



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS



TESIS

DISEÑO DE UN DISPOSITIVO PARA ESTIMAR Y PREDECIR LA RADIACIÓN SOLAR EN LAMBAYEQUE UTILIZANDO MODELOS EMPÍRICOS Y REDES NEURONALES

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
ELECTRÓNICO**

PRESENTADO POR

BACH. MANUEL DIAZ DELGADO

BACH. JOSÉ EDUARDO TORO TELLO

LAMBAYEQUE, PERÚ

2019

FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA



**DISEÑO DE UN DISPOSITIVO PARA ESTIMAR Y PREDECIR LA
RADIACIÓN SOLAR EN LAMBAYEQUE UTILIZANDO MODELOS
EMPÍRICOS Y REDES NEURONALES**

**PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
ELECTRÓNICO**

PRESENTADO POR:

BACH. MANUEL DIAZ DELGADO

BACH. JOSÉ EDUARDO TORO TELLO

ASESOR:

ING. CARLOS LEONARDO OBLITAS VERA

LAMBAYEQUE, PERÚ

2019



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS



TESIS

DISEÑO DE UN DISPOSITIVO PARA ESTIMAR Y PREDECIR LA RADIACIÓN SOLAR EN LAMBAYEQUE UTILIZANDO MODELOS EMPÍRICOS Y REDES NEURONALES

Como requisito para obtener el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

Aceptada por la Escuela Profesional de Ingeniería Electrónica

Ing. HUGO CHICLAYO PADILLA
PRESIDENTE

Ing. MARTIN NOMBERRA LOSSIO
SECRETARIO

Ing. OSCAR ROMERO CORTEZ
VOCAL

LAMBAYEQUE, PERÚ

2019



UNIVERSIDAD NACIONAL PEDRO RUIZ GALLO
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS



TESIS

DISEÑO DE UN DISPOSITIVO PARA ESTIMAR Y PREDECIR LA RADIACIÓN SOLAR EN LAMBAYEQUE UTILIZANDO MODELOS EMPÍRICOS Y REDES NEURONALES

Como requisito para obtener el Título Profesional de Ingeniero Electrónico

Sustentada por:

BACH. MANUEL DIAZ DELGADO

TESISTA

BACH. JOSÉ EDUARDO TORO TELLO

TESISTA

Asesorado por:

Ing. CARLOS LEONARDO OBLITAS VERA
ASESOR

LAMBAYEQUE, PERÚ

2019

Agradecimientos

A

gradecemos a Dios por bendecirnos la vida, por guiarnos a lo largo de nuestra

existencia, por ser el apoyo y fortaleza en aquellos momentos de dificultad y de debilidad. Gracias a nuestros padres: Domingo Toro y Edita Tello; Lucelina Delgado, hermanas y demás familiares; por ser los principales promotores de nuestros sueños, por confiar y creer en nuestras expectativas, por los consejos, valores y principios que nos han inculcado.

Agradecemos a nuestros docentes de la Escuela de Ingeniería Electrónica de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, por haber compartido sus conocimientos a lo largo de la preparación de nuestra profesión, de manera especial, al Ingeniero Carlos Oblitas Vera, asesor de nuestro proyecto de investigación quien ha guiado con su paciencia, su rectitud como docente y por su valioso aporte para nuestra investigación.

Los Autores

Dedicatoria

Esta tesis está dedicada con mucha estima, mucho afecto y cariño a:

A nuestros padres, por su amor, trabajo y sacrificio en todos estos años, gracias a ustedes hemos logrado llegar hasta aquí y convertirnos en lo que somos. Ha sido el orgullo y el privilegio de ser sus hijos, son los mejores padres.

A nuestros familiares especialmente a mi hermano Elmer Toro y nuestras madres Edita Tello y Lucelina Delgado por estar siempre presentes, acompañándonos y por el apoyo moral, que nos brindaron a lo largo de esta etapa de nuestras vidas.

A todas las personas que nos han apoyado y han hecho que el trabajo se realice con éxito en especial a aquellos que nos abrieron las puertas y compartieron sus conocimientos

Los Autores

Resumen

Lambayeque es una ciudad con mucho potencial solar, pero no se dispone de información confiable ni mediciones in situ de radiación solar. En el presente trabajo se diseña un dispositivo que permita estimar y predecir la radiación solar diaria en Lambayeque ($6^{\circ}42'$ S, $79^{\circ}54'$ O) utilizando modelos matemáticos y redes neuronales artificiales (RNAs).

Los modelos matemáticos son ecuaciones que estiman la radiación solar a partir de datos atmosféricos, como temperatura, humedad, altura, nubosidad, etc. Existen distintos modelos para estimar la radiación. En la presente tesis se analizan 5 modelos matemáticos, después de un análisis estadístico se selecciona el modelo de Ertekin-Yaldiz para utilizarse como estimador de radiación en la ciudad de Lambayeque el cual utiliza la temperatura promedio diaria como dato de entrada.

El prototipo del dispositivo electrónico será implementado utilizando un Arduino y estará equipado con una celda solar, un sensor de humedad y temperatura y un sensor de corriente y voltaje. El dispositivo medirá la temperatura cada 15 minutos y al final del día calculará la temperatura promedio diaria a partir de la cual utilizando el modelo matemático calculará el valor de la radiación solar global diaria en $\text{kWh/m}^2/\text{día}$. Para los cálculos los datos de temperatura fueron proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú SENAMHI, mientras que los valores promedios mensuales de radiación se obtuvieron de la base de datos de la NASA.

Posteriormente el dispositivo medirá la potencia producida por la celda solar (midiendo la corriente y la tensión en la celda solar) esta potencia depende de la radiación solar por lo que mediante una adecuada ecuación de regresión se podrá determinar la curva de radiación solar diaria.

Para predecir la radiación solar diaria utilizaremos dos métodos, primero utilizando el modelo matemático y datos de temperatura provistos por bases de internet y finalmente mediante una red neuronal artificial (RNA).

El valor promedio de irradiación solar global obtenido fue de 5.38 kWh/m^2 , proporcionando una energía total anual de 1.96 MWh/m^2 . Estos resultados se aplicarán a la simulación de sistemas fotovoltaicos instalados en la localidad de Lambayeque, Perú.

Los Autores.

Abstract

Lambayeque is a city with a lot of solar potential, but reliable information and in situ measurements of solar radiation are not available. In the present work, a device is designed to estimate and predict daily solar radiation in Lambayeque ($6^{\circ} 42' \text{S}$, $79^{\circ} 54' \text{W}$) using mathematical models and artificial neural networks (ANNs).

Mathematical models are equations that estimate solar radiation from atmospheric data, such as temperature, humidity, height, cloudiness, etc. There are different models to estimate radiation. In the present thesis, 5 mathematical models are analyzed, after a statistical analysis, the Ertekin-Yaldiz model is selected to be used as a radiation estimator in the city of Lambayeque, which uses the average daily temperature as input data.

The prototype of the electronic device will be implemented using an Arduino and will be equipped with a solar cell, a humidity and temperature sensor and a current and voltage sensor. The device will measure the temperature every 15 minutes and at the end of the day it will calculate the average daily temperature from which, using the mathematical model, it will calculate the value of the daily global solar radiation in $\text{kWh} / \text{m}^2 / \text{day}$. For the calculations the temperature data were provided by the National Meteorology and Hydrology Service of Peru SENAMHI, while the average monthly values of radiation were obtained from the NASA database.

Subsequently the device will measure the power produced by the solar cell (measuring the current and voltage in the solar cell) this power depends on the solar radiation so

By means of a suitable regression equation, the daily solar radiation curve can be determined. To predict the daily solar radiation we will use two methods, first using the mathematical model and temperature data provided by internet bases and finally by means of an artificial neural network (ANN).

The average value of global solar irradiation obtained was $5.38 \text{ kWh} / \text{m}^2$, providing a total annual energy of $1.96 \text{ MWh} / \text{m}^2$. These results will be applied to the simulation of photovoltaic systems installed in the town of Lambayeque, Peru.

Los Autores

INTRODUCCIÓN	1
1.1 SÍNTESIS DE LA SITUACIÓN PROBLEMÁTICA	1
1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	2
1.3 JUSTIFICACIÓN	2
1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN	3
1.4.1 <i>Objetivo General</i>	3
1.4.2 <i>Objetivos Específicos</i>	3
1.5 HIPÓTESIS	3
1 DISEÑO TEÓRICO	4
1.1 ESTADO DEL ARTE	4
1.1.1 <i>Antecedentes Internacionales</i>	4
1.1.2 <i>Antecedentes Nacionales</i>	5
1.2 ENERGÍAS RENOVABLES, ENERGÍA SOLAR E IMPACTO AMBIENTAL	6
1.3 RADIACIÓN SOLAR Y ASTRONOMÍA SOLAR	11
1.4 CELDAS SOLARES Y SU FUNCIONAMIENTO	17
1.4.1 <i>Modelo de una celda solar</i>	18
1.5 MODELOS PARA RADIACIÓN SOLAR	24
1.6 REDES NEURONALES	27
1.7 ARDUINO	30
2 MÉTODOS Y MATERIALES	35
2.1 METODOLOGÍA	35
2.2 DISEÑO DEL SISTEMA	36
2.2.1 <i>Sub-sistema sensores</i>	37
2.2.2 <i>Sub-sistema de procesamiento de datos</i>	37
2.2.3 <i>Sub-sistema de estimación de radiación</i>	37
2.2.4 <i>Sub-sistema de predicción de radiación</i>	37
2.3 LUGAR DE ESTUDIO	38
2.3.1 <i>Datos meteorológicos y de radiación</i>	40
2.4 MODELOS MATEMÁTICOS	46
2.4.1 <i>Astronomía Solar</i>	46
2.4.2 <i>Modelo de Bristow-Campbell</i>	49
2.4.3 <i>Modelo de Hargreaves-Samani</i>	51
2.4.4 <i>Modelo de Annandale</i>	52
2.4.5 <i>Modelo de Chen</i>	52
2.4.6 <i>Modelo de Ertekin y Yaldiz</i>	52
2.4.7 <i>Evaluación de los modelos matemáticos</i>	53
2.5 SENSORES Y CONTROL	54
2.6 MATERIALES	56

3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	58
3.1	MODELOS EMPÍRICOS	58
3.1.1	<i>Astronomía Solar</i>	58
3.1.2	<i>Selección del modelo adecuado</i>	84
3.2	DISEÑO DEL DISPOSITIVO	85
3.2.1	<i>Sensores</i>	85
3.2.2	<i>Procesamiento</i>	90
3.2.3	<i>Red Neuronal</i>	91
4	CONCLUSIONES	93
5	RECOMENDACIONES	95
	BIBLIOGRAFÍA	96
	ANEXOS	99

Índice de Figuras

Figura 1 :Espectro solar	12
Figura 2: Radiación solar en la tierra.	13
Figura 3: Hora Solar Pico	14
Figura 4: Radiación directa y difusa.15	
Figura 5: Astronomía Solar	16
Figura 6: Celda Solar	17
Figura 7: Circuito equivalente de una celda solar	18
Figura 8: Curva de potencia	19
Figura 9: Curva en función de la radiación	19
Figura 10: Circuito equivalente de celda solar.	21
Figura 11: Influencia de la resistencia en la curva IV.	22
Figura 12: Influencia de la resistencia en la curva IV.	22
Figura 13: Variación de la curva IV.	23
Figura 14: Red Neuronal	29
Figura 15: Red Neuronal 2	29
Figura 16: Arduino Mega.	30
Figura17: Arduino Mega	31
Figura 18: Entorno de Arduino	34
Figura 19: Metodología.	35
Figura 20: Diagrama del dispositivo.	36
Figura 21: Ubicación de Lambayeque	38
Figura 22: Mapa de Koppen-Geiger para el Perú	39
Figura 23: Datos de radiación promedio según el atlas de Energía Solar del Perú.	43
Figura 24: Temperatura máxima y mínima en Lambayeque.	44
Figura 25: Precipitación en Lambayeque.	45
Figura 26: Diagrama de control y sensores.	55
Figura 27: Valores de declinación diaria en $[\circ]$, se indican los valores para el 15 de cada mes.	59
Figura 28: Radiación extraterrestre	64
Figura 29: Ajuste de modelo de Bristow Campbell	66
Figura 30: Valores estimados por Bristow-Campbell	67
Figura 31: Comparación entre los valores estimados por el modelo de Hargreaves-Samani y los valores reales.	68
Figura 32: Diferencia de temperaturas en Lambayeque.	70
Figura 33: Ajuste del modelo de Hargreaves-Samani.	71

Figura 34: Valores estimados por el modelo de Hargreaves-Samani	72
Figura 35: Comparación entre los valores estimados por el modelo de Hargreaves-Samani y los valores reales.	73
Figura 36: Ajuste del modelo de Annandale (basado en el modelo de Hargreaves-Samani).	75
Figura 37: Valores estimados por el modelo de Annandale.	76
Figura 38: Comparación entre valores estimados y reales.	77
Figura 39: Ajuste del modelo de Chen.	79
Figura 40: Valores estimados por el modelo de Chen.	80
Figura 41: Comparación entre valores estimados y reales según el modelo de Chen.	81
Figura 42: Ajuste del modelo de Ertekin-Yaldiz	83
Figura 43: Estimación del modelo de Erlekin-Yaldiz	84
Figura 44: Comparación entre valores estimados y medidos.	85
Figura 45: Conexión de temperatura al Arduino	87
Figura 46: Diagrama de flujo para procesamiento de datos de temperatura.	88
Figura 47: Diagrama de flujo para la obtención de la temperatura promedio.	89
Figura 48: Conexión del sensor de corriente.	90
Figura 49: Sensor de corriente ACS712	90
Figura 50: Conexión del voltímetro	91

Índice de Tablas

Tabla 1: Irradiación global promedio en un plano horizontal [kWh/m ² /día]	41
Tabla 2: Irradiación directa promedio en un plano horizontal [kWh/m ² /día]	42
Tabla 3: Irradiación difusa promedio en un plano horizontal [kWh/m ² /día]	42
Tabla 4: Valores para el ángulo diario en [°] considerando el día 15 de cada mes, los números en rojo indican valores negativos.	59
Tabla 5: Valores para el ángulo de declinación en [°] considerando el día 15 de cada mes, los números en rojo indican valores negativos.	61
Tabla 6: Valores para el ángulo horario considerando el día 15 de cada mes, los números en rojo indican valores negativos.	62
Tabla 7: Parámetros estadísticos para el modelo de Bristow-Campbell.	66
Tabla 8: Parámetros estadísticos para el modelo de Hargreaves-Samani.	70
Tabla 9: Parámetros estadísticos para el modelo de Annandale.	73
Tabla 10: Parámetros estadísticos para el modelo de Chen.	77
Tabla 11: Parámetros estadísticos para el modelo de Ertekin-Yaldiz	81
Tabla 12: Parámetros estadísticos de los modelos evaluados.	84

INTRODUCCIÓN

“La fuente de nuestra riqueza se da en la radiación del sol, que emana energía. El sol da siempre sin esperar recibir”

GEORGES BATAILLE

En este capítulo sentaremos las bases de la investigación a realizar, haremos una descripción de la situación problemática y la justificación de la investigación lo que nos llevará a formular el problema, sentar una hipótesis y formular los objetivos de la investigación.

