta = (1 - \cos^2 \delta \sin^2 \omega)^{\frac{1}{2}}. \quad (2.26)$$

La inclinación de la superficie estará dada por la Ec. (2.27):

$$\tan \beta = \tan \theta_z |\cos \gamma_s|. \quad (2.27)$$

Mientras que el ángulo acimutal de la superficie está dado por las expresiones siguientes:

$$\text{Si } \gamma_s < 90^\circ \quad , \quad \gamma = 0^\circ \quad (2.28)$$

$$\text{Si } \gamma_s > 90^\circ \quad , \quad \gamma = 180^\circ \quad (2.29)$$

- **Seguidor de eje inclinado.** Su eje de rotación está inclinado respecto a la superficie terrestre, generalmente esta inclinación es igual a la latitud local [33]. La Ec. (2.30) presenta la relación que mantienen los ángulos acimutal, cenital, inclinación e inclinación de la superficie con su representación geométrica.

$$\cos \theta = \cos \beta \cos \theta_z + \sin \beta \sin \theta_z \cos (\gamma_s - \gamma) \quad (2.30)$$

El ángulo acimutal de la superficie está dado por la ecuación siguiente:

$$\gamma = \gamma_0 + 180C_1C_2, \quad (2.31)$$

donde, γ_0 , C_1 , y C_2 tienen las expresiones siguientes:

$$\gamma_0 = \gamma' + \tan^{-1} \left(\frac{\sin \theta_z \sin (\gamma_s - \gamma')}{\cos \theta' \sin \beta'} \right) \quad (2.32)$$

$$C_1 = \begin{cases} 0 & \text{si } (\gamma_0 - \gamma) (\gamma_s - \gamma) \geq 0 \\ 1 & \text{de caso contrario} \end{cases} \quad (2.33)$$

$$C_2 = \begin{cases} 1 & \text{si } (\gamma_s - \gamma') \geq 0 \\ -1 & \text{de caso contrario} \end{cases} \quad (2.34)$$

La inclinación de la placa está dada por la Ec. (2.35):

$$\beta = \tan^{-1} \left(\frac{\tan \beta'}{\cos(\gamma - \gamma')} \right) + 180C_3 \quad (2.35)$$

$$C_3 = \begin{cases} 0 & \text{si } \tan^{-1} \left(\frac{\tan \beta'}{\cos(\gamma - \gamma')} \right) \geq 0 \\ 1 & \text{de caso contrario} \end{cases}$$

$$C_1, C_2, C_3 = cte$$

Capítulo 3

Consideraciones generales

3.1. Justificación

La presente investigación se enfoca en analizar el modelado matemático del seguimiento escalonado solar acoplado al cambio en el cálculo de la proporción de radiación difusa debido al cambio de ángulo sólido, como una alternativa factible económicamente al problema ocasionado a los recientes cambios ecológicos debidos al alto nivel de contaminación ocasionado en gran medida al almacenamiento y uso desmedido de combustibles fósiles. Así, se presenta el análisis solar energético de Zacatecas, ubicación geográfica: Latitud 22.7725 N, longitud 102.6436 E y altitud 2,240 m como potencial base en la optimización de diversos colectores solares. El presente trabajo permitiría mostrar la viabilidad energética que presenta el Sol para su uso como alternativa fotovoltaica y térmica en el ámbito doméstico e industrial, y profundizar los conocimientos teóricos sobre el modelado matemático del comportamiento solar en sitios semiáridos para la simulación efectiva del Sol.

3.2. Hipótesis

El modelo de seguimiento escalonado acoplado con el cambio del ángulo sólido, para los cinco esquemas de seguimiento que en este trabajo se propone, se simulará de manera efectiva la irradiación incidente mensual para Zacatecas, Campus UAZ Siglo XXI (Ubicación geográfica: Latitud 22.7725 N, longitud 102.6436 E y altitud 2,240 m) de esta manera se espera encontrar que los movimientos escalonados de intervalo de tiempo mayor (120 y 240 minutos), representarán un sistema de seguimiento apropiado para el estudio de la radiación solar mensual en comparación a los movimientos escalonados de un intervalo de tiempo menor (1, 30 y 60 minutos). Con una pérdida de acumulación energética menor al 10 % con respecto a los sistemas de seguimiento continuo.

3.3. Objetivos

- *Objetivo general:*

Analizar la energía solar incidente en una superficie plana con diferentes esquemas de seguimiento solar en condiciones de cielo claro, en Zacatecas capital.

- *Objetivos particulares:*

- Elaborar rutinas en lenguaje MATLAB para el cálculo de irradiancia de cielo claro para Zacatecas, Zac (Latitud 22.7725 N, longitud 102.6436 E y altitud 2,240 m).
- Elaborar las rutinas de cálculo de posición de una supercie plana para los diferentes esquemas de seguimiento:
 - Seguimiento continuo de tipo heliotropo, inclinada con latitud y rotación según el ángulo acimutal. Seguimiento inclinado con la latitud.
 - Seguimiento inclinado con la latitud.
 - Seguimiento continuo que rota sobre el eje horizontal Este-Oeste según la altura solar.
 - Seguimiento fijo.
- Calcular la irradiación solar incidente bajo condiciones de cielo claro e irradiación total difusa por el cambio de ángulo sólido en los esquemas de seguimiento del Sol.
- Calcular el seguimiento escalonado a 1, 30, 60, 120 y 240 minutos respectivamente para el esquema de seguimiento del Sol con mayor capacidad energética.

Capítulo 4

Modelo y metodología

4.1. Descripción del modelo ESRA

El modelo desarrollado por el Atlas Europeo de la Radiación Solar (ESRA por sus siglas en inglés) que estima la cantidad de radiación global o total I_h que alcanza una superficie horizontal, mediante la suma de las componentes horizontal directa I_{hB} y difusa I_{hD} bajo las consideraciones de cielo despejado como se muestra en la Ec. (4.1) dado en la Ref. [34].

$$I_h = I_{hB} + I_{hD}. \quad (4.1)$$

Componente horizontal directa:

En la Ec. (4.2) se muestra el componente de la radiación horizontal directa donde se toma el valor de la constante solar, factor de corrección debido a la variación de la distancia de la tierra al sol, el ángulo acimutal solar que se ve afectado por la masa óptica relativa, el factor de turbidez de Linke y la integral de Rayleigh.

$$I_{hB} = I_0 \epsilon \sin \gamma_s e^{(-0,8662 T_L m \delta_r)}, \quad (4.2)$$

donde,

- I_0 : $1367 \frac{W}{m^2}$
- T_L : *Factor de turbidez de Linke*

- δ_r : *espesor óptico*
- ϵ : *Factor de corrección debido a la variación de la distancia Tierra – Sol*
- m : *Masa óptica relativa*

Componente horizontal difusa:

El cálculo del componente horizontal difuso de la radiación se estima con la multiplicación de la constante solar, el factor de corrección debido a la variación de la distancia Tierra-Sol, el valor de la transmisión debido a la difusividad de la atmósfera y la difusividad angular como se muestra en la Ec. (4.3).

$$I_{hD} = I_0 \epsilon T_{rd}(T_L) F_d(\gamma_s, T_L), \quad (4.3)$$

donde,

- I_0 : $1367 \frac{W}{m^2}$
- T_L : *Factor de turbidez de Linke*
- δ_r : *espesor óptico*
- ϵ : *Factor de corrección debido a la variación de la distancia Tierra – Sol*

Es necesario el cálculo del factor de corrección de la distancia debido al movimiento de la tierra al rededor del Sol. La Ec. (4.4) muestra que dicha corrección es función del día juliano debido al movimiento de translación terrestre.

$$\epsilon = 1 + 0,0033 \cos \left(\frac{2\pi \cdot (\text{Día juliano})}{365,25} \right) \quad (4.4)$$

- $T_{rd}(T_L)$: *Función de transmisión difusa*

El proceso de la transmisión de la radiación solar por el paso de la atmósfera es calculado por la Ec. (4.5), donde dicho proceso es principalmente la función del factor de

turbidez de Linke y el ángulo acimutal solar.

$$T_{rd}(T_L) = -1,5843 \times 10^{-2} + 3,0543 \times 10^{-2}T_L + 3,797 \times 10^{-4}T_L^2. \quad (4.5)$$

■ $F_d(\gamma_s, T_L)$: *Función difusa angular*

ESRA, incluye en su modelo de cielo claro el componente de pérdida de radiación solar debido al ángulo acimutal solar y diversos componentes funcionales del factor de turbidez de Linke con la finalidad de acercar al modelo a valores cercanos a la realidad. La Ec. (4.6) muestra la forma de cálculo usado en este trabajo.

$$F_d(\gamma_s, T_L) = A_0 + A_1 \sin \gamma_s + A_2(\sin(\gamma_s))^2, \quad (4.6)$$

donde los coeficientes A_0 , A_1 y A_2 sólo dependen del factor de turbidez de Linke y son adimensionales, están dados por las Ecs. (4.7) - (4.9):

$$A_0 = 2,6463 \times 10^{-1} - 6,1581 \times 10^{-2}T_L + 3,1408 \times 10^{-3}T_L^2 \quad (4.7)$$

$$A_1 = 2,04402 + 1,8945 \times 10^{-2}T_L - 1,1161 \times 10^{-2}T_L^2 \quad (4.8)$$

$$A_2 = -1,3025 + 3,9231 \times 10^{-2}T_L + 8,5079 \times 10^{-3}T_L^2 \quad (4.9)$$

■ m : *Masa óptica relativa*

La Ec. (4.10) muestra la relación de la masa óptica relativa con la elevación geográfica del sitio en estudio, la altura atmosférica de Rayleigh así como el la altura solar corregida por la difracción:

$$m(\gamma_s^{true}) = \frac{\exp\left(\frac{z}{z_h}\right)}{\sin \gamma_s^{true} + 0,50572(\gamma_s^{true} + 6,07995)^{-1,6364}}, \quad (4.10)$$

donde z es la elevación del sitio y z_h es la altura de una atmósfera de Rayleigh cuyo valor es 8434.5 m. Y γ_s^{true} es la altura solar corregida por difracción mostrada en Ec.

(4.11).

$$\gamma_s^{true} = \gamma_s + \Delta\gamma_{refr}. \quad (4.11)$$

Todas las ecuaciones anteriores fueron tomadas de la referencia [34].

