

**Estimación Del Comportamiento De La Irradiación Solar Incidente Sobre Tres Superficies
En La Terraza Verde Del Edificio De Ingeniería Eléctrica**

Carlos Alberto Rueda Garrido

Trabajo de grado para optar por el título de:

Ingeniero Electrónico

Director:

German Alfonso Osma Pinto

Ph.D en Ingeniería

Universidad Industrial De Santander – UIS

Facultad De Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela De Ingeniería Eléctrica, Electrónica Y De Telecomunicaciones (E3T)

Bucaramanga

2020

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

Dedicatoria

A mi familia por todo su apoyo y amor durante este camino lleno de tropiezos, gracias por no perder su fe y esperanza en mí.

A mis padres y mi hermana por ser la voz de aliento en los momentos más adversos

A mi esposa Lorena Capataz por ser mi guía, compañía y maestra de vida.

Agradecimientos

A la Universidad Industrial de Santander por formarme como profesional y como persona, a mi director de tesis German Alfonso Osma Pinto por su paciencia y orientación acertada en el desarrollo de esta etapa académica, mi más grande admiración a su labor. A la escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones por todos los conocimientos fundamentados a lo largo de estos años de formación.

Contenido

| | |
|---|----|
| Introducción | 22 |
| 1. Objetivos..... | 24 |
| 1.1. Objetivo General | 24 |
| 1.2. Objetivos Específicos..... | 24 |
| 2. Identificación De Modelos Para La Estimación De Las Componentes De Irradiancia..... | 25 |
| 2.1. Componentes de irradiancia directa sobre una superficie inclinada y sobre una superficie horizontal..... | 25 |
| 2.2. Irradiancia En Superficies Inclinadas..... | 26 |
| 2.3. Descripción Del Experimento | 28 |
| 2.3.1. Estructura Y Dependencia De Expresiones Durante La Estimación | 29 |
| 2.3.2. Ubicación De Las Superficies E Información Equipos Utilizados..... | 30 |
| 2.4. Modelos Isotrópicos Para La Estimación De Las Componentes De Irradiancia Sobre Una Superficie Inclinada..... | 31 |
| 2.4.1. Liu & Jordan | 31 |
| 2.4.2. Badescu | 32 |
| 2.4.3. Koronaki | 33 |
| 2.4.4. Tian | 33 |
| 2.5. Modelos Anisotrópicos Para La Estimación De Las Componentes De Irradiancia Sobre Una Superficie Inclinada..... | 34 |
| 2.5.1. Klucher..... | 34 |
| 2.5.2. Hay & Davies..... | 36 |
| 2.5.3. Reindl..... | 37 |
| 2.6. Cuadro Sinóptico De Modelos Formulados Y Modelos Utilizados En La Estimación. 38 | |
| 3. Comparación De Las Componentes De Irradiancia Obtenidas Según Modelos Descritos ... | 39 |
| 3.1. Diagrama De Flujo Para Las Mediciones, Cálculos Y Estimaciones De Irradiancia. ... | 40 |
| 3.1.1. Diagrama de flujo para estimación a través de los modelos isotrópicos | 40 |
| 3.2. Comparación De Las Componentes Usando Los Modelos Isotrópicos..... | 40 |
| 3.2.1. Estimaciones Para El 26/02/2020 (10:49h, 12:18h, 16:00h) | 43 |
| 3.2.2. Graficas Del Comportamiento De Las Componentes Estimadas A Través Del Tiempo Para Cada Modelo Utilizado. | 45 |
| 4. Caracterización Del Potencial Solar Incidente Sobre La Terraza Superior Del Edificio De Ingeniería Eléctrica. | 50 |

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

| | | |
|--------|--|----|
| 4.1. | Posibles Fallas Del Método Estimativo Implementado | 50 |
| 4.1.1. | Recolección De Datos Incorrecta..... | 51 |
| 4.1.2. | Fallas Lógicas En La Metodología Implementada | 51 |
| 4.1.3. | Argumentos De Entrada Insuficientes | 51 |
| 4.2. | Mejoras Propuestas Para El Proceso Estimativo..... | 51 |
| 4.2.1. | Validación De Datos Capturados Por Los Radiómetros..... | 52 |
| 4.2.2. | Pruebas Piloto De Comparación Estimativa | 52 |
| 4.2.3. | Validación De Las Condiciones De Los Modelos Seleccionados | 52 |
| 4.2.4. | Validación De Las Características De Los Equipos De Sensado A Utilizar | 53 |
| 4.2.5. | Consideración De Los Posibles Efectos De Obstáculos Circundantes..... | 53 |
| 4.2.6. | Medición Del Albedo Local..... | 53 |
| 5. | Conclusiones..... | 54 |
| | Referencias Bibliográficas | 56 |
| | Apéndices..... | 58 |

Lista De Ecuaciones

| | |
|---|----|
| Ecuación 1 Expresión general irradiancias | 11 |
| Ecuación 2 Expresión que describe el ángulo azimut de las superficies | 11 |
| Ecuación 3 Expresión para la declinación | 14 |
| Ecuación 4 Expresión para el ángulo del día | 14 |
| Ecuación 5 Expresión ángulo horario | 14 |
| Ecuación 6 Ángulo entre los rayos del sol y una superficie horizontal | 15 |
| Ecuación 7 Excentricidad de la tierra | 16 |
| Ecuación 8 Expresión para la irradiancia solar horaria | 16 |
| Ecuación 9 Error promedio de sesgo | 18 |
| Ecuación 10 Error cuadrático medio..... | 18 |
| Ecuación 11 Error de correlación líneal..... | 19 |
| Ecuación 12 Componete de irradiancia directa sobre una superficie | 25 |
| Ecuación 13 Irradiancia directa sobre una superficie horizontal | 26 |
| Ecuación 14 Componentes de irradiancia sobre una superficie inclinada..... | 27 |
| Ecuación 15 Irradiancia difusa sobre una superficie según Liu&Jordan..... | 32 |
| Ecuación 16Irradiancia total incidente según Liu&Jordan..... | 32 |
| Ecuación 17 Irradiancia difusa según Badecu | 32 |
| Ecuación 18 Irradiancia total incidente según Badescu..... | 33 |
| Ecuación 19 Irradiancia difusa según Koronaki | 33 |
| Ecuación 20 Irradiancia total incidente según Koronaki | 33 |
| Ecuación 21 Irradiancia difusa según Tian..... | 33 |
| Ecuación 22 Irradiancia total incidente según Tian..... | 34 |
| Ecuación 23 Irradiancia difusa según Kluucher | 35 |
| Ecuación 24 Factor de nubosidad | 35 |
| Ecuación 25Irradiancia total incidente según Klucher | 35 |
| Ecuación 26 Irradiancia difusa según Hay&Davies | 36 |
| Ecuación 27 Factor de anisotropía..... | 36 |
| Ecuación 28 Factor de reflectancia..... | 36 |
| Ecuación 29 Irradiancia total incidente según Hay&Davies | 37 |
| Ecuación 30 Irradiancia difusa según Reindl..... | 37 |
| Ecuación 31 Irradiancia total incidente según Reindl..... | 37 |

Lista De Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1 relaciones angulares existentes en una superficie irradiada | 12 |
| Figura 2 Componentes de irradiación sobre una superficie inclinada | 26 |
| Figura 3 Componentes de irradiación sobre una superficie horizontal..... | 26 |
| Figura 4 Componentes de la irradiancia difusa..... | 28 |
| Figura 5 Diagrama lógico general para la estimación de componentes DNI, DHI Y GHI usando Modelos Isotrópicos | 30 |
| Figura 6 Terraza verde superior Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones | 30 |
| Figura 7 Datalogger XR5 Especificaciones principales | 31 |
| Figura 8 Cuadro sinóptico - Modelos formulados e identificados para la estimación..... | 38 |
| Figura 9 Diagrama de flujo para la estimación de las componentes de irradiancia a partir de los modelos isotrópicos | 40 |
| Figura 10 Estimación de las componentes DNI, DHI Y GHI en el periodo de [09:00h-18:30h] del 26/02/2020 usando el método de Liu & Jordan..... | 45 |
| Figura 11 Estimación de las componentes DNI, DHI Y GHI en el periodo de [09:00h-18:30h] del 26/02/2020 usando el método de Badescu | 46 |
| Figura 12 Estimación de las componentes DNI, DHI Y GHI en el periodo de [09:00h-18:30h] del 26/02/2020 usando el método de Koronaki..... | 47 |
| Figura 13 Estimación de las componentes DNI, DHI Y G HI en el periodo de [09:00h-18:30h] del 26/02/2020 usando el método de Tian..... | 48 |

Lista de Apéndices

| | |
|---|----|
| Apéndice A Parametros a la posición de las superficies..... | 58 |
| Apéndice B Parámetros de los piranómetros utilizados | 59 |
| Apéndice C Procesos de calibración recomendados..... | 69 |
| Apéndice D Características electrónicas del piranómetro utilizado | 72 |

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

Lista De Tablas

| | |
|--|----|
| Tabla 1 Estimaciones de las componentes de irradiancia 26/02/2020, 10:49, 12:18 y 16:00 horas | 43 |
|--|----|

Nomenclatura Y Definiciones

Componentes de la irradiación solar

- Irradiancia

flujo de radiación recibida por una superficie por unidad de área proveniente del sol la cual se mide comúnmente en W/m^2

- Irradiancia Normal Directa [DNI]

Es el promedio de irradiación solar perpendicular (normal) por unidad de área recibida por una superficie producto de la irradiación directa del sol en su posición actual sobre la bóveda celeste.

- Irradiancia Horizontal Difusa [DHI]

Promedio de irradiación solar por unidad de área recibida por una superficie después de que esta ha atravesado la atmosfera y ha sido reflejada por las partículas, nubes y demás obstáculos presentes durante su trayectoria directa.

- Irradiancia Global Horizontal [GHI]

Promedio de irradiación solar recibida por una superficie proveniente de la bóveda celeste que lo rodea, esta comprende la Irradiación Normal Directa, el factor de corrección angular de incidencia sobre la superficie y la Irradiancia Horizontal Difusa. Expresando esta relación matemáticamente como:

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

$$GHI = DHI + DNI * \cos\theta$$

Ecuación 1 Expresión general irradiancias

$$\begin{aligned} \cos\theta = & \sin\varphi\sin\delta\cos\beta - \cos\varphi\sin\delta\sin\beta\cos Z_s + \cos\varphi\cos\delta\cos w\cos\beta \\ & + \sin\varphi\cos\delta\cos w\sin\beta\cos Z_s + \cos\delta\sin w\sin\beta\sin Z_s \end{aligned}$$

Ecuación 2 Expresión que describe el ángulo azimut de las superficies

Donde:

θ = Ángulo zenit solar superficie inclinada.

Z_s = Ángulo azimut de superficie irradiada.

- **Parámetros útiles para la estimación de las componentes de irradiación solar sobre una superficie**

El siguiente diagrama muestra las diferentes relaciones angulares de interés vinculadas a los diferentes modelos que describen el comportamiento de la irradiancia sobre una superficie (Kalogirou, 2014).

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

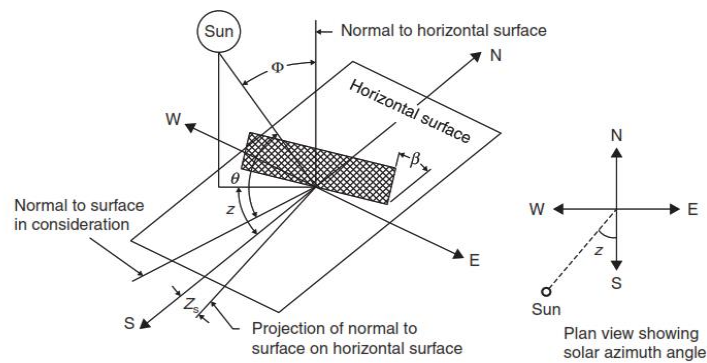


Figura 1 relaciones angulares existentes en una superficie irradiada

- **Ángulo azimut de superficie irradiada [Z_s]**

Ángulo existente entre la proyección del vector normal a la superficie irradiada sobre la superficie horizontal y el sur verdadero en sentido horario (Kalogirou, 2014).

- **Ángulo zenit solar superficie inclinada [θ]**

Ángulo existente entre el eje perpendicular a la superficie inclinada irradiada y la irradiación directa proveniente del sol (Kalogirou, 2014).

- **Ángulo zenit solar superficie horizontal [Φ]**

Ángulo existente entre el eje perpendicular a la superficie horizontal irradiada y la irradiación directa proveniente del sol ($\theta = \Phi$ si la superficie está posicionada horizontalmente) (Kalogirou, 2014).

- **Ángulo de inclinación de las superficies irradiadas [β]**

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

Ángulo entre la superficie irradiada por los rayos solares y el eje de referencia paralelo a la superficie de la tierra.