1.1 SÍNTESIS DE LA SITUACIÓN PROBLEMÁTICA

El gran incremento de la demanda de energía eléctrica producido en las últimas décadas y el impacto ambiental que tiene la producción de energía por fuentes convencionales han llevado a buscar alternativas para producción de energía eléctrica que sean amigables con el medio ambiente.

La energía solar es una de las alternativas más atractivas ya que es muy abundante y su acceso a ella es prácticamente gratuito.

En el Perú los proyectos de energía solar tienen un gran potencial de desarrollo y de rentabilidad debido a su ubicación geográfica y al gran recurso solar existente, pese a esto la energía producida a partir de sistemas fotovoltaicos o termosolares es menor al 1%. (OLADE, 2017). Lambayeque es una ciudad que presenta un potencial solar muy alto lo que la hace ideal para posibles proyectos de generación de energía, de acuerdo a la OLADE Lambayeque posee una alta rentabilidad en aplicaciones de radiación solar, con una radiación promedio superior a 5 kWh/m².

La radiación solar es uno de los parámetros más importantes para el desarrollo de aplicaciones e investigaciones relacionadas a energías renovables, **para el dimensionamiento de sistemas generadores de energía solar fotovoltaica o térmica es necesario contar con datos diario y hasta horarios de radiación solar (Da Silva, da Silva, Alves Junior, & de P. Carvalho, 2012; Kaplanis & Kaplani, 2007)**, sin estos datos el desarrollo de proyectos con base en la energía solar no pueden materializarse.

En Lambayeque, como en la mayoría de ciudades del Perú, pese al gran recurso energético y potencial solar no se cuenta con datos confiables de radiación solar horaria ni diaria que permitan su uso en proyectos, investigaciones o emprendimientos que promuevan el uso de la energía solar. Esta falta de datos es una de las principales causas por la que no se desarrollan proyectos de energía solar en la región.

1.2 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Cómo un dispositivo basado en modelos matemáticos empíricos y redes neuronales estima y predice la radiación solar en Lambayeque?

1.3 JUSTIFICACIÓN

Un conocimiento preciso de la disponibilidad de radiación solar en una ubicación geográfica particular es de vital importancia para el desarrollo de los sistemas de energía solar y para la estimación de su eficiencia y rendimiento, conocer los datos de radiación solar es un requisito previo para el diseño de sistemas de energía fotovoltaica y térmica solar. Los arquitectos, agricultores, ingenieros de aire acondicionado y diseñadores de energía también requieren el conocimiento de los datos de radiación solar para el diseño y operación adecuados de proyectos de ingeniería.

La información sobre la radiación también es valiosa para los estudios de balance de energía atmosférica, climatología y contaminación, análisis de la carga térmica en edificios, sistemas de captación de energía solar y viabilidad económica de los métodos.

Lamentablemente, la red de estaciones que miden los datos de radiación solar es escasa en muchos países en desarrollo, como el Perú, y solo algunas estaciones están bien equipadas para la medición de la radiación solar diaria de forma constante.

Los valores medios mensuales medidos de la irradiación diaria, suelen ser la mejor fuente de información y proporcionan el punto de partida para muchos cálculos. La utilidad de los promedios mensuales a largo plazo de la radiación diaria puede entenderse por el hecho de que en un lugar en particular estos promedios son relativamente constantes, de modo que los valores pasados se pueden usar para estimar valores futuros. Cuando los datos de radiación solar no están disponibles, entonces hay una posibilidad de utilizar modelos matemáticos empíricos para realizar estimaciones razonables de radiación de los parámetros meteorológicos comúnmente disponibles, como las horas de sol, la humedad relativa, las temperaturas máximas y mínimas y la cobertura de nubes de esa ubicación geográfica.

Además de estimar la radiación y saber su valor es de mucho valor poder predecirla, en los últimos años las redes neuronales han sido utilizadas para predecir el clima, precios, emisiones y hasta comportamiento de clientes. Debido a que la radiación solar depende en mucha parte de parámetros meteorológicos que pueden ser predichos, se pretende utilizar una red neuronal para predecir la radiación solar en Lambayeque.

1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.4.1 Objetivo General

Estudiar la factibilidad de un dispositivo electrónico que estime y prediga la radiación solar global diaria mediante el empleo de modelos matemáticos empíricos y redes neuronales.

1.4.2 Objetivos Específicos

- Obtener datos meteorológicos de estaciones meteorológicas cercanas a la zona de estudio.
- Cuantificar los datos obtenidos de las estaciones meteorológicas.
- Adaptar modelos físico-matemáticos empíricos (Annandale, Bristow-Campbell, Hargreaves-Samani, Chen, Ertekin- Yaldiz, etc) para estimar la radiación solar en Lambayeque.
- Determinar el modelo empírico más adecuado para estimar la radiación solar diaria en Lambayeque.
- Realizar el programa para estimar la radiación en Arduino.
- Proponer una red neuronal artificial que estime la radiación solar diaria en Lambayeque de manera confiable.
- Diseñar el dispositivo que pueda estimar y predecir la radiación utilizando los modelos matemáticos y las redes neuronales.

1.5 HIPÓTESIS

Si se diseña un dispositivo electrónico basado en modelos y redes neuronales artificiales se puede estimar y predecir la radiación solar global diaria en Lambayeque.

1 DISEÑO TEÓRICO

1.6 ESTADO DEL ARTE

1.6.1 Antecedentes Internacionales

- a) En *Estimation of solar radiation by air temperature models for three regions of Minas Gerais*(Da Silva et al., 2012), se evalúan 9 modelos empíricos para estimar la radiación solar incidente a partir de la temperatura en 3 áreas del estado de Minas Gerais en Brasil. Se utilizan los modelos de Hargreaves, Annandale, Chen, Bristow-Campbell, Donatelli-Campbell y Hunt. Los datos utilizados fueron obtenidos de las estaciones meteorológicas instaladas en las zonas de estudio y proporcionadas por el Instituto Nacional de Meteorología (INMET), para todos los modelos se obtuvieron los coeficientes de calibración logrando obtener la estimación proporcionada por cada uno de ellos y así determinar el modelo más confiable para cada localidad, se concluyó que el modelo de Hargreaves es el más adecuado para estimar la radiación en estas áreas.
- b) En *Estimación de la radiación solar global diaria en el Cantón-Cuenca mediante la aplicación del modelo Bristow-Campbell*(Delga Orellana & Orellana Samaniego, 2015) en la Universidad Politécnica Salesiana de Ecuador se aplica el modelo de Bristow-Campbell para la estimación de la radiación solar diario en el cantón Cuenca, Ecuador. Los datos de radiación solar global, temperatura máxima y mínima y precipitación de 16 puntos utilizados fueron proporcionados por el Instituto de Eficiencia Energética y Energías Renovables (INER), concluyeron que es factible aplicar el modelo de Bristow-Campbell para estimar la radiación solar global en Cuenca, Ecuador.
- c) En *Estimación de radiación solar horario utilizando modelos matemáticos empíricos y redes neuronales artificiales*(Adrian Jimenez, Will, & Rodríguez, 2017), en Argentina se aplica un método para estimar radiación solar horaria, basado en redes neuronales, utilizando como variables de entrada estimaciones de radiación solar obtenidas mediante un modelo matemático simple y variables climáticas de fácil adquisición: Temperatura, Presión y Humedad. Además, para comprobar que las redes neuronales son más adecuadas en estos casos se hizo una comparativa con estimaciones realizadas con regresión lineal. Los modelos generados fueron ajustados y validados con datos provenientes de cinco estaciones meteorológicas de la provincia de Tucumán, Argentina, logrando obtener en promedio un error de 11.0% (Root Mean Squared Error) con regresión lineal y 7.84% con redes neuronales.

1.6.2 Antecedentes Nacionales

- d) En el *Atlas Solar del Perú*(*SENAMHI, 2003*), se da a conocer las zonas potenciales para aprovechamiento energético en el Perú, el Atlas está comprendido por mapas promedio de energía solar incidente a nivel mensual y anual para el período 1975-1990, los cuales se obtuvieron utilizando técnicas de estimación e interpolación fundamentados en procesos físicos, en la mayoría de mapas se utilizó el modelo de Bristow-Campbell. Este Atlas es el primer esfuerzo para tener datos confiables del recurso solar a nivel nacional.
- e) En *Desarrollo del modelo Bristow-Campbell para estimar la radiación solar global de la región de Junín, Perú*,(*Camayo-Lapa, Massipe-Hernandez, Pamachagua-Paucar, Torres-Ten, & Quispe-Flores, 2015*) , de la Universidad Nacional del Centro del Perú se adapta el modelo de Bristow-Campbell para estimar la radiación solar global media mensual con el propósito de contar con una herramienta que estime la radiación solar mensual y anual sobre la superficie horizontal terrestre en la Región Junín, zona en la cual no se dispone con esta información. Para desarrollar el modelo de Bristow-Campbell que estima la radiación solar global diaria media mensual se registraron las temperaturas máximas y mínimas diarias de 19 estaciones meteorológicas y las ecuaciones propuestas por el Atlas Solar del Perú 2003 se adaptaron a dicho modelo.
- f) En *Estimación de la radiación solar diaria y ángulos de inclinación óptimos para Lambayeque (Perú) utilizando el modelo de Hargreaves-Samani*(*Gastelo-Roque, Morales-Acevedo, & Tineo Soto, 2018*), de la Universidad Nacional Pedro Ruiz Gallo, se aplica el modelo propuesto por Hargreaves-Samani para estimar la irradiación solar diaria en la Ciudad de Lambayeque y se determina el ángulo óptimo para captar la mayor radiación solar. Para los datos de temperaturas máxima y mínima diarios se usaron datos proporcionados por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú SENAMHI, mientras que los valores promedios mensuales de radiación se obtuvieron de datos proporcionados por la NASA. Luego, mediante un ajuste por mínimos cuadrados se obtuvo la constante de ajuste en el modelo de Hargreaves-Samani, con esto calculan la radiación diaria y finalmente, obtienen los valores de inclinación óptimos a partir de las expresiones generales de astronomía solar para la ubicación en estudio.

1.7 ENERGÍAS RENOVABLES, ENERGÍA SOLAR E IMPACTO AMBIENTAL

El sol: fuente de energía

La importancia del sol en el mantenimiento de la vida probablemente ha sido conocida por los humanos en todas las sociedades antiguas, y muchas de estas personas, incluidos los babilonios, los antiguos hindúes, los persas y los egipcios, adoraron al sol. Según los registros escritos, los antiguos griegos fueron los primeros en usar diseños solares pasivos en sus hogares y sin duda experimentaron con el aprovechamiento de la energía del sol de muchas maneras diferentes. Hay una historia que cuenta que Arquímedes, en el siglo II aC, reflejó los rayos del sol desde brillantes escudos de bronce hasta un punto focal y así pudo incendiar las naves enemigas. Los romanos continuaron la tradición de usar el sol en sus hogares e introdujeron el vidrio, lo que permitió que el calor del sol quedara atrapado. Los romanos incluso introdujeron una ley que convertía en una ofensa el ocultar el acceso de un vecino a la luz solar.

Por el contrario, la tecnología fotovoltaica (la creación de un voltaje a partir de la luz) es una aplicación muy reciente. Los científicos, ya en 1818, notaron que la conductividad eléctrica de algunos materiales, como el selenio, aumentaba unos pocos órdenes de magnitud cuando se los expone a la luz solar; sin embargo, no fue sino hasta la década de 1950 que los científicos que trabajaban con transistores en Bell Telephone Laboratories demostraron que el silicio podía usarse como una celda solar efectiva, esto llevó muy pronto al uso de células solares de silicio en naves espaciales; y en 1958, Vanguard 1 fue el primer satélite en utilizar esta nueva invención.