Diversos estudios relacionados con el modelado de la radiación difusa demuestran que este tipo de radiación esta relacionada con dos variables: el indice de claridad horario y la fracción difusa, las variables que en el modelo ESRA se ven evaluadas mediante el factor de Linke y en el caso especifico del desarrollo de la presente tesis de investigación, mediante el ángulo sólido. John Boland et al, en su estudio de la modelación de la radiación difusa solar señalaron la complejidad del cálculo con respecto al cálculo de la fracción de energía difusa y su gran dependencia al índice de claridad horario, cabe recalcar que dicha complejidad fue simplificada en el modelo elaborado en este trabajo de investigación debido a la especificación y determinación de la fracción de energía difusa por medio del ángulo sólido [35].

4.2. Metodología

En el lenguaje de MATLAB se elaboró una rutina la cual, se presenta en el apéndice A que permite calcular, primeramente, mediante la función denominada: modeloCieloCl.m la corrección de la hora, los ángulos de posición del Sol para cada día del año, el ángulo de elevación solar, irradiancia directa, irradiancia difusa e irradiancia global. Los datos de entrada para la función antes mencionada son:

- Longitud
- Latitud
- Altura
- Factor de turbidez de Linke

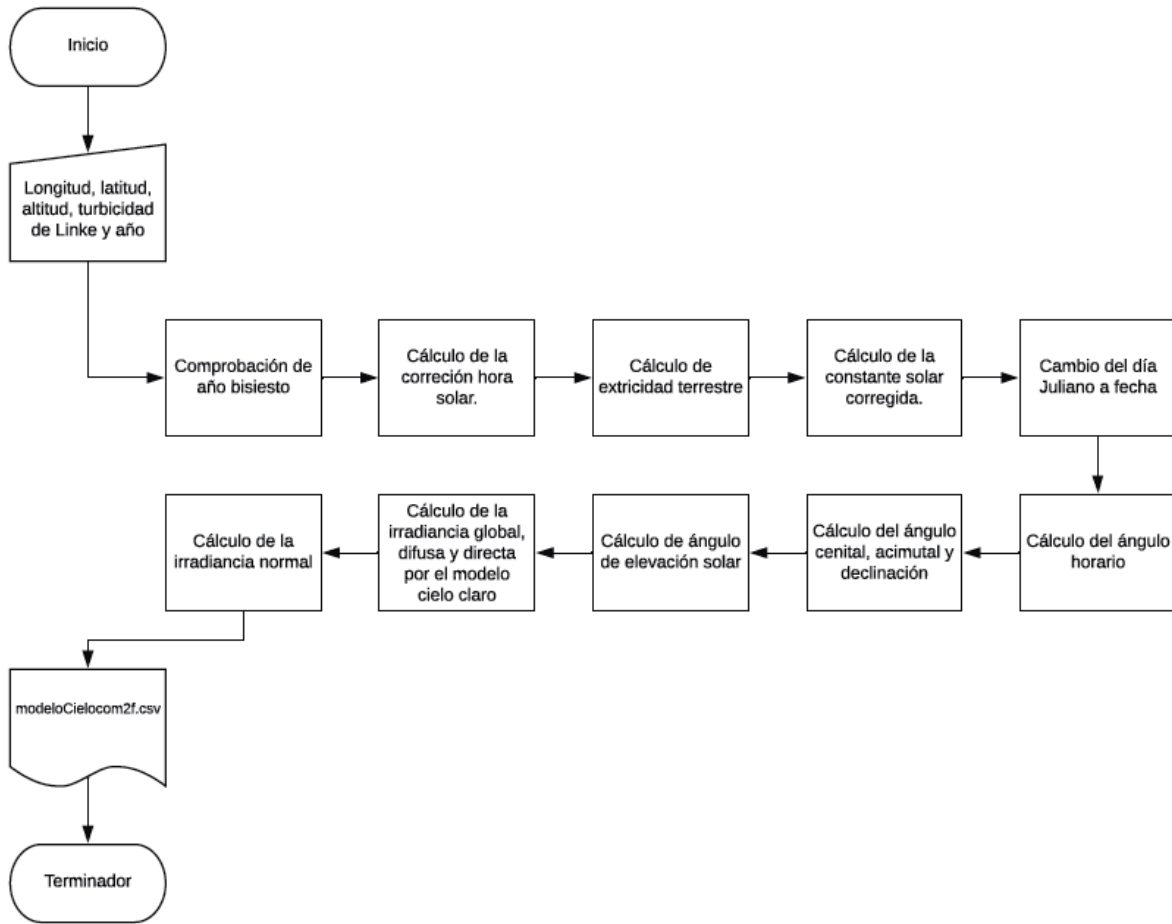


Figura 4.1: Diagrama de flujo modeloCieloCl.m.

Se muestran en el diagrama de flujo Fig. 3.1.

Una vez obtenidos los datos de radiación horizontal se procedió a realizar el cálculo de la radiación difusa inclinada. Para obtener los datos correspondientes, se elaboró otra rutina en el lenguaje de MATLAB denominada: CaptadorSolarV4_GyDNI la cual se basa en el modelo isotrópico de Liu-Jordan para el cálculo de la radiación difusa inclinada [35].

Posteriormente se implementaron las ecuaciones para este trabajo de tesis de acuerdo al

modelo ESRA, para calcular los ángulos de incidencia para cada sistema de seguimiento solar. Este ángulo, como se mencionó, es necesario para calcular la irradiancia directa inclinada.

La rutina en MATLAB estima la irradiancia global instantánea correspondiente a cada minuto que incide sobre una placa de área unitaria. Para obtener la irradiación horaria se necesita multiplicar por el factor $1/60$. Posteriormente, para calcular la radiación diaria se sumó la irradiación horaria correspondiente a las horas efectivas de luz solar; es decir, desde el amanecer hasta el anochecer.

Finalmente en este cálculo para obtener la irradiación mensual se sumó la irradiación diaria de los días correspondientes a cada mes. En la Fig. 3.2 se presenta el diagrama de flujo para la rutina: CapatadorSolarV4_GyDNI y en el Apéndice B se escriben las líneas de programación en el lenguaje MATLAB.

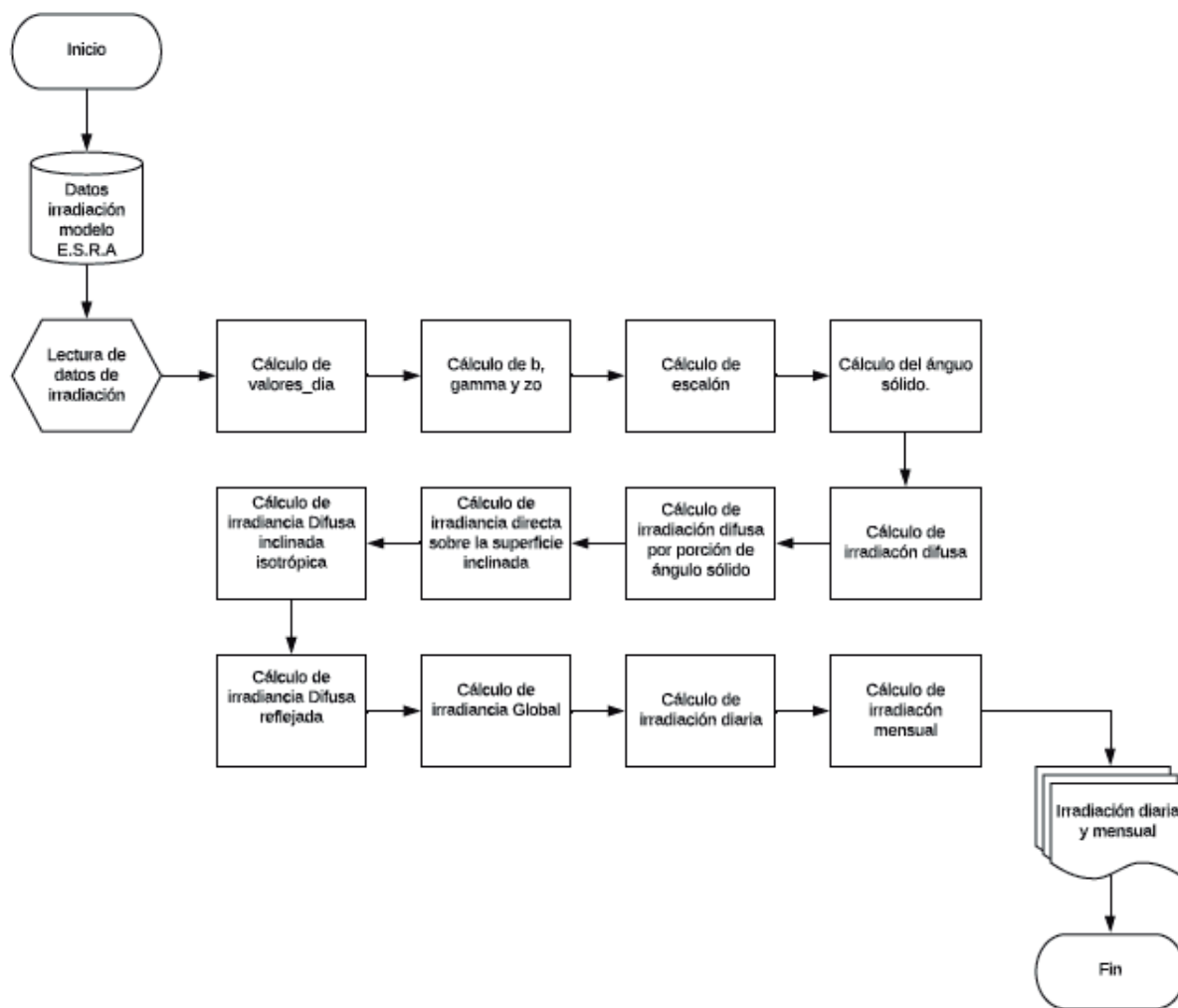


Figura 4.2: Diagrama de flujo CaptadorSolarV4_GyDNI.