- **Latitud [φ]**

Distancia o medida angular desde un punto particular de la superficie terrestre hasta el plano perpendicular al eje rotacional del planeta tierra o ecuador, esta medida varía entre $[0^\circ - 90^\circ]$ considerándose como 0° en el ecuador y $\pm 90^\circ$ en los polos (90° Oeste y -90° Este) (Maleki, Hizam, & Gomes, 2017).

- **Longitud**

Es la distancia o medida angular desde un punto particular de la superficie terrestre en dirección este u oeste hasta el meridiano referencia (meridiano de Greenwich).

- **Albedo [ρ]**

Cantidad de irradiancia reflejada por la superficie de la tierra medida porcentualmente.

- **Declinación [δ]**

Distancia angular entre el sol y el ecuador terrestre, es conocido también como el parámetro estacional ya que de este depende el comportamiento estacional del planeta en sus diferentes conjuntos de latitudes y longitudes (Maleki, Hizam, & Gomes, 2017). Este parámetro se puede obtener de la siguiente expresión.

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

$$\delta = (0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma) \left(\frac{180}{\pi}\right) [^\circ]$$

Ecuación 3 Expresión para la declinación

Donde:

Γ = Ángulo del día

$$\Gamma = 2\pi \left(\frac{n-1}{365}\right) [rad]$$

Ecuación 4 Expresión para el ángulo del día

Se debe considerar que, n es el número de día del año, el primero de enero es el día número uno del año, febrero tiene 28 días y el treinta y uno de diciembre es el día 365.

- **Ángulo horario**[w]

Ángulo que indica la rotación de la tierra sobre su eje polar, se debe tener en cuenta que el origen para la medición de este ángulo es el medio día solar, aumentando positivamente en el sentido en el que se desplaza este astro 15° cada hora (Maleki, Hizam, & Gomes, 2017). Este se define como:

$$w = (hora\ solar - 12) * 15 [^\circ]$$

Ecuación 5 Expresión ángulo horario

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

Donde:

Hora solar : número de horas transcurridas desde las 00:00h del día en cuestión.

- **Constante solar** [I_{SC}]

Constante que hace referencia a la densidad de flujo de irradiación electromagnética solar por unidad de área, es decir, es la cantidad promedio de irradiación solar percibida por una superficie sobre la faz de la tierra (Maleki, Hizam, & Gomes, 2017). El valor de esta constante es de 1367 W/m².

- **Altitud solar** [h]

Ángulo entre los rayos del sol y una superficie horizontal.

$$h = \sin^{-1}(\sin \delta \sin \varphi + \cos \delta \cos \varphi \cos w)[^\circ]$$

Ecuación 6 Ángulo entre los rayos del sol y una superficie horizontal

- **Factor de corrección de excentricidad de la tierra** [E_0]

Es un factor que tiene en cuenta la trayectoria elíptica de la tierra alrededor del sol, esta expresión mejora la estimación de la distancia que existe entre la superficie de la tierra y el astro solar, para que así se pueda determinar la distancia entre la tierra y el sol en tanto a los días transcurridos durante ese año (Reindl, Beckman, & Due, 1990). Este factor se describe de la siguiente manera.

$$E_0 = 1 + 0.0033 \cos \left(\frac{2\pi n}{365} \right)$$

Ecuación 7 Excentricidad de la tierra

Como se mencionó previamente, n es el número de día del año, el primero de enero es el día número uno del año, febrero tiene 28 días y el treinta y uno de diciembre es el día 365.

- **Irradiación solar horaria**

Es la irradiación solar total durante un periodo de tiempo determinado sobre una superficie en la parte superior de la atmosfera terrestre, en otras palabras, es la cantidad de energía solar que recibe una superficie teórica de 1m² que es tangente a la superficie atmosférica de la tierra (Maleki, Hizam, & Gomes, 2017), definida matemáticamente a continuación.

$$I_0 = \frac{12 * 3.6}{\pi} I_{sc} E_0 * ((\sin\varphi \cos\delta) * (\sin w_2 - \sin w_1) + \frac{\pi(w_2 - w_1)}{180} (\sin\varphi \cos\delta))$$

Ecuación 8 Expresión para la irradiancia solar horaria

Donde:

I_{sc} =Constante solar 1367 W/m²

E_0 =Factor de corrección de excentricidad de la tierra.

$W_{1,2}$ = Ángulos horarios de inicio y finalización del intervalo temporal.

- **Irradiancia directa sobre la superficie inclinada [I_B]**

Irradiancia que llega directamente desde la bóveda celeste hasta la superficie inclinada.

- **Irradiancia reflejada por el suelo sobre la superficie inclinada [I_G]**

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

Irradiancia que viaja desde la bóveda celeste, impacta con la superficie de la tierra e irradia la superficie inclinada.

- **Irradiancia difusa sobre la superficie inclinada [$I_{D\beta}$]**

Irradiancia proveniente de la bóveda celeste que es reflejada por las partículas presentes en el ambiente, la superficie terrestre, nubes y demás que luego irradian la superficie inclinada de interés.

- **Índices de error para evaluar la calidad de las estimaciones.**

Para determinar qué tan fiables son los valores estimados a través de los modelos que describen el comportamiento de las componentes de irradiancia solar sobre las superficies inclinadas, es necesario expresar sus desviaciones. En ese sentido y con estos indicadores, es posible determinar qué tan indicado es un modelo u otro para estimar las componentes de irradiancia de interés sobre las superficies irradiadas, así mismo, es una herramienta que permite monitorizar el estado de la estimación dando alertas tempranas de fallas en el dispositivo de medida o fallas asociadas a agentes externos. Es de aclarar que para poder medir estos índices se requiere de un valor real de las componentes medidas con un dispositivo calibrado que permita determinar los i -ésimos valores reales a usar en la comparación.

- **Error promedio de sesgo**

El primer índice a calcular con el que se evaluara la calidad de las estimaciones se denomina error promedio de sesgo (MBE) el cual indica la desviación promedio entre los datos estimados y los datos obtenidos, este índice se obtiene a partir de la siguiente expresión:

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

$$MBE = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)}{N} * 100[\%]$$

Ecuación 9 Error promedio de sesgo

Donde:

y_i = i-esimo valor de irradiancia estimado;

x_i = i-esimo valor de irradiancia medido;

N= número total de datos adquiridos;

Consecuentemente un modelo presentara mayor exactitud si su error promedio de sesgo tiende a 0.

- **Error cuadrático medio**

Este índice representa la variación existente entre los valores estimados y los valores medidos y se expresa de la siguiente manera:

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - x_i)^2}{N}} * 100[\%]$$

Ecuación 10 Error cuadrático medio

- **Error de correlación lineal**

Este índice evalúa la relación lineal existente entre los valores estimados y los valores medidos, en este caso un error de correlación lineal cercano a uno indica la proximidad entre los datos medidos y los datos estimados. Este se puede obtener de la siguiente expresión:

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})(x_i - \bar{x})}{\sqrt{[\sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2][\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2]}}$$

Ecuación 11 Error de correlación líneal

Resumen

Título: Estimación Del Comportamiento De La Irradiación Solar Incidente Sobre Tres Superficies En La Terraza Verde Del Edificio De Ingeniería Eléctrica*

Autor:

Carlos Alberto Rueda Garrido**

Palabras claves: Irradiancia solar, Piranómetro, Paneles fotovoltaicos, Modelos de Irradiancia, Estimación de Irradiancia.

Descripción

La Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones (E3T) de la Universidad Industrial de Santander (UIS) cuenta con una terraza verde en el Edificio de Ingeniería Eléctrica, con el fin de adelantar diversas actividades de investigación, como la caracterización del potencial solar y el comportamiento de las componentes de irradiación solar.

Para alcanzar este objetivo el desarrollo de este estudio estimo el comportamiento de la Irradiancia solar Normal Directa (DNI) e Irradiancia solar Horizontal Difusa (DHI) sobre dos superficies fotovoltaicas inclinadas a partir de la irradiancia solar sobre una superficie horizontal. Variando, para el caso de las superficies inclinadas su inclinación, orientación y las condiciones climáticas inherentes a su posición geográfica.

En esta estimación también se abordó el análisis de los métodos para determinar patrones de comportamiento de la irradiancia en los tres paneles fotovoltaicos del Edificio de Ingeniería Eléctrica. Los resultados de esta información estarán disponibles para fines académicos, de monitorización e investigación propios del Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica GISEL, es decir, los valores estimados de irradiancia normal directa (DNI) e irradiancia solar horizontal difusa (DHI) a partir de la información captada por los piranómetros y procesada por los métodos seleccionados, estará disponible para el análisis y estudio de la comunidad UIS.

*Trabajo de grado

**Facultad de Ingenierías Físico Mecánicas. Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Director German Alfonso Osma Pinto

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

Abstract

Title: Estimate Of The Behavior Of Incident Solar Irradiation On Three Surfaces On The Green Terrace Of The Electrical Engineering Building

Author:

Carlos Alberto Rueda Garrido

Keywords: Solar irradiance, Pyranometer, Photovoltaic panels, Irradiance Models, Irradiance Estimation.

Description

The School of Electrical, Electronic and Telecommunications Engineering (E3T) of the Industrial University of Santander (UIS) has a green terrace in the Electrical Engineering Building, in order to carry out various research activities, such as the characterization of the solar potential and the behavior of the components of solar irradiation.

To achieve this objective, the development of this study estimated the behavior of Direct Normal Solar Irradiance (DNI) and Diffuse Horizontal Solar Irradiance (DHI) on two inclined photovoltaic surfaces from solar irradiance on a horizontal surface. Varying, in the case of inclined surfaces, their inclination, orientation and the climatic conditions inherent to their geographical position.

This estimate also addressed the analysis of the methods to determine irradiance behavior patterns in the three photovoltaic panels of the Electrical Engineering Building. The results of this information will be available for academic, monitoring and research purposes of the GISEL Electric Power Systems Research Group, that is, the estimated values of direct normal irradiance (DNI) and diffuse horizontal solar irradiance (DHI) from of the information captured by the pyranometers and processed by the selected methods, will be available for analysis and study by the UIS community.

Introducción

El edificio de Ingeniería Eléctrica de la Universidad Industrial de Santander cuenta con una terraza verde en la cual están dispuestas múltiples superficies fotovoltaicas las cuales son constantemente irradiadas por los astros. En la actualidad el Semillero de Investigación en Generación Distribuida (SIGED) vinculado al Grupo de Investigación en Sistemas de Energía Eléctrica (GISEL) de la Universidad Industrial de Santander pretende estimar y caracterizar las componentes de irradiancia recibida para al menos tres de estas superficies partiendo de la medición de la irradiancia total sobre estas.

En ese sentido, esta investigación aborda la búsqueda, descripción y validación de aquellos modelos matemáticos que permitan calcular las componentes de Irradiancia solar Horizontal Difusa (DHI) e Irradiancia solar Normal Directa (DNI) a partir de datos geográficos y angulares conocidos de las superficies de interés.

Inicialmente se exponen y describen aquellos modelos matemáticos disponibles en la bibliografía que detallan el comportamiento de la irradiancia total incidente sobre una superficie y que además con datos previamente medidos de irradiancia total sobre ella sea posible obtener las componentes que la conforman a través de arreglos matemáticos. Una vez obtenida y validada la información de las componentes de irradiancia que componen la irradiancia total sobre las superficies se desarrolla un análisis que compara los valores obtenidos en dos de las superficies para al menos dos modelos identificados con el fin de interpretar, describir y cuantificar el aporte de cada una de las componentes de irradiancia sobre las superficies estudiadas. En ese sentido y con la información previamente medida y estimada se caracteriza el potencial solar incidente sobre

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

la terraza del Edificio de Ingeniería Eléctrica para un periodo de tiempo determinado bajo las condiciones descritas por los modelos utilizados.

El potencial solar es un recurso energético de amplia disponibilidad y que de ser estudiado y caracterizado correctamente puede convertirse en una solución energética alternativa para las diferentes edificaciones de la UIS, es por esto que la estimación, caracterización y publicación de la información de este recurso resulta ser de interés general para la comunidad académica, lo cual, fundamenta la motivación de esta investigación, sus alcances y justificación.

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

1. Objetivos

1.1. Objetivo General

- Estimar las componentes de irradiancia solar normal directa (DNI) e irradiancia solar horizontal difusa (DHI) sobre tres superficies fotovoltaicas inclinadas ubicadas en la terraza verde del Edificio de Ingeniería Eléctrica.

1.2. Objetivos Específicos

- Identificar modelos matemáticos para la estimación de las componentes de Irradiancia solar Horizontal Difusa e Irradiancia solar Normal Directa sobre una superficie inclinada.
- Comparar los valores de las componentes de Irradiancia solar Normal Directa (DNI) e Irradiancia solar Horizontal Difusa (DHI) obtenidos para una superficie a partir de al menos dos modelos identificados.
- Caracterizar el potencial solar incidente sobre la terraza superior del Edificio de Ingeniería Eléctrica

2. Identificación De Modelos Para La Estimación De Las Componentes De Irradiancia

Considerando la información disponible para la estimación de las componentes de irradiancia solar a partir de modelos matemáticos, se inicia la búsqueda de aquellos que usen total o parcialmente dicha información con el fin de obtener las componentes de interés.