Esta aplicación allanó el camino para una mayor investigación en celdas solares eficientes y más baratas. El trabajo se alentó aún más después del rápido aumento del precio del petróleo en la década de 1970. En 1977, el gobierno de los Estados Unidos creó el Laboratorio Nacional de Energía Renovable. Otra indicación del rápido aumento de la tecnología de células solares de silicio fue la construcción del primer parque solar en 1982 en California, que podría generar 1 MW; esto fue seguido un año más tarde por un parque solar californiano más grande, que podría generar, a plena capacidad, 5,2 MW. Los Estados Unidos ahora han construido varias plantas de energía fotovoltaica en el rango de 250-550 MW. Es increíble pensar que solo 34 años después de que se construyera la primera granja solar en California, China ha construido una granja solar de 850 MW. Además, la capacidad de generación de energía solar fotovoltaica a nivel mundial, a fines de 2016, superaba los 300 GW.

En enero de 2017, se informó que las empresas chinas planean gastar 1.000 millones de dólares para construir una granja solar gigante (de 1 GW) de 2500 hectáreas en Ucrania, en la zona de exclusión al sur de la tierra contaminada por la explosión nuclear de 1986.

La cantidad de energía solar que brilla en la tierra es enorme. Calienta nuestra atmósfera y todo lo que hay en la Tierra y proporciona la energía para nuestro clima y ecosistema. Por la noche, gran parte de esta energía térmica se irradia hacia el espacio a diferentes longitudes de onda.

La luz del sol se puede aprovechar de varias formas ingeniosas e innovadoras, que incluyen el calentamiento solar (generalmente agua), energía fotovoltaica (para la producción de electricidad), energía solar térmica concentrada y también estanques solares, calefacción de espacios, plantas de energía de sal fundida e incluso fotosíntesis artificial. Algunas de estas tecnologías se han desarrollado solo en los últimos 30 años como formas de mitigar el cambio climático y la acumulación de dióxido de carbono atmosférico a partir de la quema de combustibles fósiles. La fuerza de la energía solar radica en su disponibilidad constante y también en la amplia variedad de formas en que puede aprovecharse, desde aplicaciones a pequeña escala hasta aplicaciones a gran escala.

En 2016, la energía renovable suministró menos de un cuarto de la electricidad en el mundo. El total de energía renovable fue del 23.7% se compone de: la hidroelectricidad bombeada es la más prevalente, con 16.6%; viento 4%; y solar solo con 1.5%. A pesar de los valores relativamente bajos para la energía eólica y solar, su tasa de implementación es asombrosamente rápida y las predicciones para el futuro son prometedoras. Como una indicación de lo que vendrá, notamos que el 15 de mayo de 2017 Alemania recibió casi toda su electricidad de fuentes renovables y durante 4 días (del 7 al 10 de mayo de 2017) Portugal funcionó solamente con energías renovables (eólica, solar e hidroeléctrica), en America Latina nuestro principal defensor es Costa Rica que genera más del 98% de su energía eléctrica a partir de fuentes renovables (entre solar, eólica e hidro).

La importancia de las energías limpias

Los combustibles fósiles son el mayor contribuyente al cambio climático y al calentamiento global y la única esperanza de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero es encontrar métodos más limpios para generar electricidad y alimentar nuestros vehículos, esta es quizás la razón más importante para desarrollar formas renovables de energía, como la energía solar.

El acuerdo para mantener el aumento en la temperatura promedio global a menos de 2 ° C en comparación con los niveles preindustriales y para perseguir esfuerzos para permanecer dentro de un aumento de 1.5 ° C, que se realizó en la Conferencia de París de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el cambio climático en diciembre de 2015 fue un gran triunfo en la lucha contra el calentamiento global y el cambio climático. Desafortunadamente, las emisiones continúan aumentando con la concentración promedio de CO₂ en la atmósfera de la Tierra, ahora en 410 ppm. Se ha estimado que el límite de 2°C corresponde aproximadamente a una concentración de 450 ppm.

Para evitar un aumento de temperatura de más de 2 ° C, se requerirá que el suministro de energía en las próximas décadas tenga casi 0 emisiones de carbono. A pesar de estas advertencias, el mundo continúa quemando cantidades cada vez mayores de combustibles fósiles anualmente, especialmente para la producción de electricidad. Gran parte de esto se debe a las exportaciones masivas de carbón de Australia y los Estados Unidos a Japón y China. Otra razón para reducir nuestra dependencia del combustible fósil importado es que mejora nuestra seguridad energética. Después de las interrupciones del suministro de petróleo a principios de la década de 1970, muchas naciones han aumentado su dependencia de los suministros de petróleo extranjero en lugar de disminuirlo, esta mayor dependencia afecta más que solo las políticas energéticas nacionales; conduce a la inestabilidad en la política mundial y “muchas guerras recientes se han librado por el petróleo”.

La creación de empleo es un tema importante y en lugar de gastar dinero en costosas importaciones de combustible, el dinero se puede gastar en desarrollo local, materiales, mano de obra e inversión en energía solar y otras tecnologías renovables. Además, los nuevos desarrollos e investigaciones en energía solar y otras tecnologías de energía renovable pueden impulsar el comercio internacional. El desarrollo de la tecnología de energía solar con su infraestructura conduce a una industria más estable y permanente que la industria petrolera actual, que algún día terminará, el desarrollo de una industria de energía solar puede considerarse como un legado positivo para los niños de nuestros hijos, ya que nunca se agotará.

Con casi un tercio de la población mundial (2.000 millones de personas, principalmente en Asia, Pacífico y África subsahariana) que viven sin acceso a la red eléctrica, la energía solar ofrece grandes posibilidades de mejorar los niveles de vida y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, la energía solar fotovoltaica es particularmente adecuada para regiones remotas en climas cálidos donde generalmente hay una superficie adecuada para la instalación de paneles.

Con el reciente desarrollo de paneles fotovoltaicos de bajo costo y una iluminación LED eficiente, la tecnología ahora puede desplazar a las lámparas de queroseno tradicionales como una alternativa rentable y más segura, no hay necesidad de suministrar combustible para producir electricidad; y además, los paneles fotovoltaicos generan electricidad que se puede usar en el sitio y no hay necesidad de líneas de transmisión costosas.

La energía solar térmica también se puede utilizar para elevar el nivel de vida de casi un tercio de la población mundial que vive sin energía constante y de calidad., la energía solar térmica ofrece una excelente manera de calentar agua sin la necesidad de quemar estiércol de vaca (una de las principales causas de enfermedades oculares, especialmente en la India rural) o madera, que a menudo es escasa.

Aunque la energía solar es una fuente limpia de energía y tiene un impacto ambiental mucho menor que cualquiera de los combustibles fósiles convencionales (carbón, petróleo y gas) su reemplazo de combustibles fósiles no será fácil. En primer lugar, la industria de los combustibles fósiles está muy arraigada en nuestra sociedad y nos hemos vuelto totalmente dependientes de ella. En segundo lugar, el combustible fósil en todas sus manifestaciones, es una forma de energía maravillosamente concentrada que concentra mucha energía en un espacio pequeño, en comparación con las principales formas renovables de energía, la naturaleza concentrada del combustible fósil, que ha tardado 2 mil millones de años en acumularse, significa que las formas renovables de energía están en una desventaja significativa. Sin embargo, los humanos se ven obligados a adaptarse, aunque lentamente. Hay tres fuerzas impulsoras principales para esto: en primer lugar, la quema de carbón en grandes cantidades en centrales eléctricas está causando grandes problemas de smog con problemas respiratorios y de salud (especialmente en China) y esto está obligando a los gobiernos de todo el mundo (especialmente a Europa y China) a considerar seriamente reducir su confianza en la generación de electricidad alimentada por carbón y el desarrollo de fuentes de energía renovables. En Beijing, las escuelas a menudo tienen que cerrar debido al smog y las máscaras protectoras son comunes en el día a día; en segundo lugar, el bombeo de petróleo o gas de pozos mar adentro o costa adentro es cada vez más caro, y esto es particularmente cierto en el caso de los pozos de petróleo, donde las nuevas fuentes se encuentran solo en áreas cada vez más inhóspitas, lo que hace que la minería sea difícil y costosa además de casos ambientalmente desastrosos; tercero, el precio de la energía renovable y, en particular, la energía solar fotovoltaica ha disminuido de \$ 10 por W en 2007 a menos de \$ 1.56 por W para instalaciones en techos y \$ 0.86 por W para instalaciones de granja solar en 2017. La energía solar es ahora que comienza a ofrecer precios competitivos con respecto a la energía del carbón, el gas y el petróleo. Esta rápida reducción de precio en tan solo una década es mucho mejor que la tasa de cambio equivalente para cualquier otra fuente de energía renovable, esto ha llevado a muchos a predecir que pronto la energía solar fotovoltaica será la forma de energía renovable dominante.

Sin embargo, los combustibles fósiles con su alta densidad de energía son demasiado convenientes y la energía eólica y solar es variable, proporcionando energía solo cuando sopla el viento y brilla el sol. El combustible fósil puede suministrar energía cuando es necesario, aunque su extracción y combustión contaminan el medio ambiente, el ahorro de la energía solar y eólica en escenarios de gran penetración (por ejemplo, > 30%) se vinculará a su integración en grandes zonas de equilibrio y al desarrollo de tecnologías de almacenamiento de energía asequibles (Letcher, 2018)

1.8 RADIACIÓN SOLAR Y ASTRONOMÍA SOLAR

El Sol es una esfera de materia gaseosa intensamente caliente con un diámetro aproximado de 1.39×10^9 m, y en promedio a una distancia de 1.5×10^{11} m (distancia conocida como 1UA, 1 unidad astronómica) de la Tierra. Visto desde la tierra, el sol gira sobre su eje aproximadamente una vez cada 4 semanas. Sin embargo, no gira como un cuerpo sólido; el ecuador toma alrededor de 27 días y las regiones polares demoran alrededor de 30 días para cada rotación. El sol tiene una temperatura efectiva de cuerpo negro de 5777 K.¹(Sarbu & Sebarchievici, 2017)

La energía solar es el resultado de la radiación electromagnética liberada del sol por las reacciones termonucleares que ocurren dentro de su núcleo, todos los recursos de energía en la tierra se originan del sol (directa o indirectamente), a excepción de la energía nuclear, mareomotriz y geotérmica.

El sol irradia una energía considerable sobre la tierra. La intensidad de la radiación solar, rara vez superior a 1000 W/m^2 , ha llevado a la creación de muchos tipos de dispositivos para convertir esta energía en formas útiles, principalmente calor y electricidad, la luz radiante y el calor del sol se aprovechan utilizando una gama de tecnologías en constante evolución como el calentamiento solar, PV, CSP, arquitectura solar y fotosíntesis artificial.

El sol irradia en todas las frecuencias y longitudes de onda, desde ondas de radio hasta rayos gamma. Nuestros ojos son sensibles a menos de una octava de este, a una fracción de longitud de onda de 750 a 400 nm, una región conocida, por obvias razones, como **espectro visible**. Aunque es angosto, contiene alrededor del 45% de toda la energía (da Rosa, 2009).

Aproximadamente, la distribución de energía sobre diferentes regiones espectrales es Infrarrojo e inferior ($f < 400 \text{ THz}$, $\lambda > 750 \text{ nm}$) 46.3% Visible ($400 \text{ THz} < f < 750 \text{ THz}$, $400 \text{ nm} < \lambda < 750 \text{ nm}$) 44,6% Ultravioleta y superior ($f > 750 \text{ THz}$, $\lambda < 400 \text{ nm}$) 9.1%).

La distribución de la radiación solar según cada longitud de onda se puede observar en un gráfico de intensidad de radiación (W/m^2 por unidad de longitud de onda en nm) versus longitud de onda, esta gráfica es mostrada en la Fig. 1.

¹ Un cuerpo negro es una cuerpo ideal que absorbe o emite toda la energía, si consideramos al sol como un cuerpo negro (que no lo es) este debería tener 5777 °C.

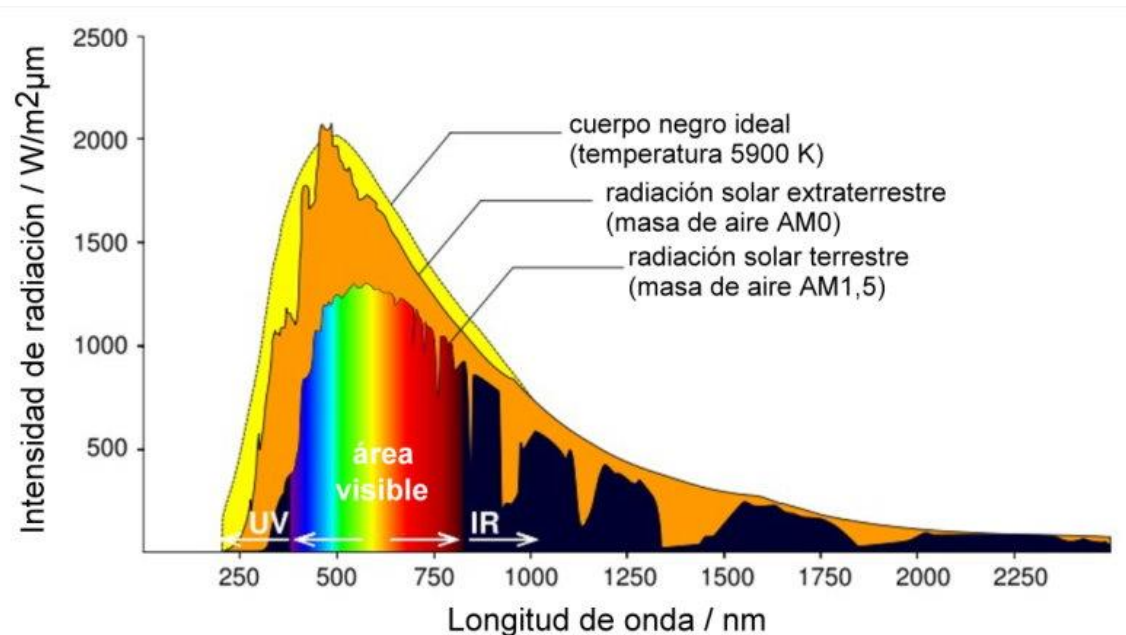


Figura 1: Espectro Solar

Fuente: (da Rosa, 2009)

Se muestra el espectro solar fuera de la atmósfera (extraterrestre) y sobre la superficie terrestre horizontal y además se compara con el espectro que emitiría un cuerpo negro ideal a la temperatura cercana a la del sol. Notamos que los tres espectros son distintos, y esto se explica porque: 1) el sol no es un cuerpo negro ideal así que difiere del espectro que emitiría este y 2) la diferencia entre el espectro extraterrestre y el terrestre es debido a la atmósfera que absorbe y dispersa ciertas zonas del espectro (en especial en la ultravioleta) debido a la presencia de elementos químicos particulares, en especial el Ozono (O_3).