Capítulo 5

Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan y se analizan los datos del cálculo obtenidos con las rutinas de programación elaboradas en el lenguaje MATLAB, esas rutinas se muestran en los Apéndices A y B de esta tesis, una vez que se procesaron los datos de irradiación solar mensual, se elaboraron tablas y se hicieron gráficas, en las que se presenta la irradiación global mensual diaria, con la finalidad de hacer el análisis correspondiente. Se hace una comparación de los datos obtenidos para cada uno de los meses del año 2019, para los diferentes esquemas del cálculo. Se analizaron los datos y también se presentan los valores en porcentaje mensual de irradiación, a manera de control, se considera el esquema de seguimiento continuo al sol en forma de heliotropo con el 100 %, esto se hace, debido a la naturaleza del mismo esquema, el cual da un seguimiento continuo al Sol y proporciona la máxima energía solar posible.

Se muestra a manera de validación, diferentes comparaciones con los datos calculados con las rutinas elaboradas en este trabajo, con respecto a los datos obtenidos de mediciones de la estación solarimétrica Zacatecas_04 ubicada en el Campus UAZ Siglo XXI, edificio 6 de la Universidad Autónoma de Zacatecas. De la misma manera se analizaron y compararon los datos obtenidos mediante un modelo similar en la Ciudad de México presentados por Ramírez en el año 2017 en su tesis para licenciatura, en la Facultad de Ciencias de la UNAM [33]. Cabe mencionar que en el trabajo de la Ref. [33] el cálculo de la irradiación solar global se presenta mediante el modelo cielo claro, con características similares a este trabajo de

investigación, la diferencia es que este trabajo está hecho para la Ciudad de Zacatecas y adicionalmente, en el modelo de este trabajo se añade un parámetro angular (ángulo sólido). El modelo establece las relaciones básicas de diversos sistemas de seguimiento solar y clarifica la importancia de su modelación con la necesidad de optimizar colectores solares. El modelo de radiación solar presentado por Ramírez [33] es punto de comparación importante, ya que se puede visualizar la aportación del modelo elaborado en el presente trabajo de investigación, es decir, en el modelo de este trabajo se añade un parámetro angular con la finalidad de obtener una mejor aproximación a la estimación de la energía difusa por el movimiento angular relacionado con el transcurso del día, así como su aproximación debido al ángulo de concentración que tiene el sol en la superficie plana, de esta manera se mejora el modelo para obtener cálculos de energía solar más precisos.

En este capítulo se presentan gráficas de irradiación promedio mensual obtenidos para los esquemas modelados. Los esquemas analizados fueron los siguientes:

- Superficie horizontal.
- Superficie inclinada con la latitud.
- Superficie con seguimiento continuo que rota sobre el eje horizontal Este-Oeste según altura solar.
- Superficie con seguimiento continuo de heliotropo, inclinada con latitud, rotación según ángulo acimutal.
- Superficie con seguimiento continuo, inclinada con latitud y rotación escalonada según ángulo acimutal.

5.1. Irradiación solar diaria promedio mensual

En esta sección se analiza la irradiación acumulada durante los días de cada mes del año 2019. De esta manera se grafican 12 valores correspondientes para cada mes del año, para cada uno de los esquemas considerados.

■ Comparación irradiación solar promedio mensual.

Los datos obtenidos de los cálculos de irradiación solar promedio diaria mensual, se presentan en la gráfica y las tablas siguientes, se ha tomado el modelo de la superficie con seguimiento continuo de heliotropo como el caso con mayor captación de irradiación, tal como se había mencionado anteriormente, esto se debe al compartamiento del mismo modelo de seguimiento escalonado solar, el cual sigue al Sol de manera constante.

La gráfica de la Fig. 5.1 y los datos que se presentan en las Tablas 5.1 y 5.2 muestran la comparación de las mediciones de irradiación solar mensual entre los 4 diferentes esquemas considerados del concentrador solar con diferentes ángulos de aceptación. Ahora se hace la descripción siguiente: En el Esquema no. 1 se consideró la superficie con seguimiento continuo de heliotropo, inclinada con latitud y rotación según el ángulo acimutal. En el Esquema no. 2 se considera que la superficie está inclinada con la latitud. Mientras que en el Esquema no. 3 la superficie está horizontal. Finalmente en el Esquema no. 4 la superficie con seguimiento continuo que rota sobre el eje horizontal Este-Oeste según la altura solar. De acuerdo con estos resultados obtenidos se puede analizar que en el mes de Enero de 2019, se presentó la mínima irradiación recibida del sol en Zacatecas y la misma irradiación aumentó gradualmente hasta que se obtuvo un máximo en el mes de Junio con excepción del esquema con inclinación a la latitud (esquema no. 3); esto debido al posicionamiento geográfico del lugar de estudio.

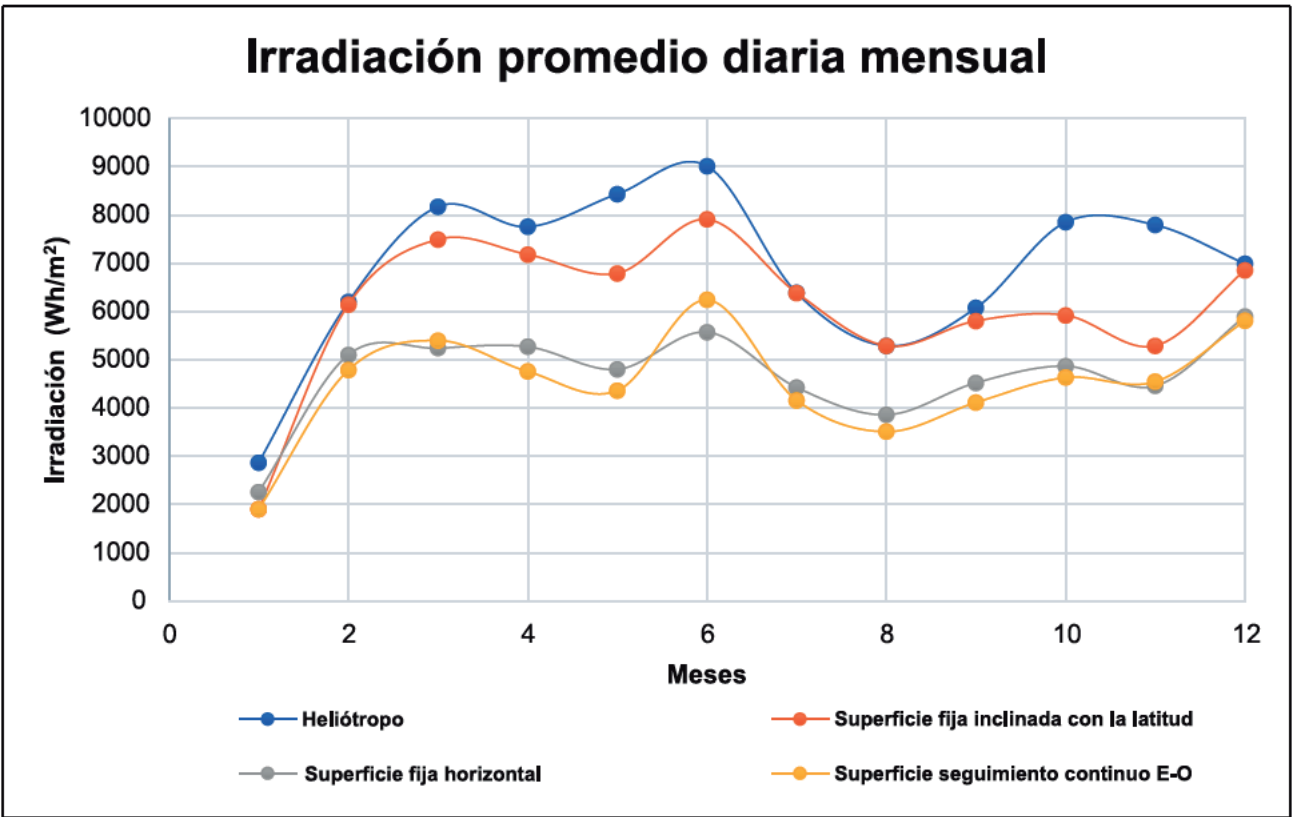


Figura 5.1: Irradiación diaria promedio mensual (Wh/m^2) para 4 esquemas considerados.

Tabla 5.1: Comparación de las mediciones de irradiación solar mensual entre los diferentes esquemas de estudio.

| Cálculo de irradiación solar promedio diaria mensual (Wh/m^2) | | | | |
|---|------------------------------|---------|---------|---------|
| Meses de 2019 | Esquemas considerados | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Enero | 2872.66 | 1906.72 | 2262.97 | 1906.71 |
| Febrero | 6203.3 | 6146.26 | 5106.37 | 4790.28 |
| Marzo | 8179.11 | 7498.06 | 5245.36 | 5404.12 |
| Abril | 7761.26 | 7185.76 | 5274.41 | 4761.58 |
| Mayo | 8440.08 | 6795.31 | 4805.54 | 4365.04 |
| Junio | 9019.17 | 7914.35 | 5576.64 | 6247.39 |
| Julio | 6390.26 | 6389.14 | 4429.59 | 4163.5 |
| Agosto | 5293.82 | 5292.4 | 3863.43 | 3513.05 |
| Septiembre | 6079.73 | 5809.55 | 4527.42 | 4119.08 |
| Octubre | 7856.49 | 5925.74 | 4872.98 | 4636.36 |
| Noviembre | 7797.28 | 5294.67 | 4462.56 | 4552.12 |
| Diciembre | 6995.93 | 6859.47 | 5903.49 | 5813.03 |

Tabla 5.2: Comparación en porcentajes de la irradiación solar alcanzada para cada uno de los esquemas considerados en este trabajo.

| Porcentajes (%) de la irradiación solar | | | | |
|--|------------------------------|-------|-------|-------|
| Meses de 2019 | Esquemas considerados | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Enero | 100 | 66.37 | 78.78 | 66.37 |
| Febrero | 100 | 87.75 | 61.83 | 69.27 |
| Marzo | 100 | 91.67 | 64.13 | 66.07 |
| Abril | 100 | 92.58 | 67.96 | 61.35 |
| Mayo | 100 | 80.51 | 56.94 | 51.72 |
| Junio | 100 | 99.08 | 82.32 | 77.22 |
| Julio | 100 | 99.98 | 69.32 | 65.15 |
| Agosto | 100 | 99.97 | 72.98 | 66.36 |
| Septiembre | 100 | 95.56 | 74.47 | 67.75 |
| Octubre | 100 | 75.42 | 62.02 | 59.01 |
| Noviembre | 100 | 67.90 | 57.23 | 58.38 |
| Diciembre | 100 | 98.05 | 84.38 | 83.09 |

- **Comparación: superficie con seguimiento continuo, inclinada con latitud y rotación escalonada según ángulo acimutal.**

A continuación se presentan las Tablas 5.3 y 5.4 para hacer el análisis y la comparación de la irradiación solar mensual obtenida para los diferentes esquemas escalonados, es decir, para diferentes intervalos de tiempo: primer esquema para 1 minuto, segundo esquema para 30 minutos, tercero para 60 minutos, cuarto para 120 minutos y finalmente el quinto esquema para 240 minutos. Con los datos obtenidos del cálculo de irradiación solar mensual se diseñó la Tabla 5.3. Posteriormente se obtuvieron los valores en porcentajes de la irradiación solar que incidió en el esquema con movimiento continuo (1 minuto) y en el movimiento escalonado para los diferentes esquemas de cada intervalo de tiempo se presentan en la Tabla 5.4, considerando el valor del porcentaje 100 % como el de la irradiación solar para los valores del esquema de seguimiento continuo, por la naturaleza del mismo, esa es la cantidad máxima de energía solar que se calculó, esto debido a la constante sincronía de emparejamiento del modelo de seguimiento solar con el Sol, presentando de esta manera una disposición precisa minuto a minuto del posicionamiento del Sol en la bóveda celeste.