En la literatura es posible encontrar modelos matemáticos que permiten obtener las componentes de la irradiancia solar que inciden sobre una superficie, algunos de estos modelos permiten estimar las componentes de irradiancia solar en tanto a la geometría de la superficie irradiada, la climatología de la ubicación geográfica donde se encuentra la superficie irradiada, la ubicación astronómica del sol en un momento particular del año, etc. Entre otras cualidades o parámetros que hacen que el modelo tienda más a la isotropía o a la anisotropía.

Es así que previo a la selección de los modelos se debe consolidar la información de entrada para determinar la viabilidad de la estimación.

2.1. Componentes de irradiancia directa sobre una superficie inclinada y sobre una superficie horizontal

La irradiancia directa en una superficie inclinada conserva una relación con la DNI y el ángulo zenit solar de la superficie inclinada descrita por la siguiente expresión y diagrama:

$$G_{Bt} = DNI * \cos(\theta)$$

Ecuación 12 Componente de irradiancia directa sobre una superficie

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

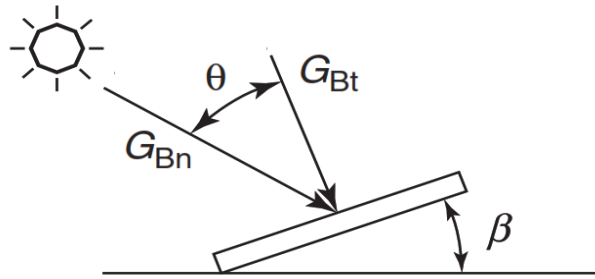


Figura 2 Componentes de irradiación sobre una superficie inclinada

Esta misma relación se extrapola a las superficies horizontales considerando su descripción y diagramación de la siguiente manera:

$$G_B = DNI * \text{COS}(\Phi)$$

Ecuación 13 Irradiancia directa sobre una superficie horizontal

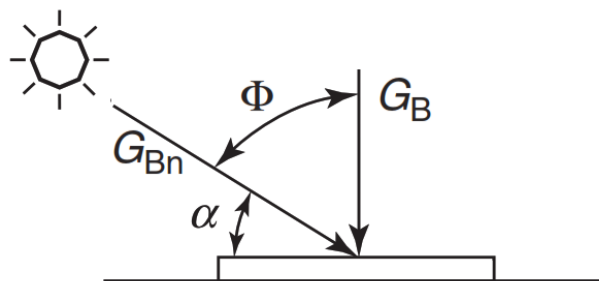


Figura 3 Componentes de irradiación sobre una superficie horizontal

2.2. Irradiancia En Superficies Inclinadas

Comparadas con las superficies horizontales, las superficies irradiadas e inclinadas alcanzan una mayor irradiación por parte de las componentes de irradiancia reflejada por el suelo, irradiancia horizontal difusa e irradiancia normal directa, Esto obedece a la dependencia angular

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

que existe en las componentes de irradiancia que inciden en la superficie inclinada, es decir, que existe cierta posición angular en la que la superficie en mención recibe un máximo nivel de irradiación. A estas condiciones donde no se obtienen el mayor nivel de irradiación solar se les conoce como pérdidas por coseno y reflexión, estas dependen de múltiples factores, pero principalmente se deben a la posición angular del sol desde el punto en el que está siendo irradiada la superficie sobre la tierra (Kalogirou, 2014).

A continuación, se detalla la expresión general que define la irradiancia total sobre una superficie inclinada:

$$I_{T\beta} = I_B + I_G + I_{D\beta}$$

Ecuación 14 Componentes de irradiancia sobre una superficie inclinada

El siguiente paso es la búsqueda de modelos aplicables usando la información conocida de las superficies. Seguidamente se debe evaluar si los parámetros de entrada son suficientes para realizar una estimación válida con las condiciones inherentes al modelo, de ser así el modelo es válido para las condiciones particulares de la superficie irradiada y puede usarse para obtener la estimación de la componente deseada. Esta condición debe ser evaluada para cada uno de los modelos con los que se pretenda realizar la estimación con el fin de determinar el set de modelos que cumplen con las necesidades particulares de la estimación requerida.

A continuación, se describen las componentes de la irradiancia difusa sobre una superficie inclinada, considerando que esta es la que presenta el mayor reto para los modelos que pretenden describir el comportamiento total de una superficie irradiada.

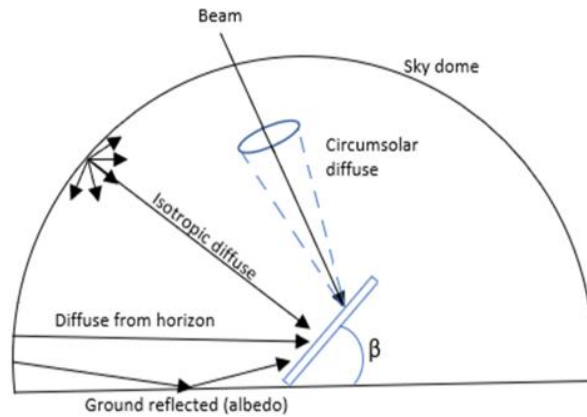


Figura 4 Componentes de la irradiación difusa

2.3. Descripción Del Experimento

La estimación de la irradiación solar sobre las dos superficies fotovoltaicas dispuestas en la terraza verde del Edificio de Ingeniería Eléctrica se obtendrá a partir de información previa de la irradiación solar total sobre las dos superficies inclinadas y de la irradiación solar total sobre una superficie horizontal.

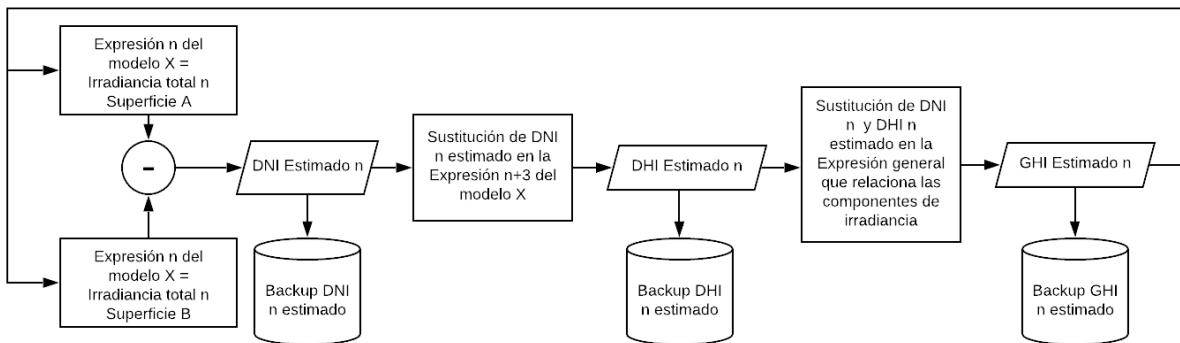
Actualmente existen modelos matemáticos que describen la interacción de las diferentes componentes de la irradiación solar que llega a la tierra, la diferencia entre los modelos radica principalmente en la forma de estimar la componente de Irradiación solar Difusa Horizontal (DHI) y los coeficientes de anisotropía que se añaden para mejorar o complementar los modelos, en ese sentido, usando las ecuaciones proporcionadas por cada modelo, la información previa de las irradiaciones y las variables geográficas del Edificio de Ingeniería Eléctrica es posible calcular las componentes de Irradiación solar Normal Directa e Irradiación solar Horizontal Difusa.

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

Para realizar las estimaciones a partir de los métodos isotrópicos se requiere inicialmente de tres mediciones de la irradiancia total sobre las superficies de interés (dos inclinadas y una horizontal) en el mismo instante de tiempo, esta condición es necesaria para obtener por lo menos un set de estimaciones de DNI, DHI y GHI, validada esta condición se planteó un sistema de ecuaciones dos por dos a partir del mismo modelo para obtener la primera estimación de la componente DNI, la cual se usó en una tercera expresión (del mismo modelo) que describía el comportamiento de la irradiancia en el mismo instante obteniendo así la primera estimación de DHI, que al ser reemplazada en la expresión general que relaciona las tres componentes, junto con la DNI inicialmente estimada se logró obtener la primera estimación de GHI y a su vez el primer set de estimaciones indicado inicialmente.

2.3.1. Estructura Y Dependencia De Expresiones Durante La Estimación

El siguiente diagrama de flujo explica el proceso de estimación de las componentes de irradiancia solar a partir de los modelos isotrópicos, entendiendo que “X” es alguno de los modelos, “n” un inicializador que inicia en 1 y que el método planteado tiene una naturaleza causal que se basa en datos conocidos.



ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

Figura 5 Diagrama lógico general para la estimación de componentes DNI, DHI Y GHI usando Modelos Isotrópicos

2.3.2. Ubicación De Las Superficies E Información Equipos Utilizados

La Universidad Industrial de Santander (UIS) está localizada a, 7.13° latitud norte y 73.13° longitud oeste en la ciudad de Bucaramanga. Su clima es cálido y con una altura sobre el nivel del mar de 960msnm, su temperatura ambiente promedio es de 24°C y su irradiación solar horizontal promedio es de $4.9\text{kWh/m}^2\text{-día}$, así mismo el Edificio de Ingeniería Eléctrica se encuentra ubicado en el campus principal de la UIS y funciona como la sede de la E3T (Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones) (Osma G. , Ordoñez, Duarte, & Petit, 2018) donde se encuentran ubicados es su terraza verde superior las superficies irradiadas objeto de esta investigación.



Figura 6 Terraza verde superior Escuela de Ingenierías Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Durante el proceso de captura, conversión analógica-digital y transmisión de la irradiancia total digitalizada sobre las superficies, se requirió de una etapa electrónica que realizara este conjunto de tareas, para lo cual se utilizó un datalogger XR5-SE, el cual dentro de sus características más destacadas se encuentran su compatibilidad con múltiples sensores, la transversalidad entre sistemas operativos, bajo offset en el rango $10 - 40^\circ\text{C}$, salidas de datos en

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

difusa (DaSilva, y otros, 2019). Es así como bajo estas consideraciones la componente de irradiancia difusa sobre una superficie inclinada según Liu & Jordan se expresa como:

$$I_{D\beta} = DHI * \frac{1 + \cos(\beta)}{2}$$

Ecuación 15 Irradiancia difusa sobre una superficie según Liu&Jordan

Y la irradiancia total sobre una superficie inclinada bajo este modelo isotrópico se expresa como:

$$I_{T\beta} = [DNI * \cos(\theta)] + \left[GHI * \rho * \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] + \left[DHI * \frac{1 + \cos(\beta)}{2} \right]$$

Ecuación 16 Irradiancia total incidente según Liu&Jordan

2.4.2. Badescu

Esta aproximación isotrópica para la irradiancia difusa sobre una superficie inclinada ha desarrollado una expresión en la que se tiene en cuenta los ángulos zenit y azimut para describir la posición del sol en el cielo (Badescu, 2002), es decir, ubica con mayor precisión la posición de la fuente de irradiación al definirla en las 3 dimensiones con los ángulos previamente descritos.

$$I_{D\beta} = \left(\frac{3 + \cos 2\beta}{4} \right) * DHI$$

Ecuación 17 Irradiancia difusa según Badecu

Usando la anterior expresión se puede definir la irradiancia difusa total sobre una superficie inclinada de la siguiente manera.

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

$$I_{T\beta} = [DNI * \cos(\theta)] + \left[GHI * \rho * \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] + \left(\frac{3 + \cos 2\beta}{4} \right) * DHI$$

Ecuación 18 Irradiancia total incidente según Badescu

2.4.3. *Koronaki*

El modelo de Koronaki asume irradiación difusa en un cielo isotrópico del 66.7% para una superficie plana inclinada hacia el sur (Maleki, Hizam, & Gomes, 2017).

$$I_{D\beta} = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2 + \cos\beta} \right) * DHI$$

Ecuación 19 Irradiancia difusa según Koronaki

Usando la anterior expresión se puede definir la irradiancia total sobre una superficie inclinada de la siguiente manera.

$$I_{T\beta} = [DNI * \cos(\theta)] + \left[GHI * \rho * \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] + \frac{1}{3} \left(\frac{1}{2 + \cos\beta} \right) * DHI$$

Ecuación 20 Irradiancia total incidente según Koronaki

2.4.4. *Tian*

La expresión para la componente de la irradiancia difusa isotrópica en este caso se describe como:

$$I_{D\beta} = \left(1 - \frac{\beta}{180} \right) * DHI$$

Ecuación 21 Irradiancia difusa según Tian

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

Con lo cual se puede expresar la irradiación total sobre una superficie inclinada de la siguiente manera:

$$I_{T\beta} = [DNI * \cos(\theta)] + \left[GHI * \rho * \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] + \left(1 - \frac{\beta}{180} \right) * DHI$$

Ecuación 22 Irradiancia total incidente según Tian

2.5. Modelos Anisotrópicos Para La Estimación De Las Componentes De Irradiancia Sobre Una Superficie Inclinada

Los modelos anisotrópicos buscan describir la distribución irregular de la Irradiación Difusa en la bóveda celeste, por esta razón este tipo de modelos añade parámetros que consideran aquellas áreas con alta concentración de Irradiancia Difusa sobre la superficie irradiada objeto de estudio (Maleki, Hizam, & Gomes, 2017).