Constante Solar

Para comprender la cantidad de energía que se puede obtener del sol se utiliza la **constante solar**, I_{SCa} , esta representa la energía del sol recibida por unidad de tiempo en un área unitaria de superficie perpendicular a la dirección de propagación de la radiación a una distancia media tierra-sol fuera de la atmósfera. El valor medio de la constante solar fuera de la atmósfera (que no es realmente constante pues varía un poco durante el año, siendo más grande en enero cuando la Tierra está más cerca del sol) es de alrededor de 1360 W/m^2 . Por lo tanto, considerando un área plana global de 1.275×10^{14}

m² y el radio medio de la tierra de aproximadamente 6371 km, la radiación solar total transmitida a la tierra es de $1.74 \times 10^{17} \text{ W}^2$.

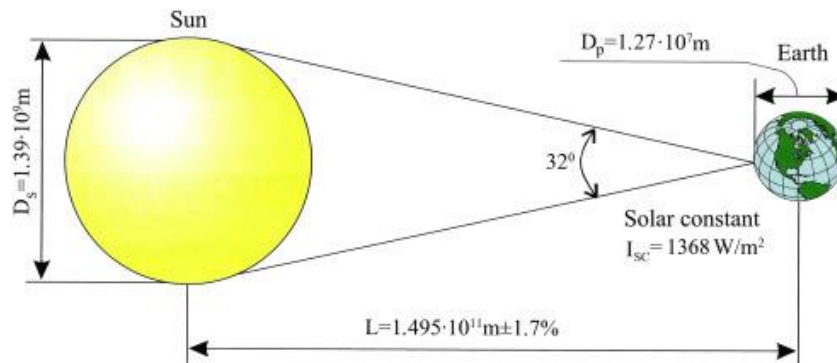


Figura 2: Radiación solar en la tierra.

Fuente: (da Rosa, 2009)

Como hemos mencionado anteriormente la energía que llega fuera de la atmosfera es distinta a la que llega a la superficie terrestre, por lo que la constante solar también lo es, la constante solar en la superficie terrestre se considera de 1000 W/m^2 o lo que es lo mismo 1 kW/m^2 , casi 360 W/m^2 menos que la constante solar extraterrestre.

$$I_{sc} = 1000 \text{ W/m}^2$$

A partir de este momento cuando nos refiramos a constante solar estaremos hablando de la constante solar en la superficie terrestre.

En resumen la constante solar es un valor de la radiación promedio que recibe la tierra en su superficie, al indicar promedio se resalta que en algunos lugares la radiación será mucha mayor que en otros.

La constante solar es un valor importante pues nos permite tener una idea de la radiación solar en determinado lugar, a través de lo que se conoce como hora solar pico (HSP).

La hora solar pico (HSP) es una unidad que mide la radiación solar y se define como la energía por unidad de superficie que se recibiría con una hipotética irradiancia solar constante de 1000 W/m^2 .

² Hay que hacer la aclaración que este valor no es totalmente aprovechable, es simplemente un valor teórico e ideal de la potencia solar que llega a la tierra fuera de la atmosfera, la potencia que llega a la superficie (conocido como Potencial Teórico) es menor, e incluso la energía solar aprovechable (Potencial Aprovechable) es mucho menor pero aun así puede cubrir nuestra demanda energética por si sola.

Una hora solar pico equivale a 3,6 MJ/m² o, lo que es lo mismo, 1 kWh/m², la hora pico solar es fundamental en el dimensionado de los sistemas fotovoltaicos.

Si se representa en un gráfico la distribución horaria de la radiación incidente sobre la superficie terrestre se observa que los niveles varían a lo largo del día. Gráficamente, la hora pico solar se interpreta como una función de valor constante que delimita la misma área que la distribución antes mencionada como se muestra en la Fig. 3.

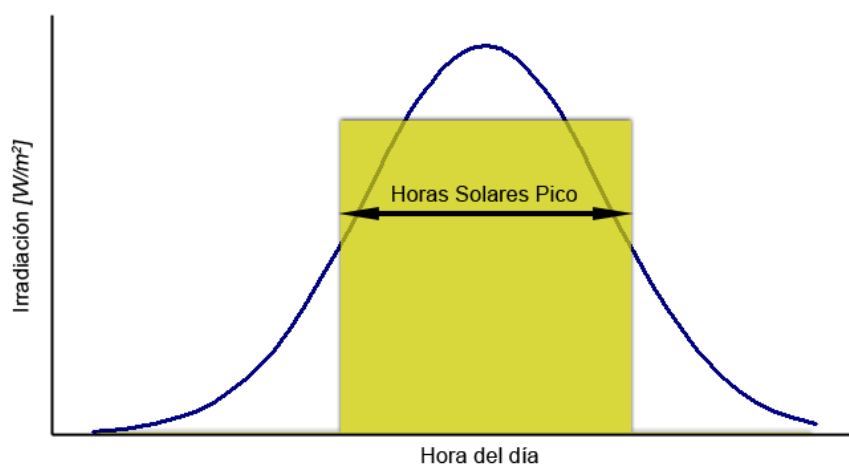


Figura 3: Hora Solar Pico

Fuente: (da Rosa, 2009)

La radiación solar llega a la superficie terrestre como (1) radiación solar directa (haz), (2) radiación solar difusa y (3) radiación reflejada, que puede descuidarse. La radiación total recibida del sol, de una superficie horizontal a nivel del suelo durante un día sereno, es la suma de las radiaciones directas y difusas. La radiación directa depende de la orientación de la superficie receptora. La radiación difusa se puede considerar igual, independientemente de la orientación de la superficie receptora (aunque en realidad existen pequeñas diferencias). La Fig. 4 representa la proporción de la radiación difusa en la radiación total.

La radiación solar total de una superficie terrestre de cualquier orientación e inclinación con un ángulo incidente θ es la suma de la ID del componente directo más el componente difuso Id :

$$IT = ID + Id$$

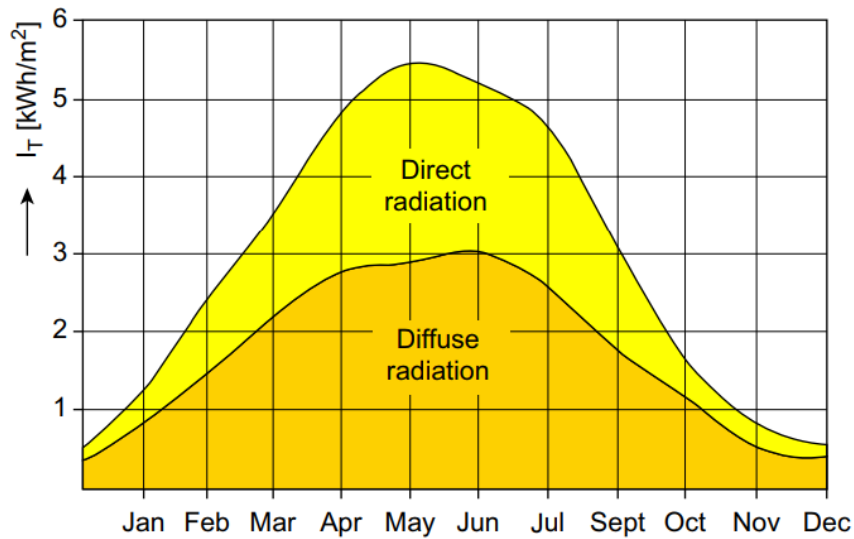


Figura 4: Radiación directa y difusa.

Fuente: (da Rosa, 2009)

La atenuación de los rayos solares está determinada por la composición de la atmósfera y la longitud del camino atmosférico a través del cual viajan los rayos. La longitud del camino se expresa en términos de la masa de aire m , que es la relación de la masa de la atmósfera en el camino real de la Tierra a la masa que existiría si el sol estuviese directamente perpendicular a la superficie terrestre ($m = 1$). Más allá de la atmósfera terrestre, $m = 0$. Para ángulos cenitales θ_z entre 0 y 70°C la masa de aire se puede obtener mediante:

$$m = \frac{1}{\cos(\theta_z)}$$

Astronomía Solar

Ángulo de declinación solar δ .

El ángulo que forma la línea Tierra-Sol con el plano ecuatorial de la Tierra cambia a medida que la tierra recorre su órbita. Este ángulo es la declinación solar δ . Es nulo en los equinoccios y alcanza un máximo de aproximadamente $\pm 23.5^\circ$ en los solsticios. Si bien δ varía en forma instantánea, en un día el cambio es menor a 0.5 o (la mayor tasa de cambio tiene lugar en los equinoccios). De modo que se puede asumir que δ permanece constante durante períodos de 24 horas y depende solamente del ordinal-día n . Bajo este supuesto, la declinación solar se puede estimar a partir de una expresión sencilla

El eje de la Tierra resulta en una variación día por día del ángulo entre la línea Tierra-Sol y el plano ecuatorial de la Tierra llamado declinación solar δ . Este ángulo puede estimarse mediante la ecuación de Cooper (Cooper, 1969):

$$\delta(n) = 23.45 * \sin \left[\frac{360}{365} * (284 + n) \right],$$

Donde n = día del año, con 1 de enero = + 1.

O mediante la ecuación de Spencer (Spencer, 1971):

$$\begin{aligned} \delta(n) = & 0.006918 - 0.0399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - 0.006758 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma \\ & - 0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma \end{aligned}$$

Donde n es lo indicado anteriormente y $\Gamma = \frac{2\pi(n-1)}{360}$ conocido como ángulo diario.

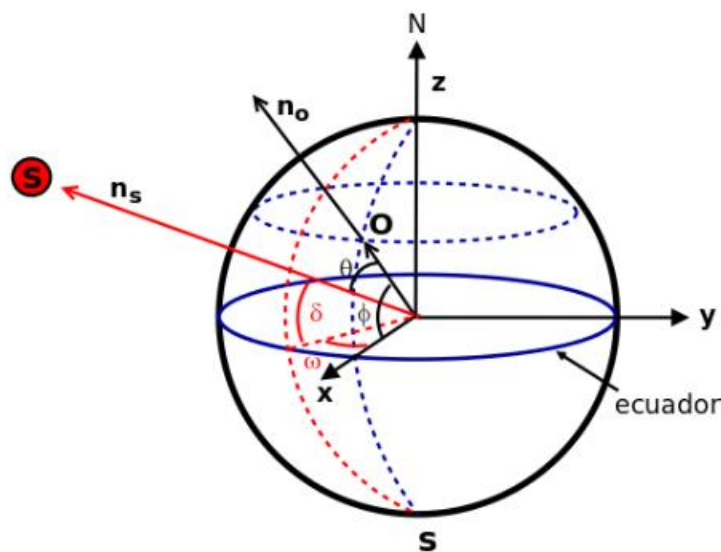


Figura 5: Astronomía Solar

Fuente: (Santos, 2013)

1.9 CELDAS SOLARES Y SU FUNCIONAMIENTO

Celdas Solares

Las celdas solares son los dispositivos que se encargan de transformar la energía proveniente del sol directamente en energía eléctrica a través del efecto fotovoltaico.

El efecto fotovoltaico fue observado por primera vez por Becquerel en 1839, este efecto ocurre en materiales conocidos como semiconductores, los cuales son materiales que tienen propiedades entre conductores y aislantes. Los materiales semiconductores presentan dos bandas de energía, en una de ellas hay presencia de electrones (banda de valencia) y en la otra no hay presencia de ellos es decir la banda está completamente vacía (banda de conducción).

El semiconductor utilizado más comúnmente es el silicio, el segundo elemento más abundante de la tierra. Sus átomos son caracterizados por tener cuatro electrones compartidos con sus vecinos (enlace covalente) creando una red cristalina.

La función de la luz solar en el efecto fotovoltaico es suplir determinada cantidad de energía al electrón más externo para hacer posible que se mueva de la banda de valencia a la banda de conducción en el material, y a consecuencia generar electricidad. Para el caso del silicio es necesario específicamente 1.12 eV de energía para que los electrones puedan pasar a la banda de conducción. Además el material semiconductor debe ser posible absorber una gran parte del espectro solar. Virtualmente todos los dispositivos incorporan una unión PN en un semiconductor. Una celda solar típica es mostrada en la Figura 6. La unión PN es la parte principal de la celda donde la porción de tipo N es donde se recibe la luz y en la parte de abajo es de tipo P.

El componente central de una celda solar es material cristalino absorbente de luz, usualmente silicio cristalino (C-Si). Sin embargo, otros materiales semiconductores han sido empleados y los más usados a nivel comercial son: el silicio policristalino (con 53% de uso) silicio mono-cristalino (38.5%), silicio amorfo (5%), ribbon silicio (3%), Teluro de Cadmio (1.5%), cobre indio di selenio (0.2%).