El análisis que se hace comparando las Tablas 5.3 y 5.4 es el siguiente:

- a) En los cinco esquemas considerados en la Tabla 5.3 se puede observar que la diferencia, respecto al valor obtenido al esquema de seguimiento continuo, crece al aumentar el intervalo de tiempo; es decir, en el intervalo de 240 minutos se observa la máxima diferencia de irradiación solar entre todos los escalones de tiempo evaluados por el modelo propuesto. Adicionalmente, los resultados que se presentan en la Tabla 5.3 se pueden interpretar de la manera siguiente: En la Ciudad de Zacatecas (Ubicación geográfica: Latitud 22.7725 N, longitud 102.6436 E y altitud 2,240) es posible escalonar el movimiento en un intervalo de 1 a 240 minutos sin perder una cantidad considerable de energía solar. Lo anterior serviría para reducir costos en la instalación y mantenimiento de los sistemas de captación o centración solar. Esto debido a que en un seguimiento que se mueve en esquema escalonado de diferentes intervalos de tiempo, puede resultar

Tabla 5.3: Comparación de la Irradiación mensual obtenida para cinco esquemas escalonados a diferentes intervalos de tiempo.

| Mediciones de la irradiación solar diaria promedio mensual (Wh/m^2) | | | | | |
|---|---------------------------------------|-----------|-----------|------------|------------|
| Meses de 2019 | Intervalos de tiempo (minutos) | | | | |
| | 1 | 30 | 60 | 120 | 240 |
| Enero | 2262.97 | 2262.97 | 2262.97 | 2262.97 | 2262.97 |
| Febrero | 7223.34 | 7220.33 | 7210.73 | 7168.61 | 7005.76 |
| Marzo | 6525.48 | 6523.9 | 6519.28 | 6500.84 | 6415.35 |
| Abril | 6448.52 | 6446.98 | 6442.63 | 6426.61 | 6318.3 |
| Mayo | 6187.7 | 6186.39 | 6181.17 | 6172.35 | 6022.95 |
| Junio | 6629.59 | 6628.08 | 6623.46 | 6605.86 | 6530.11 |
| Julio | 5864.09 | 5861.45 | 5852.3 | 5812.14 | 5657.1 |
| Agosto | 4891.65 | 4890.71 | 4886.53 | 4881.06 | 4765.4 |
| Septiembre | 382.09 | 5380.9 | 5377.37 | 5364.49 | 5286.25 |
| Octubre | 5469.34 | 5468.04 | 5463.98 | 5448.42 | 5375.38 |
| Noviembre | 4790.75 | 4789.96 | 4787.58 | 4778.37 | 4740.45 |
| Diciembre | 6691.7 | 5690.48 | 5686.89 | 5672.63 | 5616.28 |

más barato y aún más, a pesar de esta adecuación de acuerdo al modelo, brindar una producción bastante cercana a un seguimiento continuo.

- b) En la Tabla 5.4 se muestra la diferencia entre los valores de irradiación del movimiento escalonado respecto al movimiento continuo (1 minuto) es menor al 1.5% en los intervalos de tiempo para 30, 60, 120 minutos. Es decir, los valores de irradiación solar correspondientes a estos escalones están, todos, por arriba del 99%.

Tabla 5.4: Comparación en porcentajes para superficie con seguimiento continuo, inclinada con latitud y rotación escalonada según ángulo acimutal.

| Porcentajes (%) de la irradiación solar | | | | | |
|--|---|-----------|-----------|------------|------------|
| Meses de 2019 | Escalonado, Intervalos de tiempo (minutos) | | | | |
| | 1 | 30 | 60 | 120 | 240 |
| Enero | 100 | 99.97 | 99.97 | 99.97 | 99.97 |
| Febrero | 100 | 99.98 | 99.91 | 99.64 | 98.50 |
| Marzo | 100 | 99.98 | 99.90 | 99.62 | 98.31 |
| Abril | 100 | 99.98 | 99.91 | 99.66 | 97.98 |
| Mayo | 100 | 99.98 | 99.89 | 99.75 | 97.34 |
| Junio | 100 | 99.96 | 99.83 | 99.24 | 96.99 |
| Julio | 100 | 99.95 | 99.80 | 99.11 | 96.47 |
| Agosto | 100 | 99.98 | 99.90 | 99.78 | 97.42 |
| Septiembre | 100 | 99.98 | 99.91 | 99.67 | 98.22 |
| Octubre | 100 | 99.98 | 99.90 | 99.62 | 98.28 |
| Noviembre | 100 | 99.98 | 99.93 | 99.74 | 98.95 |
| Diciembre | 100 | 85.04 | 84.98 | 84.77 | 83.93 |

5.2. Análisis comparativo de los datos obtenidos

En esta sección se presenta el análisis comparativo de los datos obtenidos con el modelo de seguimiento escalonado solar con diferentes ángulos de aceptación mediante las rutinas de MATLAB, se presentan tablas y gráficas. Se hace el análisis comparativo entre los datos medidos por la estación solarimétrica Zacatecas_04 y los datos calculados con el modelo de seguimiento escalonado solar realizado en este trabajo. De manera similar, se presentan tablas y una gráfica del análisis comparativo entre los datos solares calculados en la Facultad de Ciencias de la UNAM para la Ciudad de México y el modelo que se presenta en este trabajo de tesis para la Ciudad de Zacatecas.

Primeramente, en la Tabla 5.5 se presentan los resultados obtenidos del cálculo de irradiación solar, en su forma directa normal, difusa y global para los doce meses correspondientes al año 2019. Se realizó el análisis del comportamiento de los datos calculados y obtenidos por las rutinas programadas en lenguaje MATLAB, del modelo de seguimiento escalonado de este trabajo de tesis, con respecto a los datos medidos con los instrumentos especializados, de la estación solarimétrica Zacatecas_04, con la finalidad de encontrar la precisión de los datos obtenidos y calculados con el modelo de seguimiento escalonado, contra los datos medidos por los instrumentos solares. Cabe mencionar que los instrumentos de medición solar, están instalados en el Edificio 6 del Campus Siglo XXI de la Universidad Autónoma de Zacatecas. Estos resultados dan referencia del comportamiento en cuanto a la altura y condiciones climatológicas del sitio modelado en este trabajo de tesis. La comparación de los resultados se muestran también en la gráfica de la Fig. 5.2 con los datos medidos con la estación solarimétrica y los calculados por el modelo de seguimiento escalonado realizado en este trabajo de investigación.

Tabla 5.5: Datos de irradiación solar directa normal, difusa y global medidos en la estación solarimétrica Zacatecas_04 y los datos obtenidos con la rutina de cálculo modeloCieloCl.m para los doce meses del año 2019.

| Datos de irradiación solar (Wh/m^2) | | | | | | |
|---|---|---------------|---------------|--|---------------|---------------|
| | Instrumentos de medición Estación Zacatecas_04 | | | Rutina en MATLAB: modeloCieloCl.m | | |
| Meses de 2019 | Directa | Difusa | Global | Directa | Difusa | Global |
| Enero | 277.49 | 51.65 | 203.83 | 290.44 | 56.35 | 216.53 |
| Febrero | 330.01 | 47.25 | 250.05 | 335.56 | 60.20 | 256.03 |
| Marzo | 333.25 | 58.27 | 288.16 | 342.15 | 62.97 | 292.25 |
| Abril | 342.09 | 75.72 | 321.72 | 349.98 | 81.27 | 327.04 |
| Mayo | 348.70 | 69.99 | 333.36 | 349.36 | 78.89 | 338.15 |
| Junio | 250.52 | 97.03 | 289.45 | 256.64 | 104.92 | 294.01 |
| Julio | 238.51 | 99.85 | 275.96 | 251.21 | 100.51 | 279.05 |
| Agosto | 256.86 | 86.88 | 277.14 | 262.84 | 93.00 | 283.92 |
| Septiembre | 211.05 | 90.44 | 235.87 | 215.14 | 103.14 | 236.01 |
| Octubre | 249.10 | 71.45 | 226.52 | 254.42 | 77.43 | 230.82 |
| Noviembre | 238.02 | 56.87 | 189.74 | 242.81 | 60.96 | 193.54 |
| Diciembre | 287.43 | 40.58 | 186.63 | 291.99 | 45.90 | 189.06 |

En la Fig. 4.2 se presenta la gráfica que muestra el comportamiento de los datos calculados por el modelo en contraste a los datos medidos, es notoria la mínima diferencia entre ambas bases de datos, esto debido principalmente a las características del modelo propuesto y los datos medidos.