El uso de este tipo de modelamiento se recomienda para aquellos sistemas donde se conoce o es posible obtener a través de sistemas de adquisición la información requerida.

Al requerir de más información particular y establecer vínculos matemáticos más fuertes con los demás términos que definen las componentes de irradiancia solar incidente, este tipo de modelos resultan ser más acertados en la estimación (Maleki, Hizam, & Gomes, 2017).

2.5.1. Klucher

Este modelo incluye las componentes propuestas inicialmente por Temps y Coulson para la estimación de la irradiancia difusa. Considera la anisotropía natural de esta componente de la irradiancia y aproxima la estimación a un comportamiento climático más real (DaSilva, y otros, 2019). Es decir, implementa una forma de estimar la componente de irradiancia difusa de la

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

irradiancia total de la superficie inclinada como la suma de la irradiancia circunsolar difusa y la irradiancia horizontal difusa a través de un índice de claridad o despeje del cielo circundante, el cual, en caso de ser cero reduce el modelo a su versión isotrópica.

$$I_{D\beta} = \left[\left(DHI * \frac{1 + \cos\beta}{2} \right) \left(1 + F' * \sin^3 \frac{\beta}{2} \right) (1 + F' * \cos^2\theta * \sin^3\Phi) \right]$$

Ecuación 23 Irradiancia difusa según Kluucher

Donde:

F' = Factor de nubosidad de la bóveda celeste

Determinado por:

$$F' = 1 - \left(\frac{DHI}{GHI} \right)^2$$

Ecuación 24 Factor de nubosidad

Y la irradiancia total sobre una superficie inclinada bajo este modelo Anisotrópico se expresa como:

$$I_{T\beta} = [DNI * \cos(\theta)] + \left[GHI * \rho * \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] + \left[\left(DHI * \frac{1 + \cos\beta}{2} \right) \left(1 + F' * \sin^3 \frac{\beta}{2} \right) (1 + F' * \cos^2\theta * \sin^3\Phi) \right]$$

Ecuación 25 Irradiancia total incidente según Klucher

2.5.2. Hay & Davies

Similar al modelo de Klucher, esta interpretación considera dos componentes asociadas a la irradiancia difusa las cuales se distinguen como la componente isotrópica y la componente circunsolar (Hay & Davies, 1980). En este caso el cálculo del factor de correlación entre la irradiación normal directa y la irradiación extraterrestre (radiación solar en la parte superior de la atmosfera terrestre 1366 W/) y el cálculo del factor de inclinación de la irradiación incidente que es la relación entre el coseno del ángulo de incidencia(θ) y el coseno del ángulo zenit(Φ) permiten inferir una expresión para componente difusa de la irradiación total sobre la superficie inclinada, la cual se expresa como:

$$I_{D\beta} = DHI[(A_i * R_b) + (1 - A_i) * \frac{1 + \cos\beta}{2}]$$

Ecuación 26 Irradiancia difusa según Hay&Davies

Donde:

$$A_i = \frac{DNI}{I_0}$$

Ecuación 27 Factor de anisotropía

$$R_b = \frac{\cos\theta}{\cos\Phi}$$

Ecuación 28 Factor de reflectancia

Con lo cual se puede expresar anisotrópicamente la irradiancia total sobre una superficie inclinada como:

$$I_{T\beta} = [DNI * \cos(\theta)] + \left[GHI * \rho * \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] + DHI \left[\left(\frac{DNI}{I_0} * \frac{\cos\theta}{\cos\Phi} \right) + \left(1 - \frac{DNI}{I_0} \right) \frac{1 + \cos\beta}{2} \right]$$

Ecuación 29 Irradiancia total incidente según Hay&Davies

2.5.3. Reindl

Este modelo basado en la expresión de Hays & Davies para estimar la componente de irradiación difusa sobre una superficie inclinada tiene en cuenta los mismos coeficientes de anisotropía e incluye otro que define irradiación proveniente del horizonte (Reindl, Beckman, & Due, 1990).

$$I_{D\beta} = DHI \left[(A_i * R_b) + (1 - A_i) * \frac{1 + \cos\beta}{2} \right] \left(1 + \sqrt{\frac{DNI * \cos\Phi}{GHI}} * \text{SEN}^3 \frac{\beta}{2} \right)$$

Ecuación 30 Irradiancia difusa según Reindl

Lo cual permite expresar la irradiancia total sobre una superficie inclinada como:

$$I_{T\beta} = [DNI * \cos(\theta)] + \left[GHI * \rho * \frac{1 - \cos(\beta)}{2} \right] + DHI \left[\left(\frac{DNI}{I_0} * \frac{\cos\theta}{\cos\Phi} \right) + \left(1 - \frac{DNI}{I_0} \right) * \frac{1 + \cos\beta}{2} \right] * \left[1 + \sqrt{\frac{DNI * \cos\Phi}{GHI}} * \text{SEN}^3 \frac{\beta}{2} \right]$$

Ecuación 31 Irradiancia total incidente según Reindl

2.6. Cuadro Sinóptico De Modelos Formulados Y Modelos Utilizados En La Estimación.

Algunos de los modelos descritos en el capítulo fueron utilizados para realizar las estimaciones de las componentes de irradiancia, mientras que los restantes fueron identificados como métodos viables para realizar las estimaciones, esta selección se realizó considerando la información disponible y requerida por los métodos para lograr dichas estimaciones.

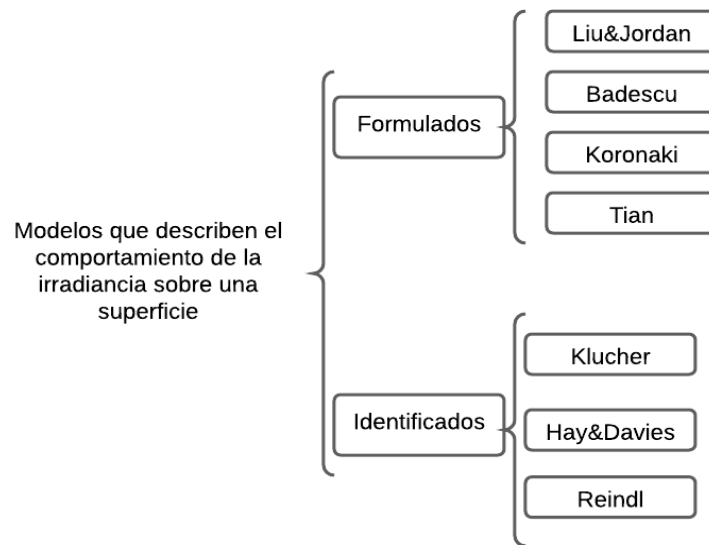


Figura 8 Cuadro sinóptico - Modelos formulados e identificados para la estimación

3. Comparación De Las Componentes De Irradiancia Obtenidas Según Modelos Descritos

El objetivo principal de los modelos seleccionados es estimar las componentes de irradiancia solar que describen como está siendo irradiada una superficie particular durante un periodo de tiempo específico. En ese sentido, los modelos isotrópicos y anisotrópicos seleccionados requieren de un set de mediciones previas de irradiancia total sobre la superficie. A menor frecuencia y precisión de las medidas mejor será la descripción de las componentes de irradiancia a obtener.

En el caso de los modelos isotrópicos, se planteó un sistema de ecuaciones para obtener la componente DNI, luego esta se sustituye en una tercera expresión con la cual se logra obtener la estimación para la componente DHI, finalmente la componente GHI se obtiene a partir de la expresión general que relaciona las tres componentes y el ángulo zenit.

El escenario ideal para realizar la comparación de las estimaciones requiere contar con datos reales de las mismas, es decir, contar con información capturada por dispositivos especializados para su consecución bajo las mismas condiciones de la estimación. Para este estudio en particular se cuenta con información de la irradiancia total sobre las superficies, por lo cual, dicha comparación obtenida refleja la diferencia entre las diferentes estimaciones obtenidas por los métodos usados y la irradiación total medida en cada superficie. Durante el desarrollo de esta investigación se detallará la forma en la que se realizaron las mediciones, los datos medidos y estimados de irradiancia, así como su representación gráfica a través del tiempo.

3.1. Diagrama De Flujo Para Las Mediciones, Cálculos Y Estimaciones De Irradiancia.

3.1.1. Diagrama de flujo para estimación a través de los modelos isotrópicos

El siguiente diagrama de flujo representa las generalidades de las estimaciones realizadas, considerando las condiciones mínimas necesarias y la estructura lógica ejecutadas.

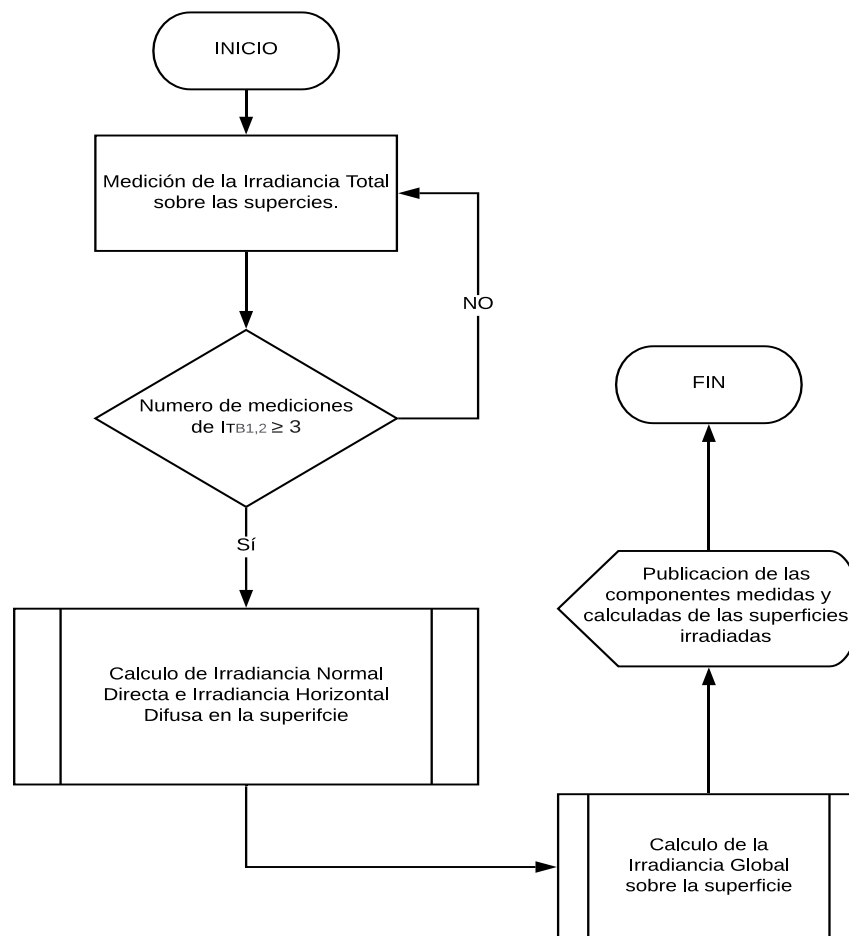


Figura 9 Diagrama de flujo para la estimación de las componentes de irradiancia a partir de los modelos isotrópicos

3.2. Comparación De Las Componentes Usando Los Modelos Isotrópicos

Con el fin de validar la metodología planteada para realizar las estimaciones sobre una superficie, se debe contar con cierta información de entrada relacionada a la posición y orientación

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

de la misma objeto de estimación, el periodo de muestreo del dispositivo que mide la irradiancia total sobre la superficie, el albedo de la posición geográfica y la fecha y hora en la que se midió la irradiancia total sobre dicha superficie. En ese sentido, se define que las superficies irradiadas tenían las siguientes condiciones al momento de realizar la medición: inclinación de 10° orientada hacia el sur y orientada hacia el norte, piranómetros con una frecuencia de medición de 10S, un albedo de 0,2 en el día 57 del año 2020 (26/02/2020).