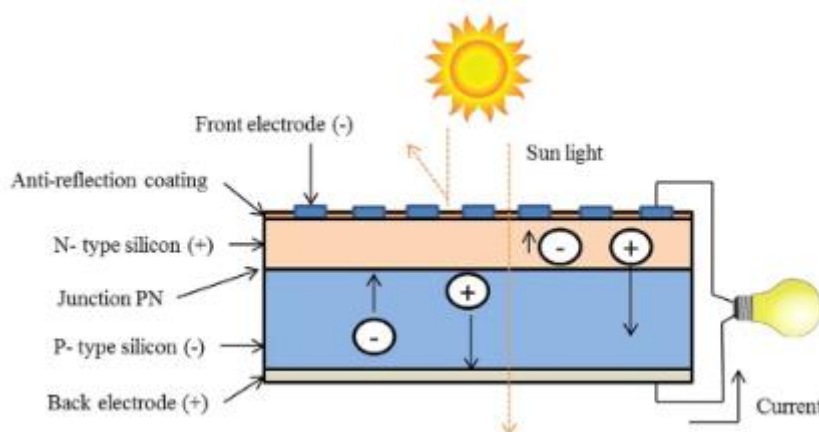


Figura 6: Celda Solar

Fuente: (Tyagi et al, 2013)

1.9.1 Modelo de una celda solar

Para entender el comportamiento electrónico de una celda solar, podemos crear un modelo eléctrico equivalente. El circuito equivalente más usado en PV es el modelo de un diodo. En la parte izquierda de la Fig. 7. observamos una representación esquemática de una celda solar y a la derecha se encuentra un modelo eléctrico muy simplificado al que se le denomina **circuito equivalente simplificado**.

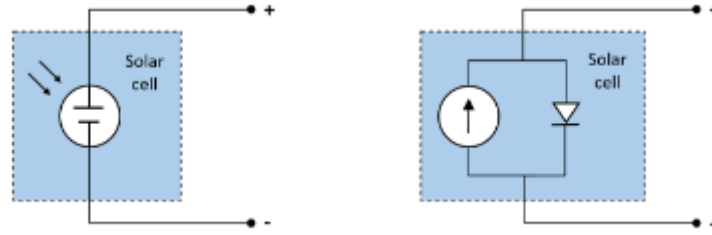


Figura 7: Circuito equivalente simplificado de una celda solar.

Fuente: (COURSERA & DTU University, 2016)

El comportamiento eléctrico de un circuito equivalente puede ser expresado matemáticamente considerando la ley de Kirchhoff.

$$I = I_{ph} - I_D$$

I_{ph} es la fotocorriente e I_D es la corriente que pasa a través del diodo. Sustituyendo en la formula la ecuación de Shockley para el diodo, obtenemos:

$$I = I_{ph} - I_S \left(e^{\frac{V_D}{nV_T}} - 1 \right)$$

I_S es la corriente de saturación, V_D es la tensión entre los extremos del diodo, V_t es el voltaje térmico (' kT/q ', la constante de Boltzmann por la temperatura entre la carga del electrón), y n es el coeficiente de emisión o factor de idealidad, dependiente del proceso de fabricación del diodo y que suele adoptar valores entre 1 (para el germanio) y del orden de 2 (para el silicio). El factor de idealidad considera las uniones imperfectas que se observan en los transistores reales y principalmente la recombinación de las cargas. Cuando n es 1, la ecuación anterior es llamada ecuación de Shockley para el diodo ideal.

Si dibujamos una curva IV usando esta fórmula podemos observar que conseguimos la curva característica de la celda solar que vimos antes. Como podemos apreciar en la figura 8.

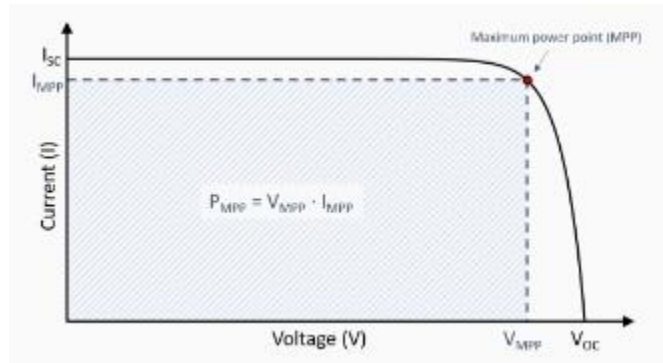


Figura 8: Curva I-V

Fuente: (COURSERA & DTU University, 2016)

Corriente de cortocircuito

Como vimos antes, cuando la celda solar se conecta en cortocircuito (se unen los contactos extremos) se produce una corriente de cortocircuito (I_{sc}) y el voltaje es 0. Considerando el circuito equivalente simplificado se tiene que:

$$I_{sc} = I(V = 0) = I_{ph} - I_s(e^0 - 1) = I_{ph}$$

Esto nos dice que la corriente de cortocircuito es igual a la fotocorriente (I_{ph}). Un cortocircuito externo también cortocircuita el diodo interno por lo tanto la corriente por el diodo I_d es 0.

La fotocorriente es directamente proporcional al número de fotones incidentes en a la celda solar por lo que la corriente de cortocircuito es proporcional a la irradiancia. En la Fig. 9 es observada la curva característica de una celda solar en función de la irradiancia incidente.

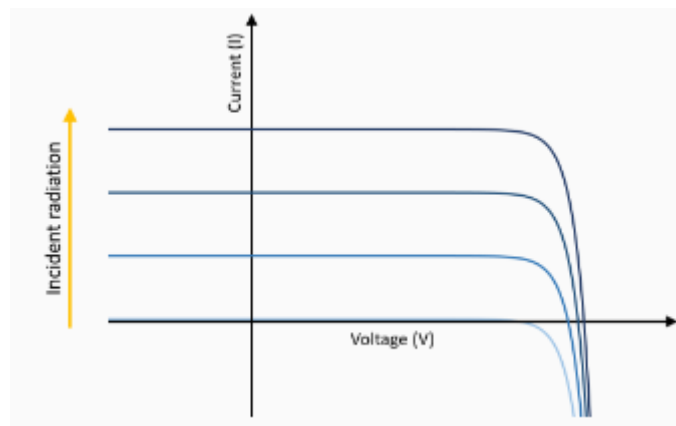


Figura 9: Curva en función de la radiación

Fuente: (COURSERA & DTU University, 2016)

Voltaje en circuito abierto

El otro caso extremo aparte de la corriente en corto circuito es cuando la corriente se vuelve cero. Esto sucede cuando se tiene abierto el circuito y el voltaje obtenido al realizar la medida se denomina **voltaje en circuito abierto** (V_{oc}). Para determinar el V_{oc} , tenemos que resolver la ecuación de circuito equivalente para el caso en que la corriente es igual a cero.

$$V_{oc} = V(I = 0) = nV_T \ln\left(\frac{I_{ph}}{I_s} + 1\right) = nV_T \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_s} + 1\right)$$

Recuerda que la fotocorriente es igual a la corriente de cortocircuito ($I_{ph} = I_{sc}$). El término 1 dentro del logaritmo puede ser ignorado para corrientes extremadamente pequeñas (como la mayoría producida por celdas solares), por lo que podemos reducir la ecuación anterior a:

$$V_{oc} \approx V(I = 0) = nV_T \ln\left(\frac{I_{sc}}{I_s}\right)$$

Observado este resultado podemos notar que la dependencia del V_{oc} con la irradiancia (I_{ph}) es mucho menor comparada con la dependencia de la I_{sc} . En realidad, el voltaje en corto circuito cambia con el logaritmo natural de la irradiancia (recuerde que la fotocorriente es proporcional a la irradiancia). Puedes observar esto en la Fig. 9, se nota claramente que V_{oc} solo varía ligeramente al incrementar o disminuir la irradiancia.

Resistencias Parásitas

En la sección previa, vimos cómo se puede modelar una celda solar con un circuito equivalente simple. En esta sección incluiremos en el modelo anterior unas consideraciones extras denominadas resistencias parasitas de la celda solar.

Estas resistencias parasitas son la resistencia en paralelo o resistencia shunt (R_{sh}), y la resistencia en serie (R_s), la resistencia en serie nos permite modelar el efecto de los cables conectores y el bypass en una celda solar, mientras que la resistencia shunt nos permite notar si la corriente está escapando a través de la unión PV, por esto en un dispositivo PV ideal y para tener mayor eficiencia se desea tener un alto valor para la resistencia shunt (para que no pase corriente a través de las uniones) y uno pequeño para la resistencia en serie (para que las pérdidas de energía en forma de calor sean mínimas).

Entonces en nuestro nuevo modelo equivalente hay cuatro componentes: está la fuente de corriente ideal que depende de la intensidad de la luz, en paralelo con esta fuente se tiene un diodo el cual otorga el efecto diodo y la característica curva IV y las dos resistencias, una en paralelo (R_{sh}) y una en serie (R_s). En la Fig. 10 se puede ver el circuito equivalente incluyendo la resistencia en serie (R_s) y la resistencia shunt (R_{sh}).

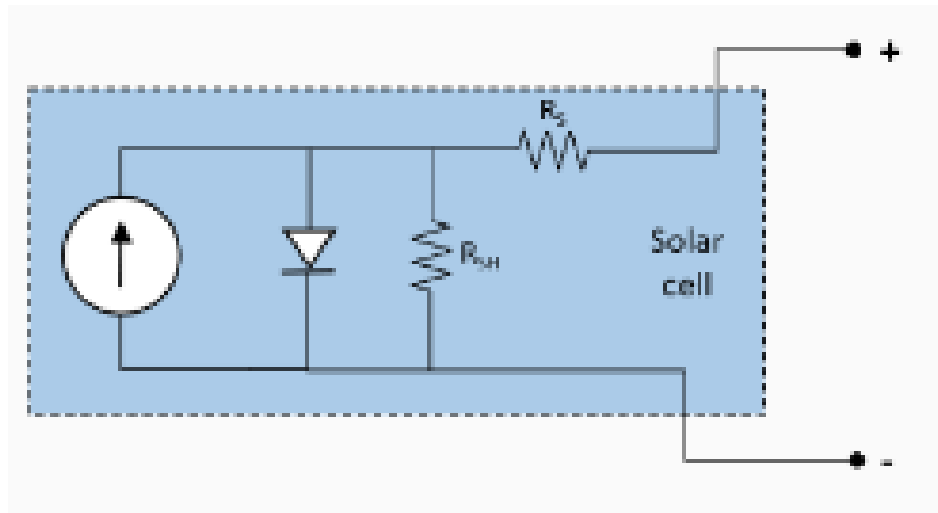


Figura 10: Circuito equivalente de celda solar.

Fuente: (COURSERA & DTU University, 2016)

El circuito equivalente consiste en una fuente de corriente que proviene de la luz absorbida. Un diodo que da las propiedades direccionales de la celda solar, una **resistencia en serie (Rs)** que es la resistencia cuando el diodo está abierto y una resistencia shunt (Rsh) que es la resistencia cuando el diodo está cerrado. Considerando lo anterior, la corriente total a través del circuito se describe como:

$$I = I_{ph} - I_D - I_{SH}$$

I es la corriente que sale de la celda solar, Iph es la corriente foto generada, Id la corriente a través del diodo e Ish la corriente shunt. Expandiendo esta ecuación con la ecuación de corriente para un diodo y la corriente shunt con las pérdidas por resistencia, se obtiene:

$$I = I_{ph} - I_S \left(e^{\frac{V + I R_S}{n V_T}} - 1 \right) - \frac{V + I R_S}{R_{SH}}$$

La ecuación está en función de los parámetros internos y del voltaje entre los extremos de la celda. El término I aparece tanto a la izquierda como a la derecha de la igualdad, por lo que esta ecuación se debe resolver numéricamente. En las Fig.11 y Fig. 12, puedes observar la influencia de las resistencias shunt y en serie en la curva IV. Con un incremento de Rs, la curva se aplanar y el factor de forma disminuye considerablemente. Al decrecer Rsh la situación es similar, sin embargo, aquí el voltaje de circuito abierto es afectado ya que la corriente de saturación aumenta y esto produce que el voltaje del diodo disminuya. Lo más importante es notar que las resistencias parásitas reducen el factor de forma, esto explica porque el factor de forma es un indicativo de la “calidad” de una celda solar.

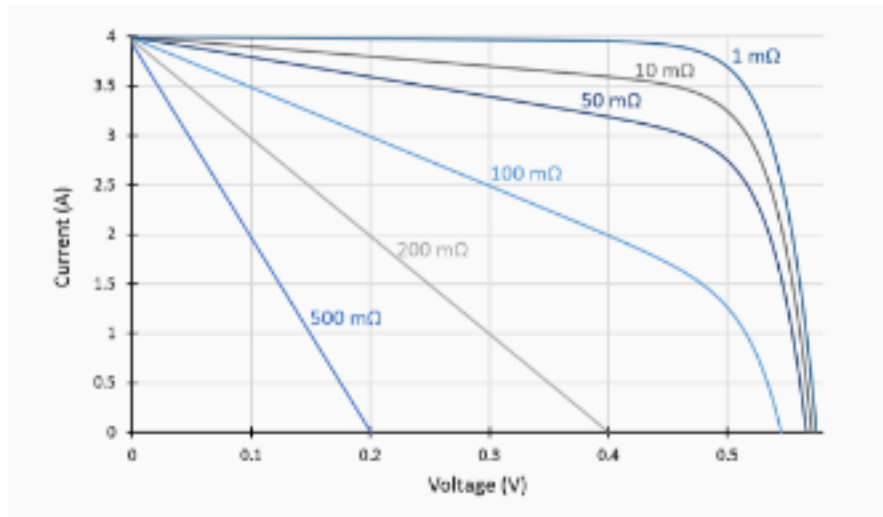


Figura 11: Influencia de la resistencia en la curva IV.