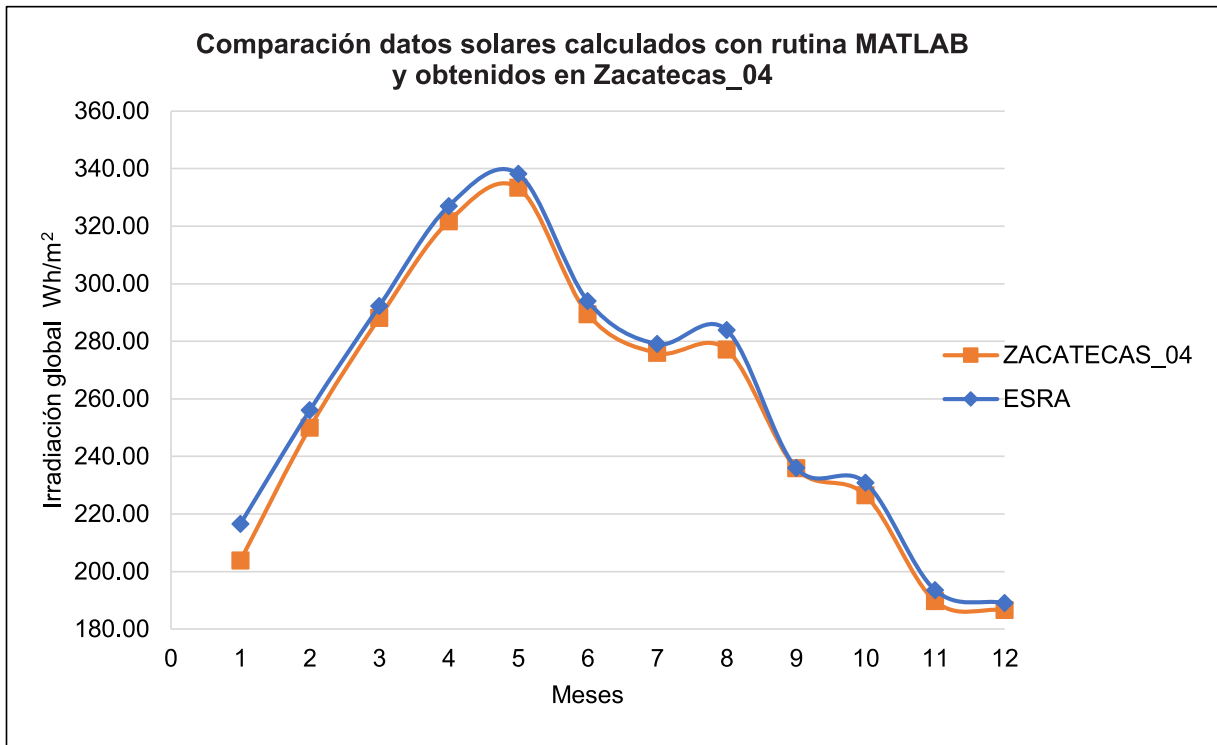


Figura 5.2: Gráfica en la que se presenta la comparación de la irradiación global (Wh/m^2) de los datos medidos por la estación solarimétrica Zacatecas_04 y los obtenidos mediante la rutina de cálculo modeloCieloCl.m.

Por otra parte, la forma porcentual de los datos obtenidos permite visualizar de una mejor manera los resultados, es decir, se presenta en la Tabla 5.6 los valores en porcentajes de la diferencia entre el modelo de seguimiento escalonado y los datos medidos en la estación solarimétrica Zacatecas_04. De manera análoga se comparó el comportamiento entre los datos calculados por el modelo solar realizado por la Facultad de Ciencias de la UNAM para la Ciudad de México y el hecho en este trabajo para la ciudad de Zacatecas y ejecutado en MATLAB para esta tesis, prestando mayor atención al comportamiento de los mismos en cuanto a su precisión al simular al Sol. En la Tabla 5.6 se puede observar que la diferencia entre los datos medidos por la estación Zacatecas_04 es mínima siendo la diferencia máxima el 0.13% para el mes de Enero y el mínimo valor de 0% para el mes de Septiembre.

Tabla 5.6: Diferencia porcentual entre los datos medidos por la estación solarimétrica Zacatecas_04 y los datos calculados con la rutina modeloCieloCl.m, para los doce meses de 2019.

| Diferencia entre los datos solares (en porcentajes %) comparados | | | |
|---|----------------|---------------|---------------|
| Meses de 2019 | Directa | Difusa | Global |
| | DNI | DIFFU | GLO |
| Enero | 0.13 | 0.05 | 0.13 |
| Febrero | 0.06 | 0.13 | 0.06 |
| Marzo | 0.09 | 0.05 | 0.04 |
| Abril | 0.08 | 0.06 | 0.05 |
| Mayo | 0.01 | 0.09 | 0.05 |
| Junio | 0.06 | 0.08 | 0.05 |
| Julio | 0.13 | 0.01 | 0.03 |
| Agosto | 0.06 | 0.06 | 0.07 |
| Septiembre | 0.04 | 0.13 | 0.00 |
| Octubre | 0.05 | 0.06 | 0.04 |
| Noviembre | 0.05 | 0.04 | 0.04 |
| Diciembre | 0.05 | 0.05 | 0.02 |

Otro resultado importante en este trabajo es el cálculo de la irradiación solar global mensual, mismo que se presenta en la Tabla 5.7, los datos obtenidos están clasificados en cuatro esquemas diferentes, a continuación se muestran los datos obtenidos para cada esquema de estudio: En el esquema no. 1 se considera la superficie con seguimiento continuo tipo heliotropo, inclinada con latitud, rotación según ángulo acimutal; mientras que en el esquema no. 2 la superficie está inclinada con respecto a la latitud; en el esquema no. 3 la superficie está horizontal y finalmente en el esquema no. 4 la superficie con seguimiento continuo que rota sobre el eje horizontal Este-Oeste, según la altura solar (2,440 m.) para la Ciudad de Zacatecas.

Tabla 5.7: Datos de irradiación global mensual entre los distintos esquemas calculados para Zacatecas altura 2,440 m por el modelo de seguimiento escalonado con la rutina Captador-SolarV4_GyDNI.m. para los doce meses de 2019.

| Mediciones de irradiación solar promedio diaria mensual (Wh/m^2) | | | | |
|--|------------------------------|---------|---------|---------|
| Meses de 2019 | Esquemas considerados | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Enero | 2872.66 | 1906.72 | 2262.97 | 1906.71 |
| Febrero | 6203.3 | 6146.26 | 5106.37 | 4790.28 |
| Marzo | 8179.11 | 7498.06 | 5245.36 | 5404.12 |
| Abril | 7761.26 | 7185.76 | 5274.41 | 4761.58 |
| Mayo | 8440.08 | 6795.31 | 4805.54 | 4365.04 |
| Junio | 9019.17 | 7914.35 | 5576.64 | 6247.39 |
| Julio | 6390.26 | 6389.14 | 4429.59 | 4163.5 |
| Agosto | 5293.82 | 5292.4 | 3863.43 | 3513.05 |
| Septiembre | 6079.73 | 5809.55 | 4527.42 | 4119.08 |
| Octubre | 7856.49 | 5925.74 | 4872.98 | 4636.36 |
| Noviembre | 7797.28 | 5294.67 | 4462.56 | 4552.12 |
| Diciembre | 6995.93 | 6859.47 | 5903.49 | 5813.03 |

Los datos mostrados en la Tabla 5.8 presentan la irradiación solar promedio diaria mensual, para la Ciudad de México con altura de 2,250 m. Para los siguientes esquemas: Primero, en el esquema no. 1 la superficie con seguimiento continuo de heliotropo, inclinada con latitud, rotación según ángulo acimutal; en el esquema no. 2 la superficie está inclinada con la latitud, mientras que en el esquema no. 3 la superficie está horizontal y finalmente en el esquema no. 4 la superficie con seguimiento continuo que rota sobre el eje horizontal Este-Oeste según la altura solar.

Tabla 5.8: Datos de irradiación global mensual entre los distintos esquemas calculados para la Ciudad de México altura 2,250 m, obtenidos con el modelo realizado en la Facultad de Ciencias de la UNAM.

| Mediciones de irradiación solar promedio diaria mensual (Wh/m^2) | | | | |
|--|------------------------------|---------|---------|---------|
| Meses de 2019 | Esquemas considerados | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Enero | 2202.66 | 792.72 | 1317.97 | 992.71 |
| Febrero | 5333.3 | 5143.26 | 4192.37 | 3978.28 |
| Marzo | 7314.11 | 6553.06 | 4433.36 | 4611.12 |
| Abril | 6818.26 | 6271.76 | 4481.41 | 3921.58 |
| Mayo | 7331.08 | 5983.31 | 3965.54 | 3695.04 |
| Junio | 8016.17 | 7121.35 | 4906.64 | 5377.39 |
| Julio | 5445.26 | 5549.14 | 3484.59 | 3249.5 |
| Agosto | 4379.82 | 4622.4 | 2949.43 | 2701.05 |
| Septiembre | 5267.73 | 4939.55 | 3715.42 | 3326.08 |
| Octubre | 7063.49 | 5060.74 | 4079.98 | 3796.36 |
| Noviembre | 6957.28 | 4351.67 | 3622.56 | 3882.12 |
| Diciembre | 5695.93 | 5750.47 | 4603.49 | 4948.03 |

En la gráfica de la Fig. 4.3 se puede observar el comportamiento de los datos calculados por el modelo elaborado por la facultad de ciencias de la UNAM y el elaborado en esta tesis, puede visualizarse la gran diferencia entre los datos obtenidos por ambos modelos esto debido principalmente a la altura y disposición geográfica de ambos sitios de estudio.