Para abordar las iteraciones necesarias en el método desarrollado, se implementó una rutina en Matlab que utiliza los datos de irradiancia total almacenados en una base de datos de Excel, esta base alimenta a su vez el código descrito en Matlab, es decir, los datos de entrada previamente descritos deben ser digitados en la hoja 1 “DATA_INPUT” del documento “TEMPLATE_ESTIMACION.xls” se consideró este manejo entendiendo que la mayoría de dataloggers comerciales para este uso tiene como opción de salida de datos esta extensión de Excel (.xls).

En principio, el método considera las expresiones n de cada superficie (ecuaciones de uno de los modelos que describen la irradiancia total) para obtener una estimación de la DNI, luego utilizando la expresión $n+1$ y el primer valor de DNI obtenido se estima la DHI, que se utiliza en la expresión general de GHI la cual relaciona las tres componentes de irradiancia junto al ángulo zenit.

Dada la cantidad de datos obtenidos de los sensores se optó por promediar minuto a minuto la irradiancia total medida sobre las superficies, obteniendo así estimaciones de las componentes para cada superficie con esta misma frecuencia.

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

Bajo esta lógica secuencial y considerando los datos de entrada descritos previamente se realiza la estimación de componentes para el día 26/02/2020 en el periodo comprendido entre las [9:00h – 18:30h].

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

3.2.1. Estimaciones Para El 26/02/2020 (10:49h, 12:18h, 16:00h)

Inicialmente se intentó obtener estimaciones con la mínima frecuencia posible aportada por los radiómetros (10 segundos), escenario para el cual las estimaciones y la cantidad de errores vinculados a la falta de información era muy evidente por lo cual se determinó que una opción de mejora era realizar las estimaciones de forma minutal sobre aquellos valores de irradiancia que superaran los 500W/m^2 , es decir, promediando los datos obtenidos por los radiómetros y eliminando aquellos promedios menores a lo especificado previamente. .

| Fecha y Hora | Estimaciones según Liu & Jordan | | | | | | Estimaciones según Badescu | | | | | | Estimaciones según Koronaki | | | | | | Estimaciones según Tian | | | | | |
|--------------|---------------------------------|----------|----------|--------------|----------|----------|----------------------------|----------|----------|--------------|----------|----------|-----------------------------|----------|----------|--------------|----------|----------|-------------------------|----------|----------|--------------|----------|----------|
| | Superficie A | | | Superficie B | | | Superficie A | | | Superficie B | | | Superficie A | | | Superficie B | | | Superficie A | | | Superficie B | | |
| | estimado | estimado | estimado | estimado | estimado | estimado | estimado | estimado | estimado | estimado | estimado | estimado | estimado | estimado | estimado | estimado | estimado | estimado | estimado | estimado | estimado | estimado | estimado | estimado |
| 10:49:07 | 1272,8 | -600,7 | 485,0 | 1272,8 | -704,5 | 501,5 | 1272,8 | -605,2 | 480,4 | 1272,8 | -709,8 | 496,1 | 1272,8 | -599,2 | 486,5 | 1272,8 | -702,7 | 503,3 | 1272,8 | -631,2 | 454,5 | 1272,8 | -740,2 | 465,7 |
| 12:18:07 | -2858,7 | 3618,5 | 1060,4 | -2858,7 | 3994,1 | 1160,6 | -2858,7 | 3646,0 | 1087,8 | -2858,7 | 4024,5 | 1190,9 | -2858,7 | 3609,3 | 1051,1 | -2858,7 | 3984,0 | 1150,4 | -2858,7 | 3802,3 | 1244,1 | -2858,7 | 4197,0 | 1363,4 |
| 16:00:07 | 822,7 | 191,9 | 541,9 | 822,7 | 198,5 | 610,4 | 822,7 | 193,4 | 543,4 | 822,7 | 200,0 | 612,0 | 822,7 | 191,4 | 541,4 | 822,7 | 198,0 | 609,9 | 822,7 | 201,7 | 551,7 | 822,7 | 208,6 | 620,5 |

Tabla 1 Estimaciones de las componentes de irradiancia 26/02/2020, 10:49, 12:18 y 16:00 horas

Las estimaciones en rojo representan un error estimativo del modelo o de la metodología implementada, se evidencio que estos errores representan un porcentaje considerable de las estimaciones y que persisten luego de múltiples validaciones del código utilizado para su obtención.

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

Se destaca que las componentes estimadas tienen comportamientos descendentes hacia el inicio y final del periodo de medición de la irradiancia total sobre la superficie irradiada, mientras que las estimaciones realizadas a las 12:00 son ampliamente superiores comparadas con los extremos del periodo total de estimación, sin embargo, la cantidad de errores matemáticos siguen siendo considerable y no se cuenta con más información que permita disminuirlo matemática o físicamente.

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

3.2.2. Graficas Del Comportamiento De Las Componentes Estimadas A Través Del Tiempo Para Cada Modelo Utilizado.

A continuación, se describen gráficamente las estimaciones obtenidas para cada una de las componentes de irradiancia solar usando cada uno de los modelos descritos sobre una de las superficies inclinadas. En general, los datos de irradiancia obtenidos usando los modelos isotrópicos presentan errores estimativos de carácter matemático representado por el conjunto de valores negativos de irradiancia estimados.

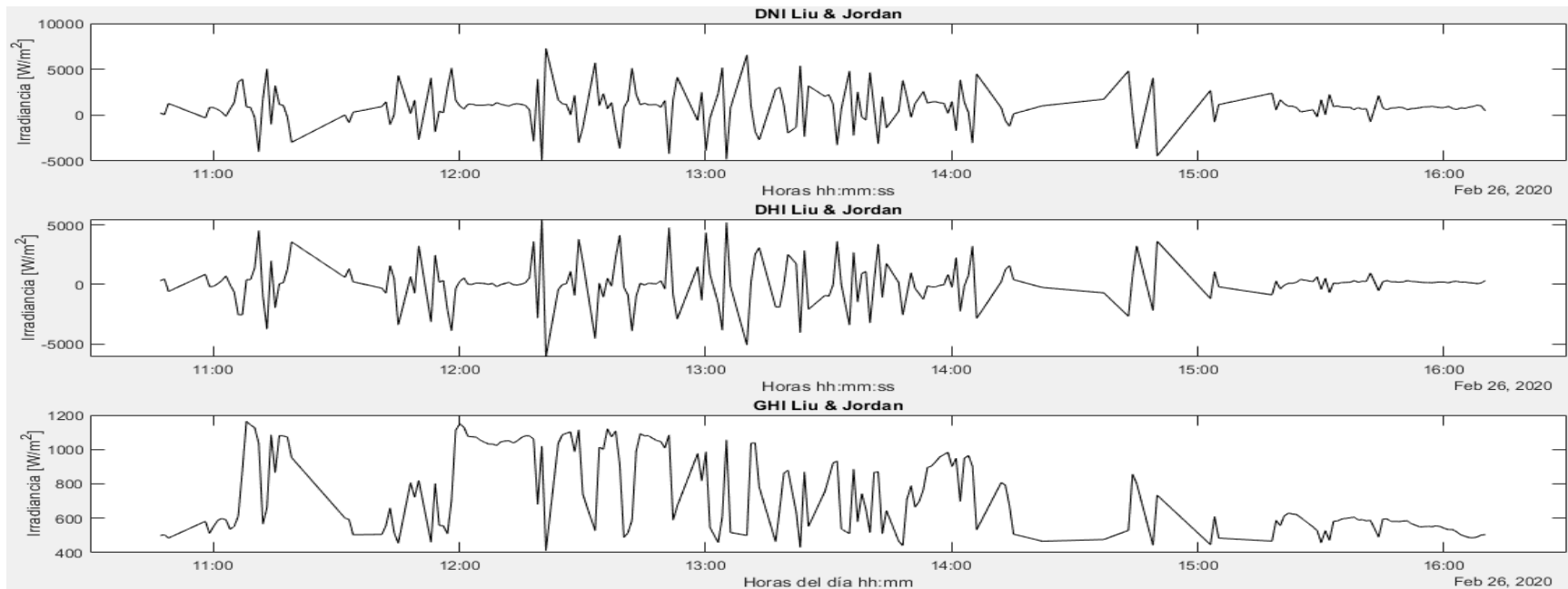


Figura 10 Estimación de las componentes DNI, DHI Y GHI en el periodo de [09:00h-18:30h] del 26/02/2020 usando el método de Liu & Jordan

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

Los errores estimativos persisten en el modelo de Badescu, el comportamiento de las componentes de irradiancia estimada es similar pero no se puede concluir nada acerca del comportamiento real de las mismas debido a la cantidad de estimaciones de irradiancia negativas que se presentan producto de los modelos seleccionados.

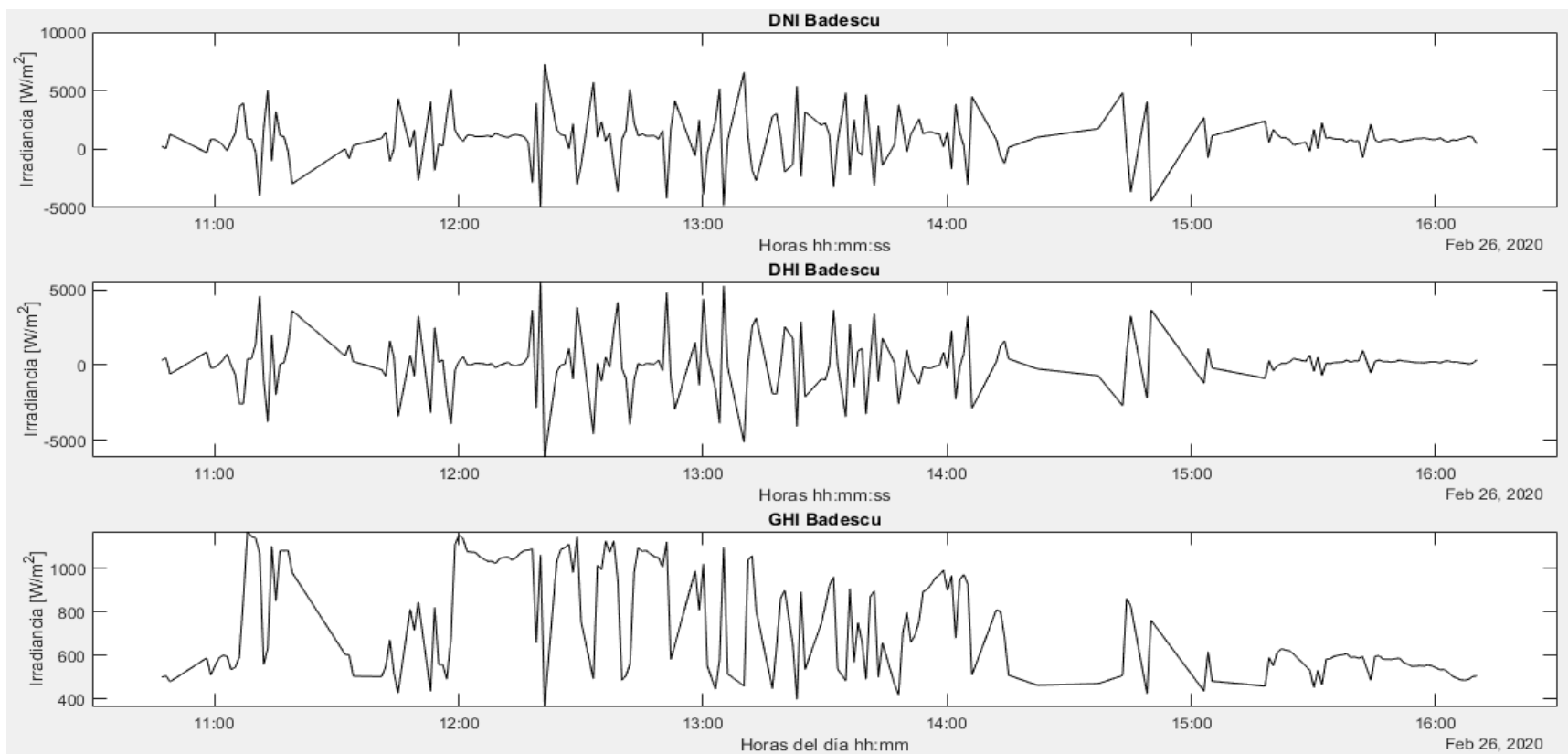


Figura 11 Estimación de las componentes DNI, DHI Y GHI en el periodo de [09:00h-18:30h] del 26/02/2020 usando el método de Badescu

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

La estimación de la componente DNI es la misma para cada superficie, esta componente se estimó considerando las condiciones de irradiancia total para las dos superficies inclinadas y la superficie horizontal, se destaca que a pesar de utilizar toda la información disponible para la estimación de esta componente que es transversal a todo el proceso estimativo no se logran los resultados esperados.