Fuente: (COURSERA & DTU University, 2016)

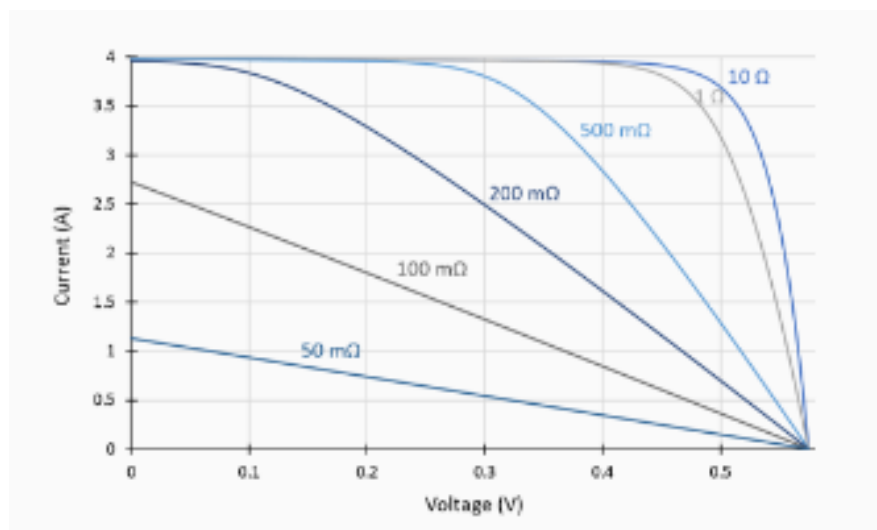


Figura 12: Influencia de la resistencia en la curva IV.

Fuente: (COURSERA & DTU University, 2016)

Determinando las resistencias parásitas

Es posible determinar el valor de R_{sh} y R_s a partir de la curva IV de una celda solar. Si se observa la Fig. 13 se puede notar que la pendiente de la curva relativa al valor de V_{oc} varía drásticamente cuando se modifica la resistencia en serie (R_s). Algo parecido sucede cuando se modifica la resistencia shunt, salvo que en este caso la pendiente varía en relación al valor de V igual a 0.

En el punto donde el voltaje es 0, la corriente a través del diodo puede ser ignorada ya que estamos en condiciones de cortocircuito, por lo que la ecuación se puede escribir como:

$$I = I_{ph} - \frac{V + IR_s}{R_{SH}}$$

Podemos obtener la pendiente de esta curva en el punto $V=0$, derivando:

$$\frac{dI}{dV} = 0 - \frac{1}{R_{SH}} - \frac{R_s}{R_{SH}} \left(\frac{dI}{dV} \right)$$

Resolviendo esta ecuación diferencial obtenemos:

$$\frac{dI}{dV} = \frac{-1}{R_s + R_{SH}}$$

Si asumimos que la resistencia en serie es mucho más pequeña que la resistencia shunt ($R_s \gg R_{sh}$) lo cual sucede en una celda solar, podemos reducir lo anterior a:

$$R_{SH} = - \frac{dV}{dI} \Big|_{V=0}$$

Así se obtuvo la resistencia shunt a partir de la pendiente de la recta tangente en el punto de voltaje igual a 0, como se observa en la Fig. 13. Una evaluación similar se puede realizar en el punto en el que el voltaje toma su valor máximo (voltaje de circuito abierto) para obtener la resistencia en serie.

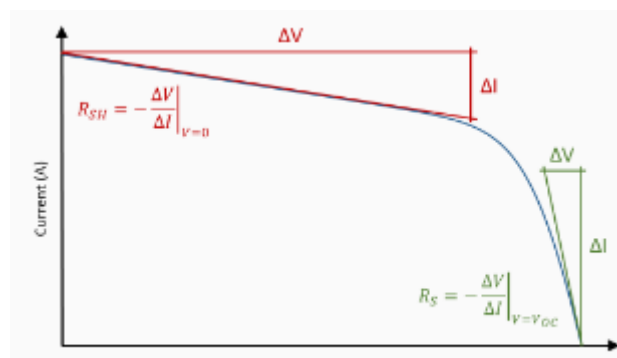


Figura 13: Variación de la curva IV.

Fuente: (COURSERA & DTU University, 2016)

1.10 MODELOS PARA RADIACIÓN SOLAR

La información de la radiación solar local es esencial para muchas aplicaciones, incluido el diseño arquitectónico, los sistemas de energía solar y, en particular, para el diseño de estaciones solares fotovoltaicas. Desafortunadamente, para muchos países en desarrollo, las mediciones de radiación solar no están fácilmente disponibles debido al costo, mantenimiento y requisitos de calibración de los equipos de medición. Por lo tanto, es importante elaborar métodos para estimar la radiación solar en base a datos meteorológicos fácilmente disponibles. Se han desarrollado varios modelos empíricos para calcular la radiación solar global utilizando diversos parámetros climáticos. Estos parámetros incluyen radiación extraterrestre, horas de luz solar, temperatura media, temperatura máxima, temperatura del suelo, humedad relativa, cantidad de días de lluvia, altitud, latitud, precipitación total, nubosidad y evaporación. El parámetro más utilizado para estimar la radiación solar global es la duración de la luz solar. La duración del sol se puede medir de manera fácil y confiable y los datos están ampliamente disponibles. El diseño de un sistema de conversión de energía solar necesita un conocimiento exacto con respecto a la disponibilidad de radiación solar global. Las horas de sol se miden en muchos lugares del mundo, mientras que la radiación global se mide solo en lugares seleccionados. Para superar este defecto, los científicos han desarrollado muchas ecuaciones empíricas.

El modelado es el proceso de formulación de un modelo abstracto en términos de lenguaje matemático o físico para describir el comportamiento complejo de un sistema real. Los modelos matemáticos son modelos cuantitativos y, a menudo, se expresan en términos de ecuaciones lineales, no lineales, diferenciales ordinarias o ecuaciones diferenciales parciales, los modelos matemáticos también pueden ser modelos estadísticos, modelos de lógica difusa y **relaciones empíricas**. De hecho, cualquier descripción de modelo que use lenguaje matemático se puede llamar modelo matemático.

El modelado matemático es ampliamente utilizado en las ciencias naturales, informática, ingeniería, meteorología, economía y finanzas.

Para el presente trabajo se utilizarán distintos modelos empíricos (aquellos que utilizan las observaciones directas o los resultados de experimentos del fenómeno estudiado) para estimar la radiación solar global diaria en Lambayeque – Perú a partir de una serie de variables meteorológicas. La mayoría de las ecuaciones basadas en la luz solar construidas para estimar el promedio mensual diario de la radiación solar global son de la ecuación de tipo Angstrom modificada. La determinación de la capacidad de energía solar de una región requiere que se realicen mediciones extensas de radiación de alta calidad en un gran número de estaciones que cubren las principales zonas climáticas de la región. En este sentido, recientemente, se han dado varias fórmulas empíricas que utilizan diversos parámetros para estimar la radiación solar en todo el mundo. Las estimaciones de la

radiación solar global diaria promedio mensual para un gran número de ubicaciones se presentan en varios trabajos.

Dado que el componente del haz (irradiación directa) es importante en el diseño de sistemas que emplean energía solar, como los motores de calor de alta temperatura y las células solares de alta intensidad, a menudo se pone énfasis en modelar el componente del haz. Existen dos categorías de modelos de radiación solar, disponibles en la literatura, que predicen el componente del haz o el componente del cielo en base a otras cantidades más fáciles de medir:

- Modelos paramétricos

- Modelos de descomposición

Los modelos paramétricos requieren información detallada de las condiciones atmosféricas. Los parámetros meteorológicos utilizados frecuentemente como predictores incluyen el tipo, la cantidad y la distribución de las nubes u otras observaciones, como la luz solar fraccionada, la turbidez atmosférica y el contenido de agua precipitable. Un método más simple fue adoptado por el algoritmo ASHRAE y muy utilizado por las comunidades de ingeniería y arquitectura. Es posible el desarrollo de modelos de correlación que predicen la radiación del haz o del cielo utilizando otras mediciones de radiación solar.

Los modelos de descomposición usualmente usan información solo sobre la radiación global para predecir los componentes del haz y el cielo. Estas relaciones generalmente se expresan en términos de las irradiaciones que son las integrales de tiempo (generalmente durante 1 h) del flujo radiante o irradiancia. Los modelos de descomposición desarrollados para estimar la irradiancia directa y difusa de los datos de irradiancia global se encontraron en la literatura. El objetivo de este estudio es evaluar modelos estadísticamente existentes para estimar el incidente de radiación solar en una superficie horizontal y recomendar uno que se ajuste mejor a los datos medidos de las ubicaciones de Lambayeque.

La lista final representa los 5 modelos R_s seleccionados y utilizados en este estudio. Estos 5 modelos se seleccionaron en función de aplicación para la zona estudiada, teniendo relaciones simples, métodos básicos y teniendo en cuenta las variables meteorológicas comúnmente medidas. Los modelos seleccionados pueden dividirse generalmente en tres categorías distintas: (i) aquellas que estiman R_s como una Función de la temperatura del aire solamente, a saber; modelos basados en la temperatura (mostrados por T aquí), (ii) aquellos que requieren el número de registros de horas de sol solo para la estimación de R_s , a saber; modelos basados en la luz solar (mostrados por N), y eventualmente (iii) aquellos que estiman R_s basados en dos o más parámetros meteorológicos, a saber; Modelos complejos (mostrados por C). La energía solar ocupa uno de los lugares más importantes entre las diversas fuentes de energía alternativas. Un conocimiento preciso de la

disponibilidad de radiación solar en una ubicación geográfica particular es de vital importancia para el desarrollo de los sistemas de energía solar y para la estimación de su eficiencia y rendimiento. La familiaridad con los datos de radiación solar es un requisito previo para el modelado y diseño de todos los esquemas de energía fotovoltaica y térmica solar. Los valores medios mensuales medidos de la irradiación diaria, suelen ser la mejor fuente de información y proporcionan el punto de partida para muchos cálculos. La utilidad de los promedios mensuales a largo plazo de la radiación diaria puede entenderse por el hecho de que en un lugar en particular estos promedios son relativamente constantes, de modo que los valores pasados se pueden usar para estimar valores futuros. Cuando los datos de radiación solar no están disponibles, entonces hay una posibilidad de obtener estimaciones razonables de radiación de los parámetros meteorológicos comúnmente disponibles, como las horas de sol, la humedad relativa, las temperaturas máximas y mínimas y la cobertura de nubes de esa ubicación geográfica.

A continuación se presenta una lista de los modelos empíricos seleccionados para ser utilizados en el presente trabajo.

- Modelo Bristow-Campbell
- Modelo de Hargreaves-Samani
- Modelo de Annandale
- Modelo de Ertekin-Yaldiz
- Modelo de Chen

1.11 REDES NEURONALES

Las Redes Neuronales Artificiales (RNA) o sistemas conexionistas son sistemas de procesamiento de la información cuya estructura y funcionamiento están inspirados en las redes neuronales biológicas. Consisten en un conjunto de elementos simples de procesamiento llamados nodos o neuronas conectadas entre sí por conexiones que tienen un valor numérico modificable llamado peso.

La actividad que una unidad de procesamiento o neurona artificial realiza en un sistema de este tipo es simple. Normalmente, consiste en sumar los valores de las entradas (inputs) que recibe de otras unidades conectadas a ella, comparar esta cantidad con el valor umbral y, si lo iguala o supera, enviar activación o salida (output) a las unidades a las que esté conectada. Tanto las entradas que la unidad recibe como las salidas que envía dependen a su vez del peso o fuerza de las conexiones por las cuales se realizan dichas operaciones.

La arquitectura de procesamiento de la información de los sistemas de RNA se distingue de la arquitectura convencional Von Neumann (fundamento de la mayor parte de los ordenadores existentes) en una serie de aspectos fundamentales.

En primer lugar, el procesamiento de la información de un modelo Von Neumann es secuencial, esto es, una unidad o procesador central se encarga de realizar una tras otra determinadas transformaciones de expresiones binarias almacenadas en la memoria del ordenador. Estas transformaciones son realizadas de acuerdo con una serie de instrucciones (algoritmo, programa), también almacenadas en la memoria. La operación básica de un sistema de este tipo sería: localización de una expresión en la memoria, traslado de dicha expresión a la unidad de procesamiento, transformación de la expresión y colocación de la nueva expresión en otro compartimento de la memoria. Por su parte, el procesamiento en un sistema conexionista no es secuencial sino paralelo, esto es, muchas unidades de procesamiento pueden estar funcionando simultáneamente.

En segundo lugar, un rasgo fundamental de una arquitectura Von Neumann es el carácter discreto de su memoria, que está compuesta por un gran número de ubicaciones físicas o compartimentos independientes donde se almacenan en código digital tanto las instrucciones (operaciones a realizar) como los datos o números que el ordenador va a utilizar en sus operaciones. En redes neuronales, en cambio, la información que posee un sistema no está localizada o almacenada en compartimentos discretos, sino que está distribuida a lo largo de los parámetros del sistema. Los parámetros que definen el “conocimiento” que una red neuronal posee en un momento dado son sus conexiones y el estado de activación de sus unidades de procesamiento. En un sistema conexionista las expresiones lingüísticas o simbólicas no existen como tales. Serían el resultado emergente de la interacción de muchas unidades en un nivel subsimbólico.