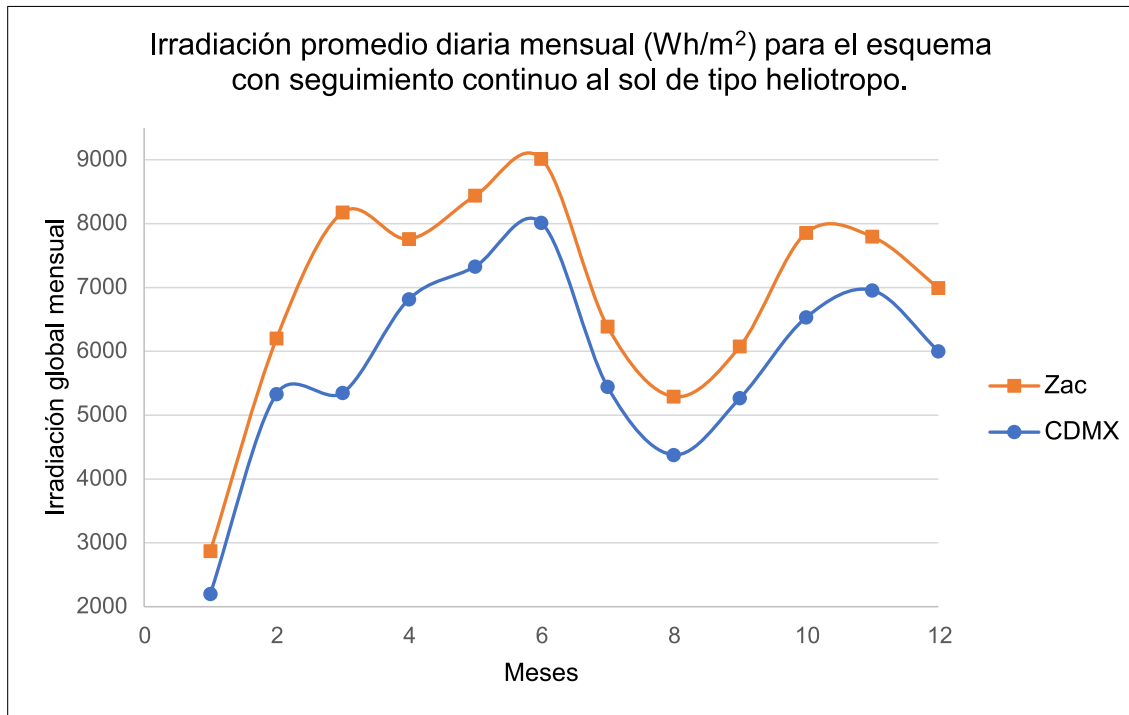


Figura 5.3: Gráfica para la comparación de irradiación solar global para el esquema con seguimiento continuo tipo heliotropo (Wh/m^2) de los datos calculados en Zacatecas (altura 2440 m) y Ciudad de México (altura 2250 m).

Los datos que se presentan en la Tabla 5.9 muestran la diferencia entre los datos calculados por los diferentes modelos en Zacatecas altura 2,440 m y CDMX con altura de 2,250 m, cabe recalcar que dichos modelos contienen similitudes en cuanto a la características del cielo claro y un parámetro de Albedo similar al utilizado en este trabajo características que permiten la comparación entre ambos modelos. En resumen la gráfica que se presenta en la Fig. 4.3 presenta el esquema de seguimiento continuo tipo heliotropo de ambos modelos (Ciudad de Zacatecas con una altura de 2,440 m y Ciudad de México con una altura de 2,250 m) tomando en cuenta que el mismo esquema representa el porcentaje de 100 % en ambos modelos. Se puede puntualizar que la máxima diferencia encontrada entre los modelos es de un valor de 13 % en el mes de Diciembre y un valor de diferencia mínimo para el mes de Enero con un valor porcentual de 6.7 %.

Tabla 5.9: Diferencia entre los datos calculados para los esquemas especificados de la Ciudad de México altura 2,250 m y Zacatecas altura 2,440 m.

| Mediciones de irradiación solar promedio diaria mensual (Wh/m^2) | | | | |
|--|------------------------------|----------|----------|----------|
| Meses | Esquemas considerados | | | |
| | 1 | 2 | 3 | 4 |
| Enero | 6.70 | 11.09 | 9.45 | 9.14 |
| Febrero | 8.70 | 10.03 | 9.14 | 8.12 |
| Marzo | 8.65 | 9.45 | 8.12 | 7.93 |
| Abril | 9.43 | 9.14 | 7.93 | 8.40 |
| Mayo | 11.09 | 8.12 | 8.40 | 6.70 |
| Junio | 10.03 | 7.93 | 6.70 | 8.70 |
| Julio | 9.45 | 8.40 | 9.45 | 9.14 |
| Agosto | 9.14 | 6.70 | 9.14 | 8.12 |
| Septiembre | 8.12 | 8.70 | 8.12 | 7.93 |
| Octubre | 7.93 | 8.65 | 7.93 | 8.40 |
| Noviembre | 8.40 | 9.43 | 8.40 | 6.70 |
| Diciembre | 13 | 11.09 | 13 | 8.65 |

Capítulo 6

Conclusiones

El presente trabajo de tesis ha sido desarrollado con la finalidad de analizar la energía solar incidente en una superficie plana con diferentes esquemas de seguimiento solar en condiciones de cielo claro, en Zacatecas capital. Al hacer la comparación de los diferentes casos de seguimiento solar y se observa lo siguiente:

- (a) Llega más cantidad de radiación solar por mes, a las superficies que cumplen con algún esquema de seguimiento del sol, con respecto a aquellas superficies que no se mueven.
- (b) La superficie a la que menos captación de radiación solar incide mensualmente es la superficie horizontal. La irradiación solar, por mes estimada para este caso se encuentra aproximadamente en un 25 % por debajo del máximo valor calculado correspondiente al seguimiento de captación solar de tipo heliotropo.

Por otra parte, al realizar la comparación entre los esquemas de la superficie con seguimiento de tipo: continuo, inclinada con latitud y rotación escalonada según ángulo acimutal, se puede apreciar que el intervalo de tiempo de 240 minutos, presenta una pérdida en la irradiación mensual estimada que se encuentra por debajo del 3.01 % en el mes que se presenta el valor máximo calculado correspondiente con el esquema de tipo continuo (1 min). El mes con mayor pérdida en el valor calculado de irradiación mensual entre los esquemas de 240 minutos y el esquema continuo corresponde con el mes de Diciembre; el valor se encuentra

por debajo del 16.07 %.

Finalmente se concluye de la manera siguiente:

- (a) El valor de irradiación solar mensual más alto se determinó para el mes de Junio de 2019, en la mayoría de los esquemas del modelo de seguimiento considerados, en el Campus UAZ Siglo XXI en Zacatecas (Ubicación geográfica: Latitud 22.7725 N, longitud 102.6436 E y altitud 2,240).
- (b) Asimismo, se encontró que el mejor seguimiento para captación de energía solar es el seguimiento de tipo heliotropo, como se esperaba, esto debido a la naturaleza del sistema de seguimiento.
- (c) Por último, tal como era de esperarse, existe una pérdida de acumulación de energía no significativa en los sistemas de seguimiento escalonado con diferentes ángulos de aceptación en intervalos de tiempo elevado (120 minutos a 240 minutos), siendo el valor de pérdida de 3.01 % con respecto al seguimiento continuo.

Respecto al análisis comparativo de los datos obtenidos se puede decir:

- (a) El modelo de cielo claro elaborado por ESRA tiene un comportamiento muy cercano a la realidad para la ubicación geográfica Latitud 22.7725 N, longitud 102.6436 E y altitud 2,240 m relacionado con el Campus UAZ Siglo XXI en Zacatecas teniendo una diferencia con los datos obtenidos por la estación solarimétrica Zacatecas_04 de 0 % para el mes de Septiembre en el año 2019 y un valor máximo de 0.13 % para el mes de Enero del mismo año.

(b) En la comparación entre los modelos de Zacatecas y CDMX se observa que dichos modelos aun con sus diferencia en altura de 190 m, dichos modelos presentan similitudes en cuanto a características del lugar como lo son la propiedad de cielo claro y un numero de Albedo casi semejante al de este trabajo de investigación. Se reporta un diferencia máxima para el esquema de seguimiento continuo de tipo heliotropo de 13% para el mes de Diciembre y un mínimo de 6.7% para el mes de Enero del año 2019.

Mencionar que dicha validación da cuerpo al modelo establecido en este trabajo esto debido al gran acercamiento y representatividad de los datos calculados por el modelo realizado en comparación con datos reales medidos por instrumentos solares, es también rescatable que dicho modelo tiene una complejidad menor a los establecidos en otros trabajos de investigación dando pauta a su uso en la optimización de instrumentos solares.

Bibliografía

- [1] Brockway, Paul E., et al. “Estimation of global final-stage energy-return-on-investment for fossil fuels with comparison to renewable energy sources.” *Nature Energy* 4.7 (2019): 612-621.
- [2] Tabrizian, Samira. “Technological innovation to achieve sustainable development Renewable energy technologies diffusion in developing countries.” *Sustainable Development* 27.3 (2019): 537-544.
- [3] Arancibia Bulnes C., et al. “Energía sola.” *CIENCIA. Revista de la Academia Mexicana de Ciencias* 61.2 (2010): 3-9,10-17.
- [4] <https://www.iea.org/news/how-solar-energy-could-be-the-largest-source-of-electricity-by-mid-century.html>
- [5] Pimentel, Luís Angel Contreras, et al. “Radiación solar en la ciudad de Zacatecas evaluada en el periodo comprendido del 01 de enero al 31 de diciembre de 2012.” *Ciencias Químicas* 1.1 (2019): 1-6.
- [6] Ibarra Delgado, S., et al. “PROYECTO DE EVALUACIÓN DE LA CAPACIDAD SOLAR Y EÓLICA EN LA REGIÓN DE ZACATECAS, MÉXICO.”
- [7] <https://www.iea.org/reports/renewable-power#renewable-power-technologies.html>
- [8] Ahmadi, A., et al. “Recent Residential Applications of low-temperature solar collector.” *Journal of Cleaner Production* (2020): 123549.