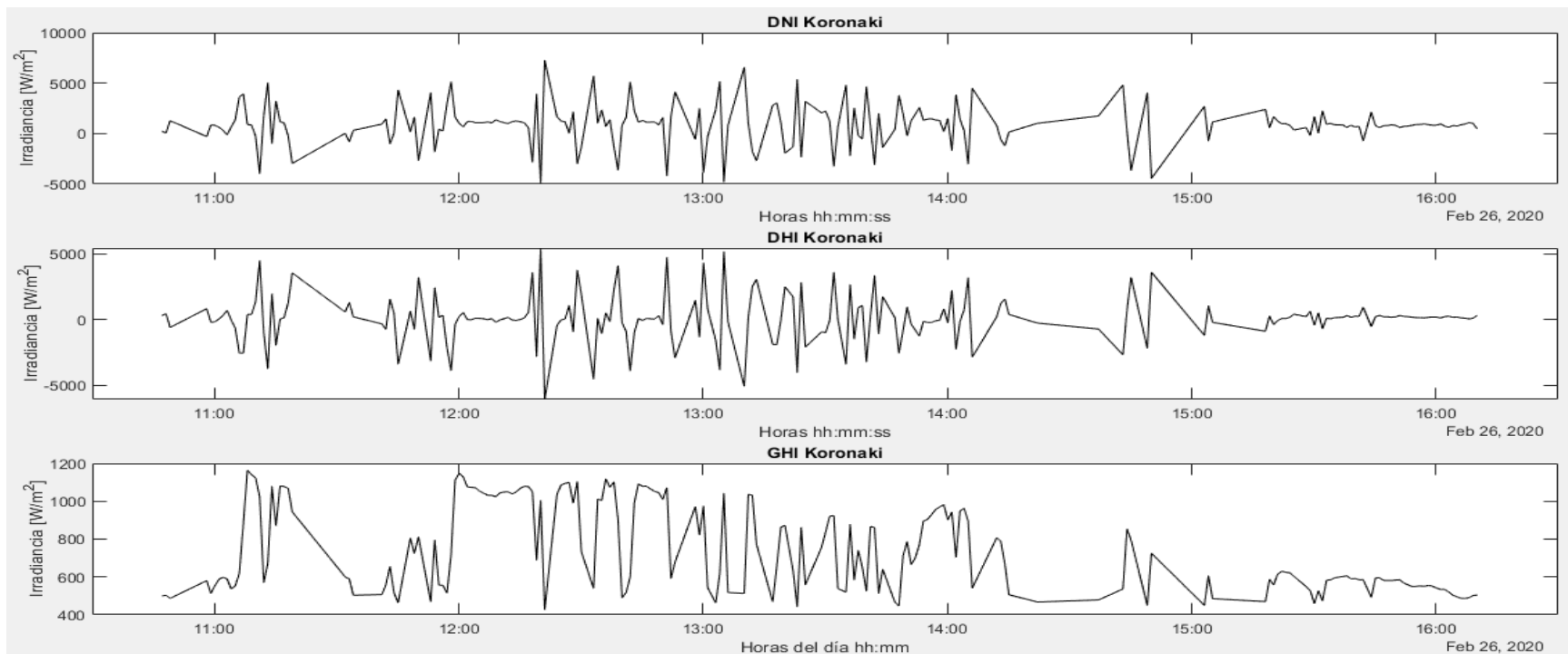


Figura 12 Estimación de las componentes DNI, DHI Y GHI en el periodo de [09:00h-18:30h] del 26/02/2020 usando el método de Koronaki

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

La componente GHI es la única que se mantiene positiva durante todo el proceso estimativo para todos los métodos a pesar de depender directamente de las componentes DNI y DHI, aun así, no muestra el comportamiento esperado y por el contrario tiene un comportamiento que no muestra ninguna tendencia destacable.

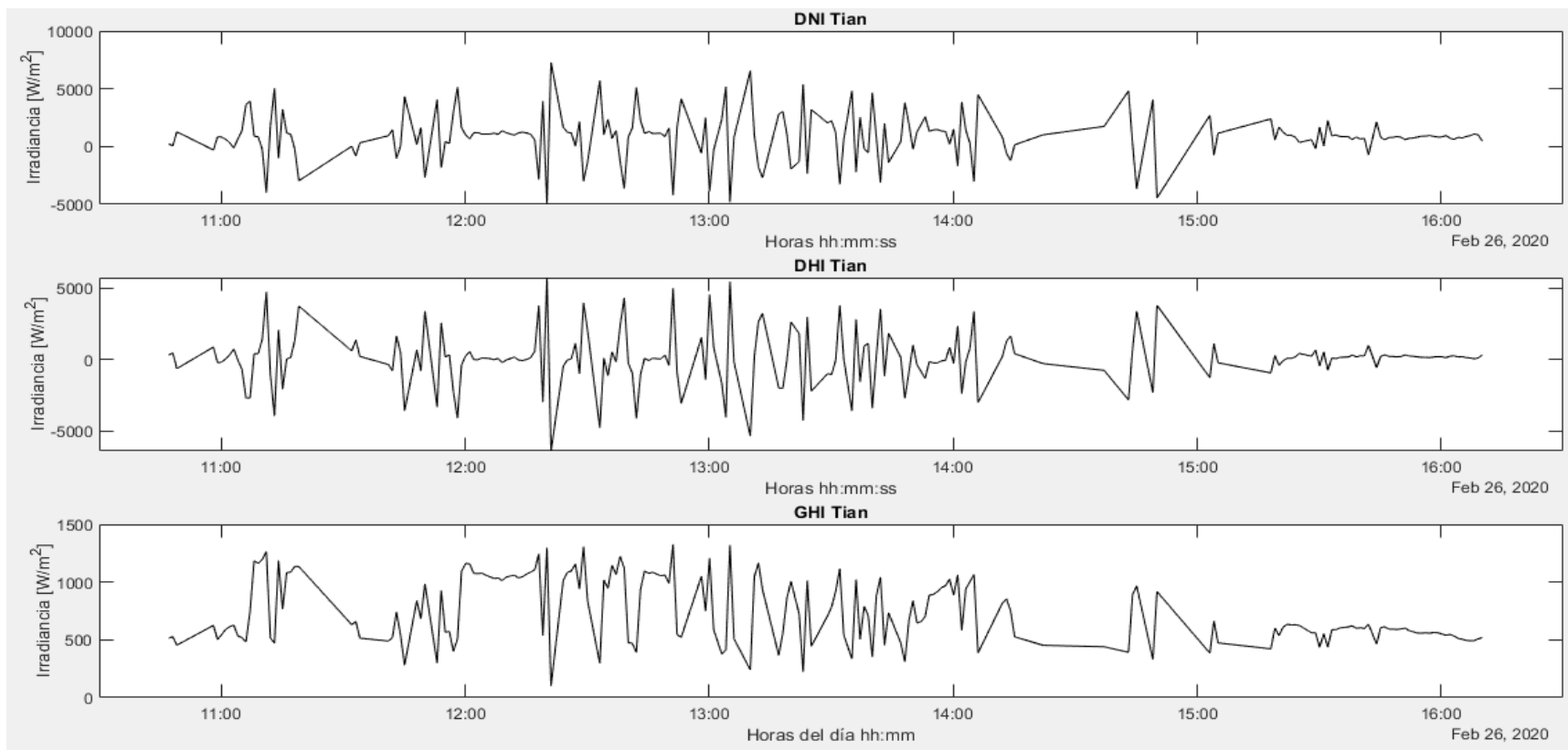


Figura 13 Estimación de las componentes DNI, DHI Y GHI en el periodo de [09:00h-18:30h] del 26/02/2020 usando el método de Tian

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

Comparando las estimaciones obtenidas por los diferentes modelos se destaca que la componente DNI es la misma para todos los momentos considerados, es decir, la estimación de esta componente no varía en tanto a los diferentes modelos isotrópicos utilizados, ya que todos estos expresan de la misma manera el coeficiente de la irradiancia normal directa.

Los modelos isotrópicos son susceptibles a cambios rápidos de la irradiación total sobre la superficie analizada, esto se ve reflejado en las secuencias de picos producto de la estimación de las componentes.

4. Caracterización Del Potencial Solar Incidente Sobre La Terraza Superior Del Edificio De Ingeniería Eléctrica.

La caracterización del potencial solar de un área determinada requiere de la descripción de todas las componentes de irradiancia provenientes de la bóveda celeste que intervienen en el fenómeno de irradiancia. Esta caracterización depende de la información de entrada disponible, los modelos matemáticos seleccionados, las condiciones climáticas específicas del lugar y sus condiciones geográficas particulares.

En esta investigación, se pretendió realizar la estimación de las componentes DNI, DHI y GHI de dos superficies inclinadas en la terraza superior del edificio de ingeniería eléctrica a partir de la información de irradiancia total sobre las superficies y la información de su posición geográfica, sin embargo, a partir de los modelos seleccionados no fue posible obtener los resultados esperados ya que se requiere de más información relacionada a la irradiancia proveniente de la bóveda celeste que llega hasta las superficies de interés, así mismo se requiere evaluar la calidad de los datos recolectados por los piranómetros y sus condiciones de operación con el fin de obtener de la mejor manera los datos necesarios para realizar las estimaciones.

4.1. Posibles Fallas Del Método Estimativo Implementado

Validada la información de irradiancia suministrada y estimada por el método implementado, se detectaron ciertos aspectos que pudiesen ser la razón por la cual no fue posible obtener las estimaciones de las componentes de irradiancia esperadas.

4.1.1. Recolección De Datos Incorrecta

Los datos suministrados por los radiómetros no fueron supervisados ni comparados con otro dispositivo de referencia, es decir, no hay evidencia que permita asegurar que los datos como fecha y hora de la medición no están trocados o alterados.

4.1.2. Fallas Lógicas En La Metodología Implementada

Es posible que la metodología y condiciones implementadas para la estimación de las componentes de irradiancia no concuerden con las características particulares de los modelos implementados, para validar esta condición se hace necesario realizar un estudio mas detallado de cada modelo, lo cual, no hace parte del alcance de esta investigación.

4.1.3. Argumentos De Entrada Insuficientes

Es posible que los métodos implementados requieran de más información en torno a las componentes de irradiancia necesarias para implementar un proceso estimativo. Se debe considerar que esta investigación solo abordo los modelos isotrópicos pensando en utilizar ampliamente la información disponible, sin embargo, como se evidencio no fue posible obtener las estimaciones buscadas. Para un próximo estudio se debe considerar que al usar los modelos anisotrópicos se requerirá de más información en torno a la superficie irradiada.

4.2. Mejoras Propuestas Para El Proceso Estimativo

Producto del método estimativo planteado en esta investigación, su metodología y resultados se proponen ciertas mejoras que podrían aportar al desarrollo de mejores estimaciones en un próximo estudio de irradiancia sobre superficies inclinadas. Entendiendo que en este estudio

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

inicialmente se creía posible obtener resultados con la información disponible y métodos seleccionados y que los modelos no requerían aparentemente de más información.

4.2.1. Validación De Datos Capturados Por Los Radiómetros

Resulta importante validar y verificar los datos sensados de irradiancia por los radiómetros a partir de otro dispositivo calibrado que funcione como referencia, esto quiere decir que se deben detallar las razones climatológicas, geográficas y físicas de aquellas variaciones considerables de irradiancia medida para filtrar aquellas que sean producidas por efectos no deseados que puedan afectar el estudio.

4.2.2. Pruebas Piloto De Comparación Estimativa

Con el fin de establecer un proceso estimativo que se pueda aplicar y replicar en cualquier época del año, resulta importante realizar múltiples pruebas del método estimativo planteado durante periodos de tiempo determinados en los que se pueda comparar la información de irradiancia estimada con alguna referencia disponible verificada que avale los resultados obtenidos.

4.2.3. Validación De Las Condiciones De Los Modelos Seleccionados

Antes de implementar cualquier modelo propuesto en la literatura para la estimación de las componentes de irradiancia solar sobre una superficie en particular se deben validar las condiciones climáticas, irradiativas, matemáticas y posicionales con las que el modelo describe el comportamiento de las componentes de irradiancia. Esto con el fin de validar si el modelo a seleccionar es válido para el set de datos e información a utilizar.

4.2.4. Validación De Las Características De Los Equipos De Sensado A Utilizar

Previo a la recolección de datos se debe verificar que los equipos utilizados cumplan con las características mínimas de operación y rendimiento necesarias para la adquisición de datos de irradiancia, es importante que el mismo cuente con una hoja de datos que describa sus límites de operación, mantenimiento y descripción de las señales a emitir en cuanto sea expuesto al fenómeno irradiativo a medir.

4.2.5. Consideración De Los Posibles Efectos De Obstáculos Circundantes

El entorno en el que se encuentran las superficies objeto de estimación puede afectar las mediciones de irradiancia obtenida por los radiómetros, se recomienda que en la medida de lo posible se eliminen los obstáculos presentes en todas las direcciones de la superficie en cuestión o en su defecto se considere y cuantifique el impacto posible en cada una de las componentes de irradiancia.