Un sistema de procesamiento distribuido en paralelo presenta una serie de ventajas frente a un modelo convencional Von Neumann. Por un lado, tenemos la resistencia al funcionamiento defectuoso de una pequeña parte del sistema. En un modelo conexionista, cada unidad lleva a cabo una computación simple. La fiabilidad de la computación total que el sistema realiza depende de la interacción paralela de un gran número de unidades y, consecuentemente, en la mayoría de casos, el sistema puede continuar su funcionamiento normal, aunque una pequeña parte del mismo haya resultado dañada. En los sistemas convencionales, en cambio, un defecto en un solo paso de una larga cadena de operaciones puede echar a perder la totalidad de la computación. Por otro lado, un modelo conexionista es capaz, en ciertas circunstancias, de reconocer un objeto a pesar de que sólo se le presente como entrada una parte del mismo, o a pesar de que la imagen del objeto esté distorsionada. En cambio, en un sistema convencional el objeto presentado debe corresponderse con una determinada información almacenada en memoria, de lo contrario, no es capaz de reconocer el objeto.

Por último, un sistema de RNA no se programa para realizar una determinada tarea a diferencia de una arquitectura Von Neumann, sino que es “entrenado” a tal efecto. Consideremos un ejemplo típico de aprendizaje o formación de conceptos en la estructura de una RNA. Supongamos que presentamos a la red dos tipos de objetos, por ejemplo la letra A y la letra E con distintos tamaños y en distintas posiciones. En el aprendizaje de la red neuronal se consigue, tras un número elevado de presentaciones de los diferentes objetos y consiguiente ajuste o modificación de las conexiones del sistema, que la red distinga entre As y Es, sea cual fuere su tamaño y posición en la pantalla. Para ello, podríamos entrenar la red neuronal para que proporcionase como salida el valor 1 cada vez que se presente una A y el valor 0 en caso de que se presente una E. El aprendizaje en una RNA es un proceso de ajuste o modificación de los valores o pesos de las conexiones, “hasta que la conducta del sistema acaba por reproducir las propiedades estadísticas de sus entradas” (Fodor y Pylyshyn, 1988, p. 30). En nuestro ejemplo, podríamos decir que la red ha “aprendido” el concepto de letra A y letra E sin poseer reglas concretas para el reconocimiento de dichas figuras, sin poseer un programa explícito de instrucciones para su reconocimiento.

Por tanto, para entrenar a un sistema conexionista en la realización de una determinada clasificación es necesario realizar dos operaciones. Primero, hay que seleccionar una muestra representativa con respecto a dicha clasificación, de pares de entradas y sus correspondientes salidas. Segundo, es necesario un algoritmo o regla para ajustar los valores modificables de las conexiones entre las unidades en un proceso iterativo de presentación de entradas, observación de salidas y modificación de las conexiones.

Las RNA constituyen una línea de investigación en Inteligencia Artificial (IA), la cual tiene como objetivo primario la construcción de máquinas inteligentes (Grimson y Patil, 1987). Los orígenes de

la IA hay que buscarlos en el movimiento científico de la cibernética de los años cuarenta y cincuenta. Este movimiento científico se articuló en torno a la idea de que el funcionamiento de muchos sistemas, vivos o artificiales, puede ser captado mejor por modelos basados en la transferencia de información que por modelos basados en la transferencia de energía. La cibernética se propuso estudiar los elementos comunes entre el funcionamiento de máquinas automáticas y el del sistema nervioso humano (los procesos de control y comunicación en el animal y en la máquina). Este problema fue abordado en un esfuerzo interdisciplinar, en el que intervinieron investigadores procedentes de áreas como matemáticas, ingeniería electrónica, fisiología y neurociencia, lógica formal, ciencias de la computación y psicología.

Una importante característica de la cibernética fue la proliferación de distintas perspectivas en torno al problema de las relaciones entre cerebro y máquina. En la segunda mitad de la década de los cincuenta comenzaron a destacar dos de entre estas perspectivas: la IA basada en el procesamiento simbólico, y la investigación en redes neuronales.

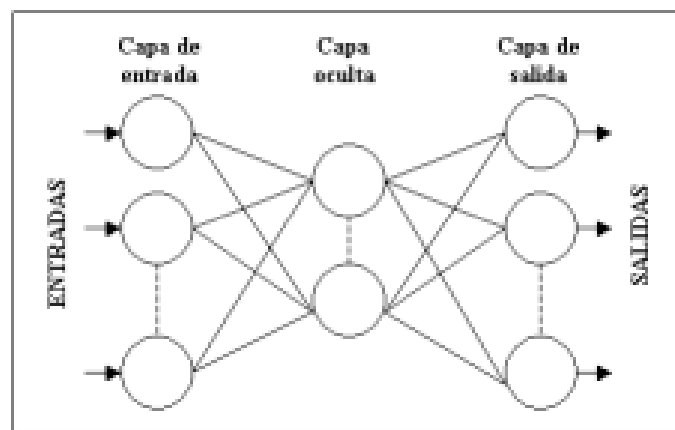


Figura 15: Red Neuronal 2

Fuente: (Alejos Moo, 2016)

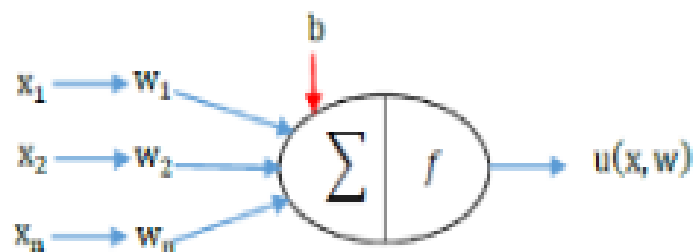


Figura 14: Red Neuronal

Fuente: (Alejos Moo, 2016)

1.12 ARDUINO

Arduino es una plataforma electrónica de hardware libre basada en una placa con un microcontrolador. Con software y hardware flexibles y fáciles de utilizar, Arduino ha sido diseñado para adaptarse a las necesidades de todo tipo de público, desde aficionados, hasta expertos en robótica o equipos electrónicos (Arduino, 2015).

Ante todo y sobre todo es un microcontrolador, es decir un ordenador completo integrado en un chip, con su CPU, memoria de programa, memoria de datos y circuitos para el control de periféricos. El microcontrolador necesita para su correcto funcionamiento, de algunos circuitos auxiliares y complementos tales como:

- La entrada de alimentación
- El oscilador de trabajo
- Circuito de RESET
- La conexión USB
- Los accesos a las líneas de entrada y salida, etc.

También consta de un simple, pero completo, entorno de desarrollo, que nos permite interactuar con la plataforma de manera muy sencilla. Se puede definir por tanto como una sencilla herramienta de contribución a la creación de prototipos, entornos, u objetos interactivos destinados a proyectos multidisciplinarios y multitecnología (Castro, 2013). En la Fig. 16. se puede observar la placa Arduino, en este caso más específicamente el Arduino Mega 2560.

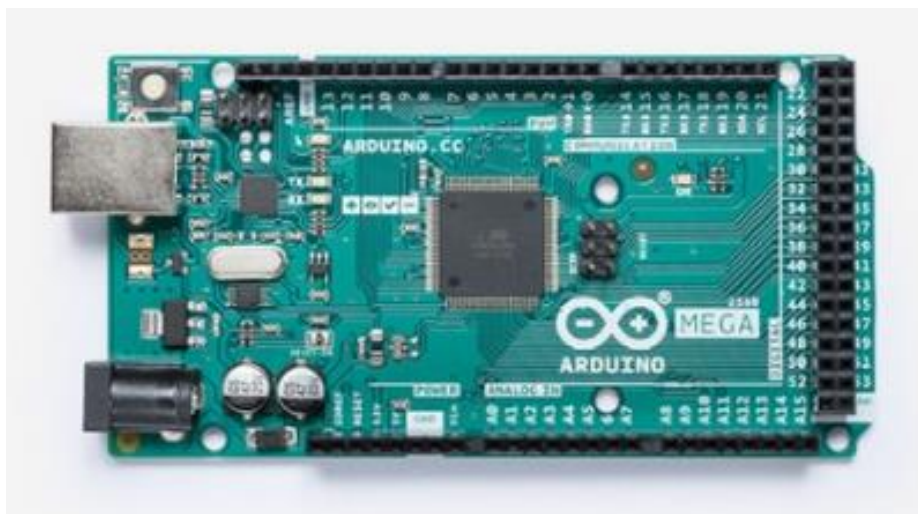


Figura 16: Arduino Mega.

Fuente: Arduino

La placa Arduino está capacitada para incorporar hardware adicional, contiene una matriz de terminales en la que se puede añadir hardware de acuerdo al requerimiento del prototipo a desarrollar.

Características

El Arduino Mega está basado en el microcontrolador ATmega2560. Tiene 54 pines de entradas/salidas digitales (15 de las cuales pueden ser utilizadas como salidas PWM), 16 entradas analógicas, 4 UARTs (puertos serial por hardware), cristal oscilador de 16 Mhz, conexión USB, jack de alimentación, conector ICSP y botón de reset. Incorpora todo lo necesario para que el microcontrolador trabaje; simplemente se conecta a l PC por medio de un cable USB o con una fuente de alimentación externa. El Arduino Mega es compatible con la mayoría de los shields diseñados para Arduino Duemilanove, diecimila o UNO (Arduino, 2016). Esta nueva versión de Arduino Mega 2560 adicionalmente a todas las características de su sucesor, el Arduino Mega ahora utiliza un microcontrolador ATmega8U2 en vez del chip FTDI. Esto permite mayores velocidades de transmisión por su puerto USB y no requiere drivers para Linux o MAC (archivo inf es necesario para Windows) además ahora cuenta con la capacidad de ser reconocido por el PC como un teclado, mouse, joystick, etc. En la Fig. 17 podemos ver un resumen de las características técnicas más relevantes del Arduino Mega 2560.

ELEMENTO	INFORMACIÓN
Microcontrolador	Atmega2560
Voltaje de operación	5 V
Voltaje de entrada (Recomendado)	7 – 12 V
Voltaje de entrada (Límite)	6 – 20 V
Pines para entrada- salida digital.	54 (de los cuales 15 proporcionan salida PWM)
Pines de entrada analógica.	16
Corriente continua por pin IO	20 mA
Corriente continua en el pin 3.3 V	50 mA
Memoria Flash	256 KB, 8 KB utilizado por el gestor de arranque
SRAM	8 KB
EEPROM	4 KB

Figura 17: Características del Arduino

Fuente: Arduino

Alimentación de un Arduino

El Arduino Mega puede ser alimentado vía la conexión USB o con una fuente de alimentación externa. El origen de la alimentación se selecciona automáticamente.

Las fuentes de alimentación externas (no USB) pueden ser tanto un transformador o una batería. El transformador se puede conectar usando un conector macho de 2.1mm con centro positivo en el conector hembra de la placa. Los cables de la batería pueden conectarse a los pines Gnd y Vin en los conectores de alimentación (POWER).

La placa puede trabajar con una alimentación externa de entre 6 a 20 voltios. Si el voltaje suministrado es inferior a 7V, el pin de 5V puede proporcionar menos de 5 Voltios y la placa puede volverse inestable; si se usan más de 12V los reguladores de voltaje se pueden sobrecalentar y dañar la placa. El rango recomendado es de 7 a 12 voltios.

Los pines de alimentación son los siguientes:

VIN. La entrada de voltaje a la placa Arduino cuando se está usando una fuente externa de alimentación (en opuesto a los 5 voltios de la conexión USB). Se puede proporcionar voltaje a través de este pin, o, si se está alimentando a través de la conexión de 2.1 mm acceder a ella a través de este pin.

5V. La fuente de voltaje estabilizado usado para alimentar el microcontrolador y otros componentes de la placa. Esta puede provenir de VIN a través de un regulador integrado en la placa, o proporcionada directamente por el USB u otra fuente estabilizada de 5V.

3V3. Una fuente de voltaje de 3.3 voltios generada por un regulador integrado en la placa. La corriente máxima soportada 50mA.

GND. Pines de toma de tierra. 2.3.3

Memoria

El ATmega2560 tiene 256KB de memoria flash para almacenar código (8KB son usados para el arranque del sistema). El ATmega2560 tiene 8 KB de memoria SRAM y 4KB de EEPROM, a la cual se puede acceder para leer o escribir con la librería EEPROM.

Entradas y Salidas

Cada uno de los 54 pines digitales en el Mega pueden utilizarse como entradas o como salidas usando las funciones pinMode(), digitalWrite(), y digitalRead(). Las E/S operan a 5 voltios. Cada pin puede proporcionar o recibir una intensidad máxima de 40mA y tiene una resistencia interna de pull-up (desconectada por defecto) de 20-50kOhms. Además, algunos pines tienen funciones especializadas:

Serie: 0 (RX) y 1 (TX), Serie 1: 19 (RX) y 18 (TX); Serie 2: 17 (RX) y 16 (TX); Serie 3: 15 (RX) y 14 (TX). Usados para recibir (RX) transmitir (TX) datos a través de puerto serie TTL. Los pines Serie: 0 (RX) y 1 (TX) están conectados a los pines correspondientes del chip FTDI USB-to-TTL.

Interrupciones Externas: 2 (interrupción 0), 3 (interrupción 1), 18 (interrupción 5), 19 (interrupción 4), 20 (interrupción 3), y 21 (interrupción 2). Estos pines se pueden configurar para lanzar una interrupción en un valor LOW(0V), en flancos de subida o bajada (cambio de LOW a HIGH(5V) o viceversa), o en cambios de valor. Ver la función `attachInterrupt()` para más detalles.