- [9] Lai, Xiaotian, et al. "Dynamic performance analysis and optimization of dish solar Stirling engine based on a modified theoretical model." *Energy* 183 (2019): 573-583.
- [10] Fernández-Ahumada, L. M., et al. "Mathematical study of the movement of solar tracking systems based on rational models." *Solar Energy* 150 (2017): 20-29.
- [11] Souza, Muriele Bester de, et al. "Determination of Diffused Irradiation from Horizontal Global Irradiation-Study for the City of Curitiba." *Brazilian Archives of Biology and Technology* 62.SPE (2019).
- [12] Gonzalez-Cabrera, Adriana E., et al. "Solar Irradiation over a Flat Surface with Different Tracking Strategies." (2018).
- [13] Sumathi, Vijayan, et al. "Solar tracking methods to maximize PV system output A review of the methods adopted in recent decade." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74 (2017): 130-138.
- [14] Huang, Cong-Hui, Heng-Yau Pan, and Kuan-Chen Lin. "Development of intelligent fuzzy controller for a two-axis solar tracking system." *Applied Sciences* 6.5 (2016): 130.
- [15] Shehzad, S. A., et al. "A useful model for solar radiation." *Energy, Ecology and Environment* 1.1 (2016): 30-38.
- [16] Ur Rehman, Naveed. "Optical-irradiance ray-tracing model for the performance analysis and optimization of a façade integrated solar collector with a flat booster reflector." *Solar Energy* 173 (2018): 1207-1215.
- [17] Duffie, John A., and William A. Beckman. "Solar engineering of thermal processes." cuarta edición. (2013).
- [18] Teumer, T., et al. "In-line Haze Monitoring Using a Spectrally Resolved Back Scattering Sensor." *Brew. Sci* (2018): 49-55.

- [19] Rigollier, Christelle, Olivier Bauer, and Lucien Wald. "On the clear sky model of the ESRA European Solar Radiation Atlas with respect to the Heliosat method." *Solar energy* 68.1 (2000): 33-48.
- [20] Ramos, Andrés, et al. "Computational Experience with Optimization for a Bulk Production Cost Model." 12th PSCC. 1996.
- [21] Moldovan, Camelia Liliana, Radu Paltinea, and Ion Visa. "Improvement of clear sky models for direct solar irradiance considering turbidity factor variable during the day." *Renewable Energy* 161 (2020): 559-569.
- [22] García Valladares, O., & Pilatowsky Figueroa, I. "Aplicaciones térmicas de la energía solar en los sectores residencial." Instituto de Energías Renovables. (2017).
- [23] Tasumi, Masahiro, Richard G. Allen, and Ricardo Trezza. "At-surface reflectance and albedo from satellite for operational calculation of land surface energy balance." *Journal of hydrologic engineering* 13.2 (2008): 51-63.
- [24] Binysh, Jack, and Gareth P. Alexander. "Maxwells theory of solid angle and the construction of knotted fields." *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* 51.38 (2018): 385202.
- [25] Angstrom, Anders. *Solar and terrestrial radiation. Report to the international commission for solar research on actinometric investigations of solar and atmospheric radiation. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 50.210 (1924): 121-126.
- [26] Mabasa, Brighton, et al. "The Ångström Prescott Regression Coefficients for Six Climatic Zones in South Africa." *Energies* 13.20 (2020): 5418.
- [27] Antonopoulos, Vassilis Z., et al. "Solar radiation estimation methods using ANN and empirical models." *Computers and Electronics in Agriculture* 160 (2019): 160-167.

- [28] Samadianfard, Saeed, et al. "Daily global solar radiation modeling using data-driven techniques and empirical equations in a semi-arid climate." *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics* 13.1 (2019): 142-157.
- [29] Zang, Haixiang, et al. "Estimation and validation of daily global solar radiation by day of the year-based models for different climates in China." *Renewable energy* 135 (2019): 984-1003.
- [30] Skeiker, Kamal. "Correlation of global solar radiation with common geographical and meteorological parameters for Damascus province, Syria." *Energy conversion and management* 47.4 (2006): 331-345.
- [31] Tiris, M., C. Tiris, and I. E. Türe. "Correlations of monthly-average daily global, diffuse and beam radiations with hours of bright sunshine in Gebze, Turkey." *Energy Conversion and Management* 37.9 (1996): 1417-1421.
- [32] Tiris, M., Ç. Tiris, and I. E. Türe. "Statistical comparison of models for estimating hourly-diffuse radiation in Gebze, Turkey." *Energy* 21.1 (1996): 67-70.
- [33] Ramírez Ramírez María Anayeli. "Irradiación solar en una superficie plana con diferentes esquemas de seguimiento del Sol." Ciudad de México : Facultad de Ciencias UNAM. Tesis de Licenciatura (2017).
- [34] Braun, J. E., and J. C. Mitchell. "Solar geometry for fixed and tracking surfaces." *Solar energy* 31.5 (1983): 439-444.
- [35] Boland, John, Barbara Ridley, and Bruce Brown. "Models of diffuse solar radiation." *Renewable Energy* 33.4 (2008): 575-584.
- [36] Liu, B., and R. Jordan. "Daily insolation on surfaces tilted towards equator." *ASHRAE J.:(United States)* 10 (1961)..

- [37] Mousazadeh, Hossein, et al. "A review of principle and sun-tracking methods for maximizing solar systems output." *Renewable and sustainable energy reviews* 13.8 (2009): 1800-1818.
- [38] Lasich, J. B. U.S. Patent No. 7,109,461. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office. (2006).
- [39] Puneet Joshi, Sudha Arora "Maximun power point tracking methodologies for solar PV systems -A review." *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 70 (2017): 1154- 1177.
- [40] Chen, Jintian, Yiwen Ma, and Zhenzhen Pang. "A mathematical model of global solar radiation to select the optimal shape and orientation of the greenhouses in southern China." *Solar Energy* 205 (2020): 380-389.
- [41] Krivoshein, Y. O., et al. "Mathematical model for calculating solar radiation on horizontal and inclined surfaces for the conditions of Yakutsk." *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*. 408.1. (2020).
- [42] Obukhov, Sergey Gennadievich, Igor Aleksandrovich Plotnikov, and V. G. Masolov. "Mathematical model of solar radiation based on climatological data from NASA SSE." *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. Vol. 363. No. 1. 2018.
- [43] Hassan, Qusay, Marek Jaszczur, and Estera Przenzak. "Mathematical model for the power generation from arbitrarily oriented photovoltaic panel." *E3S Web of Conferences*. Vol. 14. EDP Sciences, 2017.
- [44] Darhmaoui, Hassane, and Driss Lahjouji. "Latitude based model for tilt angle optimization for solar collectors in the Mediterranean region." *Energy Procedia* 42 (2013): 426-435.

Apéndice A

Cálculo de la irradiación solar

En el presente Apéndice A se muestra de manera general las líneas programadas en el programa MATLAB, específicamente, se muestra el código elaborado para el cálculo de la irradiación solar mediante el modelo de cielo claro elaborado por ESRA.

```
modeloCieloCl.m
fileID=fopen('modeloCielocom2f.csv','wt','n')
lon = -102.6432;
lat = 22.77247;
z = 2240;
TLAM2 = 3.0;
yyyy = 2019;
check = isleapyear(yyyy)
for dia= 1:365
x=2*pi*((dia-1)/365.24);
y=229.18*(0.000075+0.001868*cos(x)-0.032077*sin(x)-0.014615*cos(2*x)- 0.040849*sin(2*x));
corr=[(-90-lon)/15 + y/60];
ex = factor_distTierraSol(dia);
Io = ex*1360;
[day, mes] = julian_to_date(yyyy,dia);
```

```

for hor=7:18
for min= 00:59
TE = hor + min/60;
Tcor = TE + corr;
w = 15 * (TE - 12);
[dec, ze, az] = PosSolar_HS (lat, dia, TE);
gam = asin(((sin (dec) * sin(lat)) + (cos(dec) * cos(lat) * cos(w))));
gamma = gam * (pi/180);
[Bc, Dc, Gc]= ModeloCieloClaro(gamma,ex,TLAM2,z, Io);
sa = ze * az;
A_hlj = 0.95 * (0.4237 - 0.00821 * (6 - (2.24)^2 ));
B_hlj = 0.98 * (0.5055 - 0.00595 * (6.5 - (2.24)^2));
C_hlj = 1.02 * (0.2711 - 0.01858 * (2.5 - (2.24)^2));
TdNI = A_hlj + B_hlj * exp(-C_hlj/cos(ze));
DNI_hlj = TdNI * Io * cos(ze);
formatSpec=' %d/ %d/ %d %d: %d, %f, %f, %f, %f, %f , %f \n';
fprintf(fileID,formatSpec,mes,day,yyyy,hor,min,ze,az,DNI_hlj,Bc,Gc,Dc);
end
end
end
fclose(fileID)

```

Apéndice B

Rutinas para el cálculo de la irradiancia

En el Apéndice B se presentan las rutinas para el cálculo de la irradiancia promedio mensual y el escalonado de tiempo.

```
CaptadorSolarV4_GyDNI.m
```

```
function CaptadorSolarV4_GyDNI
```

```
%Superficie inclinada con la latitud fija
```

```
    %Columnas
```

```
% 8 9 10 11 12
```

```
% DNI DIFFHORZ GH_CALC GLOBHORZ GLOBTT
```

```
% Casos
```

```
% 1 placa fija horizontal
```

```
% 2 placa fija inclinada con la latitud
```

```
% 3 placa seguimiento continuo, rota sobre eje horizontal E-O según altura solar
```

```
% 4 placa seguimiento continuo de heliotropo, inclinada con latitud, rotación según ángulo acimutal
```

```
% 5 placa seguimiento continuo, inclinada con latitud, rotación escalonada según ángulo acimutal
```

```

Clc
Clear
lat = 22.77247;
paso_escalon = [1, 30, 60, 120240];
archivo = 'Libro1.csv';
salida = 'ClaroIntDv3.csv';
salida2 = 'ClaroIntMv3.csv';
j = 0;
valores = [];
if exist(archivo, 'file') == 2
fid = fopen(archivo,'rt');
fprintf('Cargando archivo: [%s] \n', archivo);
fprintf('linea No: \n');
fprintf(' \n');
head = fgetl(fid);
units = fgetl(fid);
tline = fgetl(fid);
while(ischar(tline) == 1)
j = j+1;
aux = sscanf(tline, '%f/ %f/ %f%f: %f, %f, %f, %f, %f, %f, %f, %f, %f, %f', [1,13]);
valores = cat(1, valores, aux);
fprintf('\b\b\b\b\b\b\b\b\b\b\n');
fprintf('%6d\n', j);
tline = fgetl(fid);
end
fprintf('Se obtuvieron datos del archivo: [%s] \n', archivo);
else
error('No existe el archivo: [%s] \n', archivo);
end