4.2.6. Medición Del Albedo Local

Uno de los factores comunes que impacta directamente en la irradiancia difusa es el albedo, por lo cual, la medición de este para el área en particular en la que se requiere estimar componentes resulta un aspecto crítico que pudiese ayudar a mejorar las estimaciones de la metodología implementada.

5. Conclusiones

Resulta prácticamente imposible determinar las componentes de irradiancia solar DNI, DHI Y GHI a partir de la información de irradiancia total sobre tres superficies (dos inclinadas y una horizontal) y de los modelos isotrópicos planteados en esta, debido a la cantidad de errores matemáticos estimativos producto de la metodología implementada. Es necesario obtener más información de irradiancia de las superficies que permitan describir mejor el comportamiento de la irradiancia incidente sobre la superficie, esta descripción dependerá ampliamente de los sistemas de adquisición y de las metodologías implementadas, para lo cual se deben considerar las recomendaciones indicadas en este estudio.

Se deben implementar múltiples metodologías estimativas paralelamente con el fin de validar la información estimada de irradiancia por cada una de ellas, en ese sentido, se deben diseñar distintas soluciones electrónicas que cumplan con lo requerido por cada metodología considerando siempre los datos necesarios o de ruta crítica para que la estimación a obtener sea válida.

Las metodologías propuestas en la literatura pueden ser usadas como referencia para implementar una metodología propia que permita la correcta estimación de las componentes de irradiancia, sin embargo, se debe considerar que cada caso es particular y que muy probablemente dichas metodologías apliquen parcialmente para el caso de estudio en mención, por tanto, es mandatorio revisar minuciosamente cada metodología a usar junto a sus suposiciones asociadas.

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

El uso de modelos anisotrópicos para obtener estimaciones de las componentes de irradiancia sobre una superficie requerirá de más información relacionada a esta, es por esto que se recomienda abordar inicialmente el problema desde el punto de vista isotrópico para luego escalarlo a un entorno anisotrópico donde se cuente con más información.

Referencias Bibliográficas

- Badescu. (2002). *Isotropic approximation for solar diffuse irradiance on tilted surfaces*. Renewable Energy.
- DaSilva, M. K., Melo, K. B., Costa, T. S., Narvaez, D. I., Mesquita, D. d., & Villalba, M. G. (2019). *Comparative Study of Sky Diffuse Irradiance Models Applied to Photovoltaic Systems*. Campinas: Department of Energy Control and Systems.
- Hay, J., & Davies, J. A. (1980). *Calculation of the solar radiation incident on an inclined surface*. Proceedings First Canadian Solar Radiation.
- Kalogirou, S. A. (2014). *Solar Energy Engineering*. Amsterdam: ELSEVIER.
- Koreevan, M. (2015). *The Importance of Pyranometer Temperature Response*. Kipp & Zonen - R&D department.
- Maleki, S. A., Hizam, H., & Gomes, C. (2017). *Estimation of Hourly, Daily and Monthly Global Solar Radiation on Inclined Surfaces: Models Re-Visited*. Selangor: MDPI.
- Mendoza, I., & Piedra, D. (2006). *VALIDACIÓN DE MODELOS DE RADIACION SOLAR DIRECTA PARA LA CIUDAD DE BOGOTÁ A PARTIR DE DATOS EXPERIMENTALES*. BOGOTÁ: REVISTA COLOMBIANA DE FÍSICA.
- Naranjo, C. S. (2006). *Caracterización de la radiación directa normal en sevilla*. Sevilla: Departamento de termodinamica y energias renovables - Universidad de Sevilla.

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

Osma, G., & Ordoñez, G. (2011). *Análisis técnico para la implementación de seguidores solares en sistemas de generación fotovoltaica en la ciudad de Bucaramanga*. Bucaramanga: INTERCON.

Osma, G., Ordoñez, G., Duarte, C., & Petit, J. (2018). *Edificación verde como instrumento de investigación y docencia. Caso Edificio de Ingeniería Eléctrica en la Universidad Industrial de Santander*. Lima: LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology.

Reindl, D., Beckman, W., & Duffie, J. (1990). *Diurnal fraction correlations*. Solar Energy.

Apéndices

La estimación de las componentes de irradiancia solar sobre una superficie en particular requiere la selección y el uso de modelos matemáticos que permitan obtener valores estimados de estas componentes, a partir de información previamente conocida que provea de argumentos suficientes a los modelos matemáticos mencionados, para que a través del tratamiento de sistemas de ecuaciones se pueda obtener la información de irradiancia inmersa dentro de la estructura matemática de los modelos a usar.

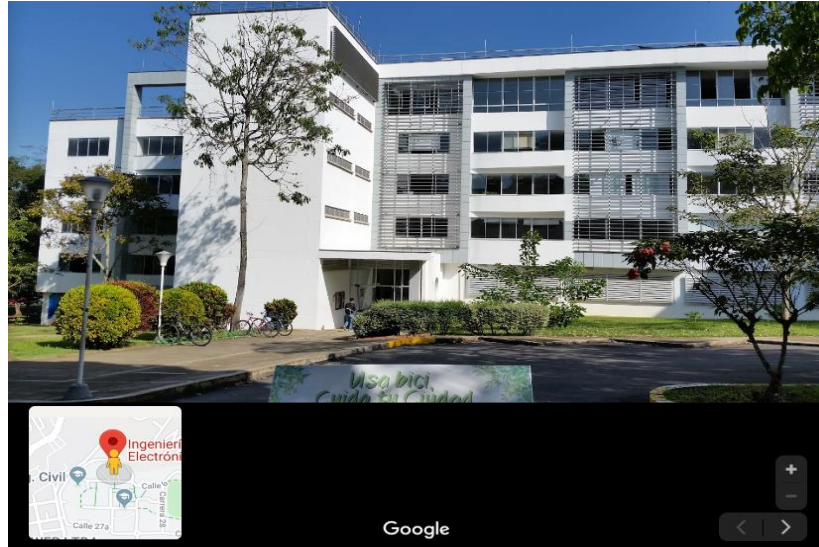
En ese sentido, se deben relacionar y especificar los parámetros, variables e información de entrada que pueda facilitar o simplificar el análisis matemático de los modelos a seleccionar. Estos se relacionan en la tabla a continuación:

Apéndice A Parametros a la posición de las superficies

Parámetros Conocidos Asociados A La Ubicación Y Posición De Las Superficies Irradiadas.

Las superficies irradiadas que serán objeto de estudio se encuentran localizadas en la terraza verde del edificio de ingeniería eléctrica de la Universidad Industrial de Santander (UIS), basados en su ubicación, es posible conocer algunos parámetros útiles para la estimación de las componentes de irradiancia, los cuales son Latitud: $7^{\circ}08'31.5''N$, Longitud: $73^{\circ}07'16.2''W$ Y Albedo: 0,2.

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR



Apéndice B Parámetros de los piranómetros utilizados

Piranómetros

Los piranómetros son sensores diseñados para medir la irradiancia total solar sobre una superficie. Estos sensores térmicos transforman la energía con la que son irradiados en energía térmica que consecuentemente elevan la temperatura sobre la superficie irradiada. Este aumento de temperatura se equilibra con varios tipos de pérdidas de calor en los disipadores térmicos.

El transductor térmico de este tipo de radiómetro está protegido del viento, lluvia y partículas presentes en la atmosfera circundante, así como del intercambio de radiación térmica por una o dos cupulas transparentes. Algunos cuentan con un difusor cuya transmitancia espectral limita el rango de respuesta espectral a en el intervalo de $[0,3 - 3]\mu\text{m}$.

Existen algunos piranómetros que basan su principio de transducción en fotodiodos los cuales se usan como sensores que convierten la irradiación recibida en energía eléctrica. Comparados con los piranómetros que usan sensores térmicos, los piranómetros que usan fotodiodos tienen una clara desventaja en términos de estabilidad de respuesta espectral requerido

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

para bajos errores debido a la variación del espectro. El error espectral de irradiancia es el error introducido por los cambios en la distribución espectral de la irradiancia solar incidente y la diferencia entre la capacidad de respuesta espectral del radiómetro con respecto a otro con una respuesta espectral completamente homogénea en el rango de longitud de onda de interés.

- **Piranómetros Termoeléctricos.**

Es un sensor equipado con termopilas o termo-baterías que miden la diferencia térmica entre la superficie de irradiada(activo) y el cuerpo (pasivo). La posición y número de uniones pasivas y activas dependen de cada uno de los modelos de piranómetros. Generalmente este tipo de sensores está cubierto por uno o dos domos de cristal concéntricos que protegen el transductor.

- **Piranómetro Fotoeléctrico.**

Sensor equipado con un receptor fotoeléctrico (fotodiodo de silicio) que mide la potencia fotovoltaica, comúnmente se le llama piranómetro de silicio.

- **Clasificación**

La clasificación de los piranómetros se basa en las especificaciones de medida de los instrumentos, es decir, que cualquier dispositivo que emita una señal mientras es irradiado puede ser clasificado como un piranómetro de acuerdo con la norma ISO9060: "Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation".

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

La clasificación puede ser entendida como un ranking de exactitud. Las letras indican el nivel de exactitud alcanzado por el dispositivo de medición cuando se comparan bajo las mismas condiciones de medida. Esta exactitud decrece en orden alfabético. Sin embargo, este ranking de exactitud no significa que un piranómetro de mayor clase sea más exacto que otro radiómetro de menor clase bajo todas las condiciones. En primera medida, todos los piranómetros pueden tener distintos mantenimientos, lo cual, en términos de practicidad y uso particular puede inferir significativamente en la selección, desarrollo y eficiencia del dispositivo.

Los errores por espectro pueden ser un gran obstáculo para la medición dependiendo de las condiciones meteorológicas del sitio y del rango espectral del piranómetro a utilizar. Entendiendo que la selectividad espectral del dispositivo es el porcentaje de desviación de la capacidad de respuesta espectral de la media correspondiente dentro del rango de $0,35\mu\text{m}$ y $1,5\mu\text{m}$. Otra cualidad deseable para la medición de irradiancia reflejada y albedo en este tipo de sensores es un rango espectral pequeño.

Se debe tener en cuenta que la exactitud de la irradiación solar medida no depende exclusivamente de las características del dispositivo utilizado también se deben considerar aspectos como: los procesos de calibración a los que ha sido sometido el dispositivo durante su calibración inicial o recalibración periódica, las condiciones intrínsecas asociadas a la medida, el mantenimiento general descrito por el fabricante para un radiómetro en particular, la limpieza del dispositivo y sus demás partes, las condiciones asociadas al ambiente donde se desarrolla la medida y las conversiones analógicas-digitales que utilice la electrónica del radiómetro para expresar las medidas en pantalla.

- **Parámetros Con Los Que Se Clasifica Un Piranómetro**

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

La clasificación de un piranómetro bajo una clase en particular depende de sus características físicas y de las características del sistema de adquisición y conversión, a continuación, se describen cada una de estas características

- **Tiempo De Respuesta**

Es el tiempo que le toma al dispositivo radiométrico estabilizar su respuesta exacta (irradiancia transducida a tensión o corriente) después de un cambio real en la irradiancia a la que está expuesto. Teniendo en cuenta que el balance térmico de los procesos termoeléctricos en los piranómetros solo puede ser descritos por una cantidad considerable de constantes dependientes del tiempo, se debe considerar que el tiempo de respuesta del dispositivo debe ser medido desde el momento en que cambia el nivel de irradiación para así obtener la latencia introducida por el procesamiento y el sistema de telecomunicaciones. Sin embargo, debe enfatizarse que para una medición exacta de fuentes irradiación de cambios rápidos, deben considerarse hasta el 99,5% del valor estable a la salida.

- **Zero Offset**

Medida de la estabilidad en el punto cero de la salida del radiómetro bajo condiciones de irradiación térmica, radioactiva, electromagnética, etc. O en otras palabras, el nivel de sensibilidad a fuentes de ruido irradiativo que pudiesen afectar la medida del dispositivo.

- **Efectos De Envejecimiento**

Medida de la estabilidad en la respuesta a largo plazo del dispositivo asumiendo un mantenimiento y cuidado adecuado del piranómetro.

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

- **No Linealidad**

Medida en la que se conserva la relación entrada salida a través del tiempo, en general es muy importante que las no linealidades sean especificadas para un rango total de irradiancias medibles y útiles, usualmente el rango en el que se especifican las no linealidades es [100-1000]W/m².

- **Error De Despeje De La Bóveda Celeste**

Medida de la desviación de la respuesta espectral del radiómetro

- **Temperatura Del Cuerpo Del Radiómetro**

Medida del perfil térmico del cuerpo del radiómetro cuando este está expuesto a diferentes niveles de irradiancia.

- **Señales Adicionales De Error De Procesamiento**

Estas señales indican y almacenan los eventos que pudiesen afectar en su momento la medida realizada por el dispositivo, los posibles errores en la conversión entre la adquisición y la digitalización y los posibles errores de funcionamiento del dispositivo.