```

```

fclose (fid);
fid = fopen(salida,'wt');
fprintf(fid,'Archivo_Original: %s \n', archivo);
fprintf(fid,'Totales diarios sobre placa en [Wh/m ≤] \n');
fid2 = fopen(salida2, 'wt');
fprintf(fid2,'Archivo_Original: %s \n', archivo);
fprintf(fid2,'Irradiación mensual y promedio diario sobre placa en [Wh/m ≤] \n');
for caso = 1:5
fprintf(fid,'\n');
fprintf(fid2,'\n');
switch caso
case 1
fprintf(fid, 'placa fija horizontal \n');
fprintf(fid2, 'placa fija horizontal \n');
case 2
fprintf(fid, 'placa fija inclinada con la latitud \n');
fprintf(fid2, 'placa fija inclinada con la latitud \n');
case 3
fprintf(fid, 'placa seguimiento continuo, rota sobre eje horizontal E-O segun altura solar
\n');
fprintf(fid2, 'placa seguimiento continuo, rota sobre eje horizontal E-O segun altura solar
\n');
case 4
fprintf(fid, 'placa seguimiento tipo heliotropo \n');
fprintf(fid2, 'placa seguimiento tipo heliotropo \n');
case 5
fprintf(fid, 'placa seguimiento escalonado o continuo, inclinada con latitud, rotación segun
ngulo acimutal \n');
fprintf(fid2, 'placa seguimiento escalonado o continuo, inclinada con latitud, rotación segun

```

```

·ngulo acimutal \n');
end
if caso ==5
Calcula_irradiacion(valores, caso, lat, fid, fid2, 0);

    End
if caso == 5
m = length(paso_escalon);
for ii = 1:m
escalon = paso_escalon(ii);
Fprintf(fid,'Escalonado = %d minutos \n', escalon);
Fprintf(fid2,'Escalonado = %d minutos \n', escalon);
Calcula_irradiacion(valores, caso, lat, fid, fid2, escalon);
End
End
fprintf(fid,'\n');
fprintf(fid2,'\n');
end
fclose (fid);
fclose (fid2);
end
function [valores_dia, dt_error]= verifica_tiempo(valores_dia)
[mm, ] = size(valores_dia);
Dt_error = 0;
if mm >120
dt_error = 3;
return;
end
for nt = 1:mm-1

```

```

hora = valores_dia(nt,4);
minuto = valores_dia(nt,5);
tiempo = hora + minuto/60;
tiempo_sig = valores_dia(nt+1,4) + valores_dia(nt+1,5)/60;
dt = tiempo_sig - tiempo;
if dt >= 2/60
dt_error = 2;
return;
end
end
for nt = 1:mm-1
dt = valores_dia(nt+1,5) - valores_dia(nt,5);
if dt >= 1 - dt <= -59
dt_error = 1;
auxMat1 = valores_dia(1:nt, :);
auxMat2 = valores_dia(nt+1:mm, :);
aux(1) = valores_dia(nt,1);
aux(2) = valores_dia(nt,2);
aux(3) = valores_dia(nt,3);
dato1 = valores_dia(nt, 5);
if dato1 == 59
aux(5) = 0;
aux(4) = valores_dia(nt, 4) + 1;
else
aux(5) = valores_dia(nt, 5) + 1;
aux(4) = valores_dia(nt, 4);
end
aux(6) = ( valores_dia(nt, 6) + valores_dia(nt+1, 6) )/2;
aux(7) = ( valores_dia(nt, 7) + valores_dia(nt+1, 7) )/2;

```

```

aux(8) = ( valores_dia(nt, 8) + valores_dia(nt+1, 8) )/2;
aux(9) = ( valores_dia(nt, 9) + valores_dia(nt+1, 9) )/2;
aux(10) = ( valores_dia(nt, 10) + valores_dia(nt+1, 10) )/2;
aux(11) = ( valores_dia(nt, 11) + valores_dia(nt+1, 11) )/2;
aux(12) = ( valores_dia(nt, 12) + valores_dia(nt+1, 12) )/2;
valores_dia = auxMat1;
valores_dia = cat( 1, valores_dia, aux);
valores_dia = cat( 1, valores_dia, auxMat2);
end
end
end
function [b, gamma, zo] = pos_placa(valores_dia, P, escalon, lat)
[mm, ] = size(valores_dia);
b = zeros(mm,1);
gamma = zeros(mm,1);
ze = valores_dia(:,6);
az = valores_dia(:,7) - 180.;
switch P
case 1
b = zeros(mm,1);
gamma = zeros(mm,1);
zo = ze;
case 2
b = zeros(mm,1) + lat;
gamma = zeros(mm,1);
zo= acosd(cosd(ze).*cosd(b) + (sind(ze).*sind(b)).*cosd(az-gamma) );
case 3
b = ze;
for ii = 1:length(az)

```



```

if az(ii) <= 90
gamma(ii) = 0;
else
gamma(ii) = 180;
end
end
zo = acosd(cosd(ze).*cosd(b) + (sind(ze).*sind(b)).*cosd(az-gamma) );
case 4
b = ze;
gamma = az;
zo = zeros(mm,1);
case 5
b = b + lat;
gamma = az;
gamma = FijaEscalon(gamma, escalon);
zo = acosd(cosd(ze).*cosd(b) + (sind(ze).*sind(b)).*cosd(az-gamma) );
end
end
function gamma = FijaEscalon(gamma, escalon)
if escalon == 0 —— escalon == 1
return
end
[mm, ] = size(gamma);
Min_medio = floor(mm/2);
n_intervalos = round(mm/escalon, 0);
paridad = (n_intervalos/2 - floor(n_intervalos/2))*2;
n2 = floor(n_intervalos/2);
aux = floor(escalon/2); if paridad == 0
for nn = 0:n2-1

```

```

gam1 = gamma(min_medio + aux + escalon*nn);
gam2 = gamma(min_medio - aux - escalon*nn);
for contador = 1:escalon
aux1 = min_medio + escalon*nn + contador;
aux2 = min_medio - escalon*nn - contador;
if aux1 > mm — aux2 ¡1
break
end
gamma(aux1) = gam1;
gamma(aux2) = gam2;
end
end
end
gamma2 = gamma;
if paridad == 1
medio_escalon = floor(escalon/2);
gam1 = gamma(min_medio);
for ii = min_medio-medio_escalon : min_medio+medio_escalon
gamma2(ii) = gam1;
end
n2 = floor(n_intervalos/2);
for nn = 0:n2-1
gam1 = gamma(min_medio + escalon*(nn+1));
gam2 = gamma(min_medio - escalon*(nn+1));
for contador = 1:escalon
aux1 = min_medio+medio_escalon + escalon*nn + contador;
aux2 = min_medio-medio_escalon - escalon*nn - contador;
if aux1 > mm — aux2 ¡1
break

```

```

end
gamma2(aux1) = gam1;
gamma2(aux2) = gam2;
end
end
end
gamma = gamma2;
end
function CalculaIrradiacion(valores, caso, lat, fid, fid2, escalon)
[m, ] = size(valores);
Year_ini = valores(1,3);
Year_fin = valores(m,3);
for year = year_ini:year_fin
year_aux = valores(:,3);
ii = year_aux == year;
valores_year = valores(ii,:);
IrradiacionMes = zeros(12, 1);
for mes = 1:12
mes_aux = valores_year(:,1);
ii = find(mes_aux == mes);
if isempty(ii) == 1
continue
end
valores_mes = valores_year(ii,:);
n_dias = diasMes(year, mes);
IrradiacionDiaria = zeros(n_dias, 1);
for dia = 1:n_dias
dia_aux = valores_mes(:,2);
ii = find(dia_aux == dia);

```

```

if isempty(ii) == 1
IrradiacionDiaria(dia) = 0;
fprintf('Dia nulo \n');
continue
end
valores_dia = valores_mes(ii,:);
[m, ] = size(valores_dia);
Ze_ini = valores_dia(1, 6);
Ze_fin = valores_dia(m, 6);
fprintf(' %d %d %d ', year, mes, dia);
[valores_dia, dt_error] = verifica_tiempo(valores_dia);
if ze_ini > 87 && ze_fin > 87 && dt_error > 2
[b, gamma, zo] = pos_placa(valores_dia, caso, escalon, lat);
Else
IrradiacionDiaria(dia) = 0;
fprintf('Dia con errores: 2 \n');
continue
end
ii = find(zo(:) > 90);
b = b(ii);
gamma = gamma(ii);
zo = zo(ii);
valores_dia = valores_dia(ii, :);
DNI = valores_dia(:, 8);
Glo = valores_dia(:, 11);
ze = valores_dia(:, 6);
az = valores_dia(:, 7);
Dc = Glo - DNI.*cosd(ze);
%Calculo del ángulo sólido

```

```

sa = az.* ze;
sr = sa * (pi/180)^2; %equivalencia de los estereorradianes
por= (sr)/ (2 * pi);
ii = find(DNI(:) > 0);
DNI(ii) = 0;
Bc = DNI.*cosd(ze);
ii = find(Glo(:) > 0);
Glo(ii) = 0;
Dc = Glo - DNI.*cosd(ze);
Dc_sa = Dc.* por;
%Irradiancia directa sobre la superficie inclinada
Bc_incl = DNI.*cosd(z0);
%Irradiancia Difusa inclinada isotrópica
Dc_incl = Dc_sa.*(cosd(b) + 1)*0.5; %Modelo isotrópico de Liu
%Irradiancia Difusa reflejada (Albedo)
A_incl = (Bc + Dc_sa).*(1.-cosd(b))*0.2*0.5;
%Irradiancia Global
Irrad_minuto = Bc_incl + Dc_incl + A_incl;
IrradiacionDiaria(dia) = sum(Irrad_minuto)*1/60;
if dt_error == 0
fprintf(' %.2f error: %d\n', IrradiacionDiaria(dia), dt_error);
else
fprintf(' %.\n', IrradiacionDiaria(dia));
end
fprintf(fid, ' %d/ %02d/ %02d, %.02f, %d \n', year, mes, dia, IrradiacionDiaria(dia), dt_error);
end
IrradiacionMes(mes) = sum(IrradiacionDiaria, 'omitnan');
ii = find(IrradiacionDiaria == 0);
[aux, ] = size(ii);

```

```
IrradiacionDiaria_PromMes = IrradiacionMes(mes)/aux;
fprintf(fid2, '%d,%02d,%0.02f,%0.02f \n', year, mes, IrradiacionMes(mes), IrradiacionDiaria_PromMes);
end
end
end
```