La selectividad espectral no hace referencia al error espectral. La selectividad espectral fue definida como el máximo porcentaje de desviación de la respuesta espectral entre [0,35-1,5]μm de la respuesta media espectral del sensor.

La clasificación está basada en la señal final del piranómetro, es decir, se refiere a la señal que resulta después de la aplicación de las correcciones de offset y de la corrección de errores

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

sistemáticos del sensor. La señal producto de la aplicación de los factores de corrección solo puede ser usada si las correcciones aplicadas hacen parte del equipo de medida o del sistema de medición, por ejemplo, si un instrumento es usado siempre con ventilación asistida para refrigeración, la clasificación estará basada en la señal del dispositivo con ventilación, pero si el mismo instrumento es usado sin ningún hardware adicional la clasificación será diferente

La clasificación de un piranómetro en particular debe ser especificada por escrito por un laboratorio certificado que realice las pruebas a las características previamente descritas. Si un piranómetro que está siendo probado no alcanza alguna de las clases descritas sin la ayuda de algún componente extra, este debe ser desplazado a la siguiente clase. Por otro lado, si el usuario debe activar una opción o cualidad extra en el dispositivo para alcanzar una clase en particular, esto se debe indicar junto a la clase alcanzada para ese dispositivo y modelo en particular.

- **Clasificación De Los Sistemas De Monitorización**

En general, la complejidad y precisión necesarias para la monitorización, evaluación y gestión de los sistemas fotovoltaicos depende en gran manera de su tamaño físico y de los objetivos principales del usuario final con el sistema en mención. Es por esto por lo que a nivel industrial se destacan tres tipos de equipos de monitorización los cuales proveen diferentes niveles de exactitud.

Estos niveles de exactitud se diferencian por un código alfabético A, B o C los cuales hacen referencia al nivel de exactitud alta exactitud, media exactitud y exactitud básica respectivamente.

Para grandes sistemas fotovoltaicos se recomienda el uso de sistemas de monitorización de clase A, mientras que los sistemas de monitorización de clase B o clase C son más apropiados para pequeños sistemas tales como instalaciones residenciales e instalaciones comerciales pequeñas.

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

Sin embargo, el usuario final puede definir el tipo de sistema de monitorización en tanto a un propósito en particular (investigación, ciencia y afines) a fin de obtener los resultados que desea de su uso y aplicación.

En ese sentido, para que un sistema de monitorización pertenezca a una u otra clase debe cumplir con las siguientes características relacionadas.

- Clasificación de los sistemas de monitorización

| Aplicaciones típicas | Clase A | Clase B | Clase C |
|---|-----------------------|------------------------|-------------------------|
| | alta exactitud | media exactitud | exactitud básica |
| Evaluación básica del desempeño del sistema | X | X | X |
| Documentación de una garantía de desempeño | X | X | |
| Análisis de pérdida del sistema | X | X | |

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

Evaluación de la interacción con la red eléctrica X

Localización de fallas X

Evaluación con una tecnología fotovoltaica X

Medición precisa de la degradación del sistema fotovoltaico X

Validar que la clase de piranómetro previamente descrita coincida con el uso final del mismo para obtener los mejores resultados durante los procesos de medición

- **Tiempo De Adquisición De Datos Y Reportes [IEC61724-1]**

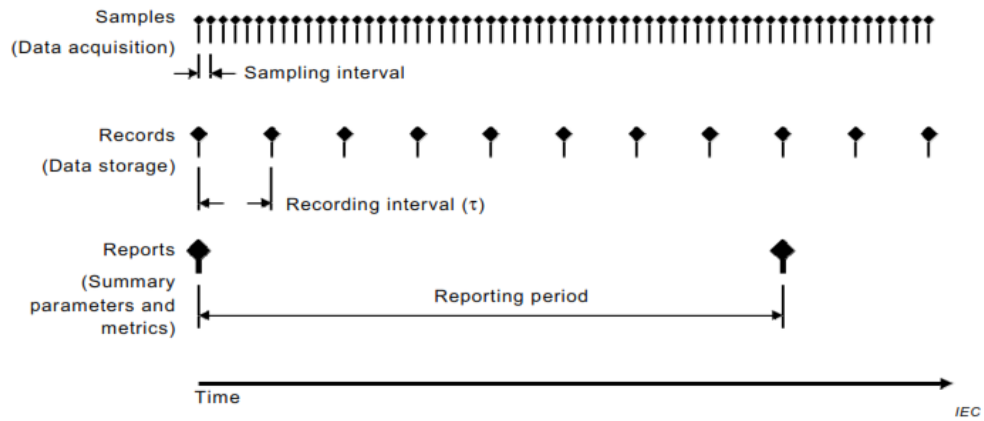
Una muestra está definida como la información adquirida por un sensor o dispositivo de medida, en ese sentido, un intervalo de muestra es el tiempo entre dos muestras adquiridas. En general las muestras capturadas no necesitan ser almacenadas permanentemente.

Un registro se define como los datos ingresados en un registro para el almacenamiento de datos, basado en las muestras previamente adquiridas, así mismo, el intervalo de registro es el tiempo que hay entre dos registros simultáneos. El intervalo de registro debe ser un múltiplo entero del intervalo de muestreo y un número entero de intervalos de registro.

El valor del parámetro registrado por cada registro es un promedio, máximo, mínimo, suma o alguna otra función de las muestras adquiridas durante el intervalo de registro de manera que tenga la forma más apropiada para la cantidad medida. El registro también puede incluir información complementaria, tales como promedio de muestras, número de muestras perdidas, errores de codificación, transitorios o cualquier otro dato de interés particular.

Un reporte está definido como un valor agregado que cubre múltiples intervalos de registros, teniendo en cuenta que el periodo de reportes es el tiempo entre dos reportes sucesivos. Típicamente los periodos temporales de reporte son más grandes (semanas, meses, etc.)

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR



- Clasificación De Los Sistemas De Medida [IEC61724-1]

Clasificación de los sistemas de medida [IEC61724-1]

| | | | | | |
|----------------|-------------------------|----------------|--------------------------|----------------|---------------------------|
| Clase A | - Alta exactitud | Clase B | - Exactitud Media | Clase C | - Exactitud Básica |
|----------------|-------------------------|----------------|--------------------------|----------------|---------------------------|

**Máximo intervalo
de muestreo**

| | | | |
|---|----|--------|--------|
| Para irradiancia, temperatura y viento | 3s | 1min** | 1min** |
|---|----|--------|--------|

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

| | | | |
|---------------------------------|-------|--------|--------|
| Para lluvia, nieve y humedad | 1 min | 1min** | 1min** |
| Máximo intervalo de registro | 1 min | 15min | 60min |

**El intervalo de muestreo indicado requerido para clase B y clase C aplican para las mediciones realizadas a nivel terrestre, no aplica para estaciones o puntos de medición satélite de irradiancia o parámetros meteorológicos. (Considerando que un instrumento sobre tierra requiere de múltiples mediciones para obtener un promedio correcto debido a las condiciones de nubosidad que pudiesen afectar la medida del parámetro de interés)

Apéndice C Procesos de calibración recomendados

Proceso De Calibración De Piranómetro Por Comparación Con Piranómetro De Referencia Recomendada Por El Fabricante (ISO 9847 Calibración De Un Piranómetro De Campo Por Comparación Con Piranómetro De Referencia)

- Generalidades

El piranómetro de referencia y el piranómetro a calibrar se disponen lado a lado bajo una luz artificial estable que simula la irradiación del sol. Esta fuente de irradiación debe provenir de una lámpara de descarga de gas de alta presión de haluro metálico de 150W que cuente con un estabilizador de tensión, asimismo debe contar con un reflector de diámetro 16.2cms. El reflector se debe disponer a 115 cm sobre los piranómetros. Estas condiciones generaran una irradiancia sobre los piranómetros de aproximadamente 500W/m².

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

Para garantizar que la irradiación emitida por la fuente descrita llegue en su gran mayoría a los piranómetros se restringe la emisión de irradiación con un cono que rodee los dos piranómetros y que incluya la fuente de irradiación. El piranómetro a calibrar y la referencia deben ser ubicados lado a lado en una superficie que se pueda rotar, es decir, que sea posible intercambiar las posiciones del piranómetro a calibrar y el piranómetro de referencia, en ese sentido, la fuente de irradiación debe estar centrada y coincidir con el eje rotacional de la superficie a rotar. Con la fuente dispuesta de esta manera no debería existir una incidencia de la componente normal de la irradiación emitida por la fuente ya que ambos tendrán un ángulo de incidencia de aproximadamente 3° .

- **Descripción del procedimiento de calibración por de piranómetro por comparación con piranómetro de referencia recomendada por el fabricante KIPP & ZONEN.**

El piranómetro de referencia y el piranómetro a calibrar son ubicados lado a lado recordando que la posición de estos debe ser intercambiable entre sí. Como se mencionó previamente la fuente de irradiación usada debe iluminarlos a razón de $500\text{W}/\text{m}^2$. Aproximadamente.

Los piranómetros deben ser expuestos durante un minuto a la irradiación emitida por la fuente descrita, a continuación, se deben medir las salidas de tensión de estos. A estos valores se les conocerá como V_{R1} y V_{T1} , seguidamente se deben cubrir los piranómetros con una superficie que no permita el paso de la luz proveniente de la fuente durante un minuto, en ese sentido, se mide nuevamente las salidas de tensión para cada uno de los radiómetros y a estos valores de tensión se les conocerá como V_{O-R1} y V_{O-T1} o tensiones de offset. El orden de magnitud para las tensiones de offset de un piranómetro Kipp & Zonen es de unos cuantos W/m^2 .

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

Para disminuir los posibles errores por la no homogeneidad del fenómeno de irradiación emitido por la fuente, se invierten las posiciones de los radiómetros, se repite el procedimiento, se obtiene V_{R2} , V_{T2} , V_{O-R2} , V_{O-T2} y se obtiene la sensibilidad del piranómetro a calibrar a partir de la sensibilidad conocida del piranómetro de referencia.

$$S_T = S_R * \frac{(T_1 + T_2)}{(R_1 + R_2)}$$

Donde:

S_T = Sensibilidad del piranómetro a calibrar

S_R = Sensibilidad del piranómetro de referencia

$$T_1 = V_{T1} - V_{O-T1}$$

$$T_2 = V_{T2} - V_{O-T2}$$

$$R_1 = V_{R1} - V_{O-R1}$$

$$R_2 = V_{R2} - V_{O-R2}$$

Finalmente se obtiene un factor de estabilidad de irradiancia emitido por la fuente, el cual debe encontrarse dentro del rango de estabilidad. En caso de que el factor se encuentre por fuera del rango permisible de fluctuación de la estabilidad la calibración debe ser rechazada.

$$S_F = \frac{R_1 * T_1}{R_2 * T_2}$$

En ese sentido, el rango de estabilidad está definido por el siguiente intervalo

$$0.98 < S_F < 1.02$$

Es importante aclarar que las variaciones en la fuente debidas a la inestabilidad de la tensión de alimentación podrían afectar el cálculo de la sensibilidad del piranómetro a calibrar, es por esto que, resulta muy importante realizar las mediciones de las salidas de tensión de ambos radiómetros simultáneamente con el fin de desprejar los posibles efectos causados por la fuente.

Apéndice D Características electrónicas del piranómetro utilizado

Piranómetro SMP3

Este medidor de irradiancia es de bajo mantenimiento, cuenta con salidas digitales y analógicas amplificadas adaptadas a los estándares industriales, usa el protocolo de comunicación serial Modbus, la información adquirida tiene respuesta mejorada temporal y térmicamente, es fácil de adaptar a las diferentes estaciones meteorológicas ya que cuenta con un amplio rango de polarización, cuenta con protección para sobretensiones, polaridad inversa y cortocircuito.

Este sensor mide la Irradiación solar global sobre una superficie horizontal, si esta inclinado en el mismo sentido que una superficie de interés este medirá la irradiación solar global sobre la superficie.

- Características Técnicas Relevantes

Especificaciones

ESTIMACIÓN DE LAS COMPONENTES DE IRRADIANCIA SOLAR

| | |
|---|---------------------|
| Rango Espectral | [300-2800]nm |
| Tiempo de respuesta (63%) | <1.5 s |
| Tiempo de respuesta (95%) | <12 s |
| Zero offset A | <15W/m ² |
| Zero offset B | <5W/m ² |
| Respuesta direccional (hasta 80°C con 1000W/m ² directos) | 20W/m ² |
| Dependencia térmica de la sensibilidad(-20°C hasta 50°C) | <3% |
| Salida Analógica (Tensión) | [0-1]V |
| Salida Analógica (Corriente) | [4-20]mA |
| Salida Digital | 2-wire RS-485 |

Las características deben ser constatadas con otro piranómetro de referencia para determinar los gaps existentes
entre dispositivos