PWM: de 0 a 13. Proporciona una salida PWM (Pulse Wave Modulation, modulación de onda por pulsos) de 8 bits de resolución (valores de 0 a 255) a través de la función `analogWrite()`.

SPI: 50 (SS), 51 (MOSI), 52 (MISO), 53 (SCK). Estos pines proporcionan comunicación SPI, usando la librería SPI.

LED: 13. Hay un LED integrado en la placa conectado al pin digital 13, cuando este pin tiene un valor HIGH(5V) el LED se enciende y cuando este tiene un valor LOW(0V) este se apaga.

El Mega tiene 16 entradas analógicas, y cada una de ellas proporciona una resolución de 10bits (1024 valores). Por defecto se mide desde 0V a 5V, aunque es posible cambiar la cota superior de este rango usando el pin AREF y la función `analogReference()`

I2C: 20 (SDA) y 21 (SCL). Soporte para el protocolo de comunicaciones I2C (TWI) usando la librería Wire.

AREF. Voltaje de referencia para las entradas analógicas. Usado por `analogReference()`.

Reset. Suministrar un valor LOW (0V) para reiniciar el microcontrolador. Típicamente usado para añadir un botón de reset a los shields que no dejan acceso a este botón en la placa.

Comunicaciones

El Arduino Mega 2560 facilita en varios aspectos la comunicación con la PC. El ATmega2560 proporciona cuatro puertos de comunicación vía serie UART TTL (5V). Un ATmega16U2 integrado en la placa canaliza esta comunicación serie a través del puerto USB y los drivers (incluidos en el software de Arduino) proporcionan un puerto serie virtual en el ordenador. El software incluye un monitor de puerto serie que permite enviar y recibir información textual de la placa Arduino. Los LEDs RX y TX de la placa parpadearán cuando se detecte comunicación transmitida través de la conexión USB (no parpadearán si se usa la comunicación serie a través de los pines 0 y 1).

La librería Software Serial permite comunicación serie por cualquier par de pines digitales del Arduino Mega.

El ATmega2560 también soporta la comunicación I2C (TWI) y SPI. El software de Arduino incluye una librería Wire para simplificar el uso del bus I2C. Para el uso de la comunicación SPI, ver la hoja de especificaciones (datasheet) del ATmega2560.

Programación.

El ATmega2560 en el Arduino Mega viene precargado con un gestor de arranque (bootloader) que permite cargar nuevo código sin necesidad de un programador por hardware externo. Se comunica utilizando el protocolo STK500 original (referencia, archivo de cabecera C). También puede evitarse el gestor de arranque y programar directamente el microcontrolador a través del puerto ICSP (In Circuit Serial Programming) En la Figura 18 mostraremos el entorno de desarrollo de Arduino.

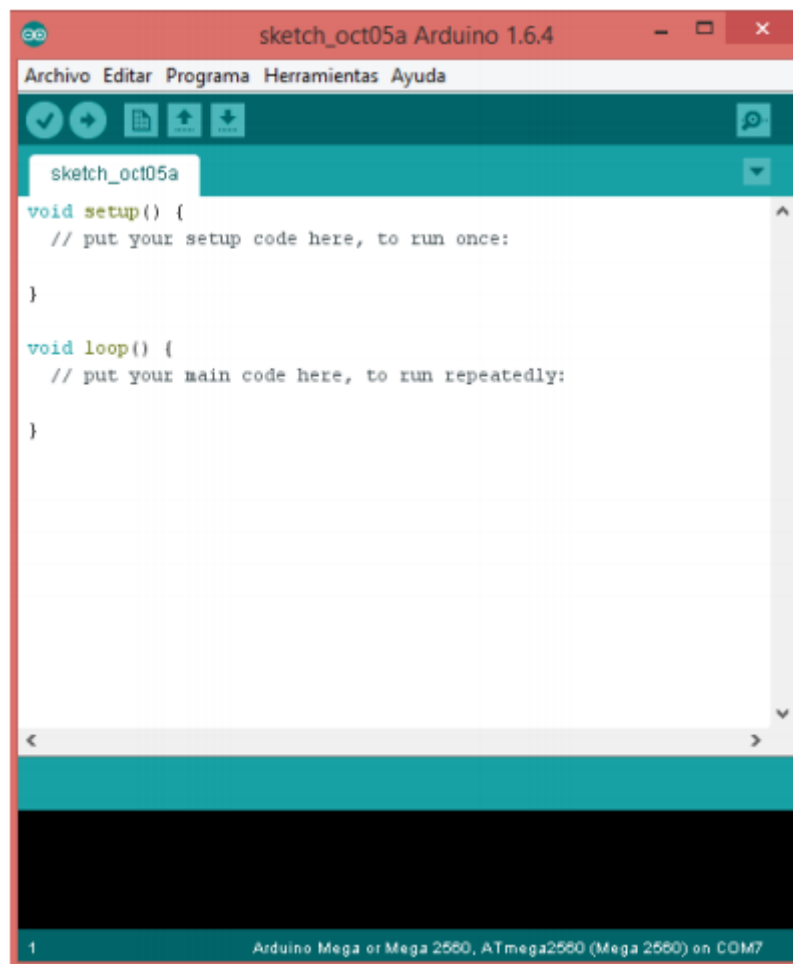


Figura 18: Entorno de Arduino

Fuente: Arduino

2 MÉTODOS Y MATERIALES

En este capítulo estableceremos la metodología que seguiremos en la presente tesis, empezando por describir el lugar de estudio, los modelos matemáticos a utilizar y una primera definición de la red neuronal a utilizar. También describiremos los materiales a utilizar.

2.1 METODOLOGÍA

La metodología que seguiremos en el presente trabajo se puede resumir en la Fig. 19

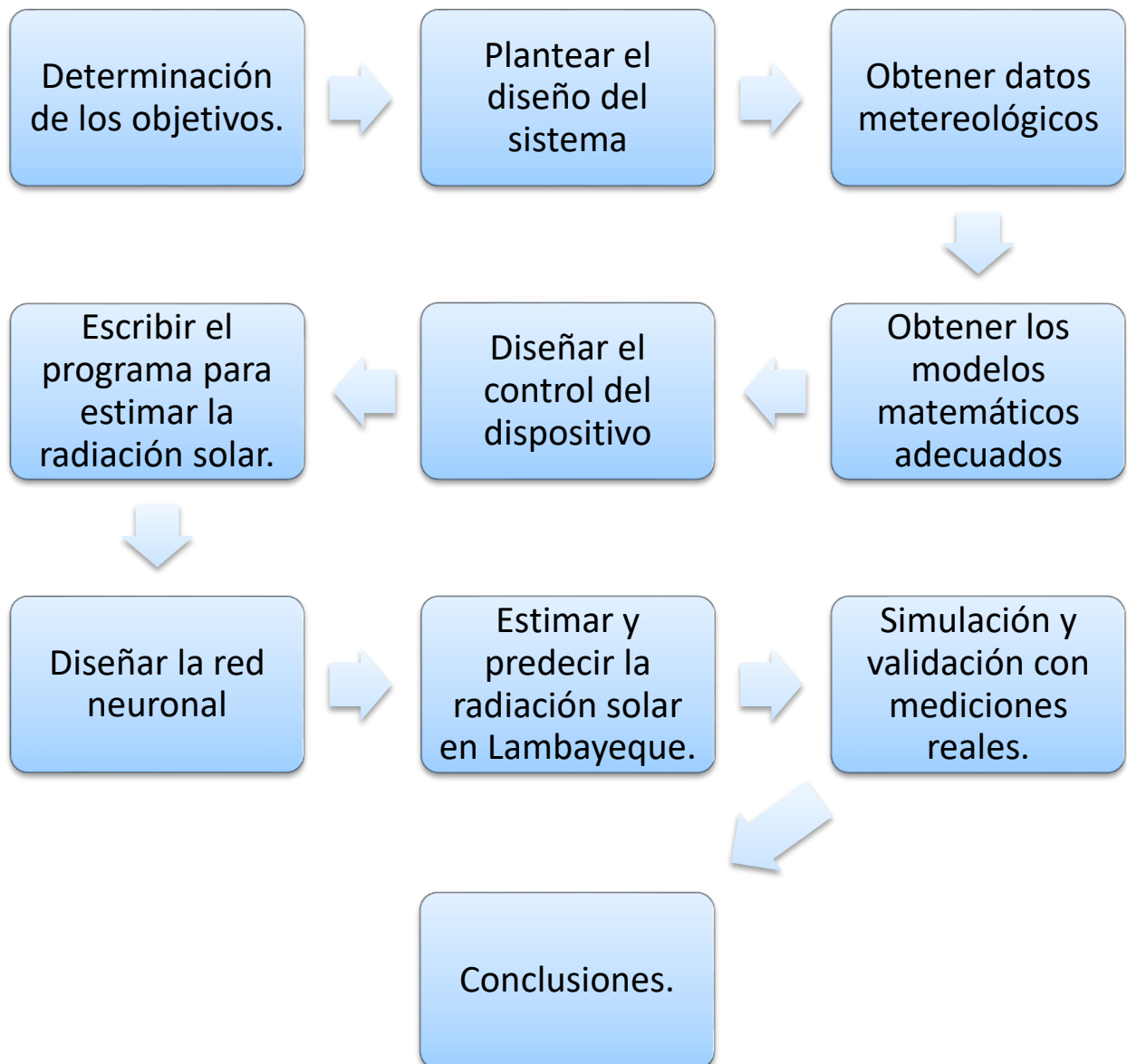


Figura 19: Metodología.

Fuente: Elaboración propia

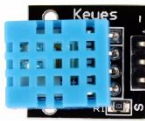
2.2 DISEÑO DEL SISTEMA

El dispositivo a diseñar permitirá estimar y predecir la radiación solar en Lambayeque, de ser un dispositivo de bajo costo, de fácil diseño e implementación y que pueda ser utilizado en cualquier parte de la región sin necesidad de estar conectado a la red eléctrica convencional.

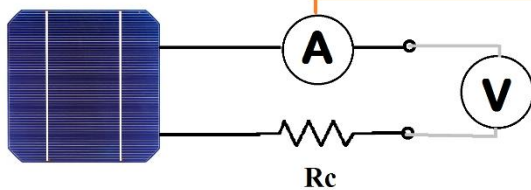
Para nuestro primer prototipo utilizaremos un Arduino Mega 2560 Rev3, debido a sus características de fácil utilización, bajo costo y porque está especialmente diseñado para mediciones utilizando sensores.

Nuestro dispositivo estará formado por 4 sub-sistemas: Un sub-sistema de sensores se encargará de proveer datos de medición in-situ al dispositivo, los sub-sistemas estimación y predicción de radiación será el encargado de realizar los cálculos para estimar la radiación utilizando el modelo matemático obtenido y los datos provistos por el sub-sistema de sensores así como predecir la radiación utilizando la red neuronal, finalmente el sub-sistema de procesamiento de datos recolecta los resultados obtenidos y los almacena en una tarjeta SD.

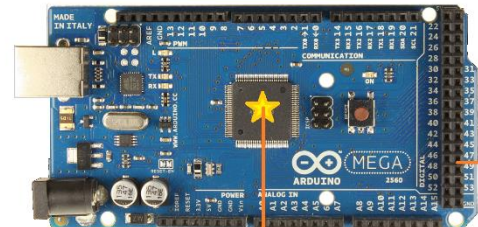
SENSOR DE TEMPERATURA



CELDA SOLAR CON RESISTENCIA DE CALIBRACIÓN



ALMACENAMIENTO SD



Procesamiento de Datos
Estimación de radiación
Predicción de radiación

Figura 20: Diagrama del dispositivo.

Fuente: Elaboración propia.

2.2.1 Sub-sistema sensores

Sensor de temperatura

El sensor de temperatura será el encargado de medir la temperatura ambiente y enviarla al dispositivo y al Arduino a través del control adecuado. La temperatura servirá para estimar la radiación solar global diaria del lugar utilizando los modelos matemáticos, para esto se almacenaran los valores de temperatura cada 15 minutos y se obtendrán la temperatura máxima y mínima diaria así como la temperatura promedio.

Celda solar

La celda será un dispositivo de medición indirecto de radiación solar in-situ. Como la corriente es directamente proporcional a la radiación incidente en una celda solar fotovoltaica, podemos obtener la radiación solar al medir la corriente eléctrica producida por esta celda y rectificar estos datos con la medición de voltaje.

2.2.2 Sub-sistema de procesamiento de datos

Parte del programa que se encargará de procesar los datos provistos por los sensores. Tendrá que obtener la temperatura promedio, máxima y mínima de cada día a partir de los datos provistos por el sensor de temperatura. Además debe obtener una curva de potencia solar a partir de la celda solar, para ello medirá la corriente y el voltaje en la celda solar, como la corriente eléctrica en una celda solar es directamente proporcional a la radiación solar incidente, con los factores adecuados mediante regresión se puede obtener una curva de potencia solar a partir de mediciones de 15 minutos.

2.2.3 Sub-sistema de estimación de radiación

Es la parte del programa que poseerá el modelo matemático seleccionado, este sub-sistema utilizará los datos de temperatura diaria y la curva de potencia solar obtenida para estimar la radiación solar diaria y horario.

2.2.4 Sub-sistema de predicción de radiación

Es la parte del programa en el que se encuentra la red neuronal, servirá para predecir la radiación global diaria dentro de un rango específico de días, para esto utilizará los datos de radiación estimados por el dispositivo y bases de datos en internet en las cuales se predicen los valores de temperatura.

2.3 LUGAR DE ESTUDIO

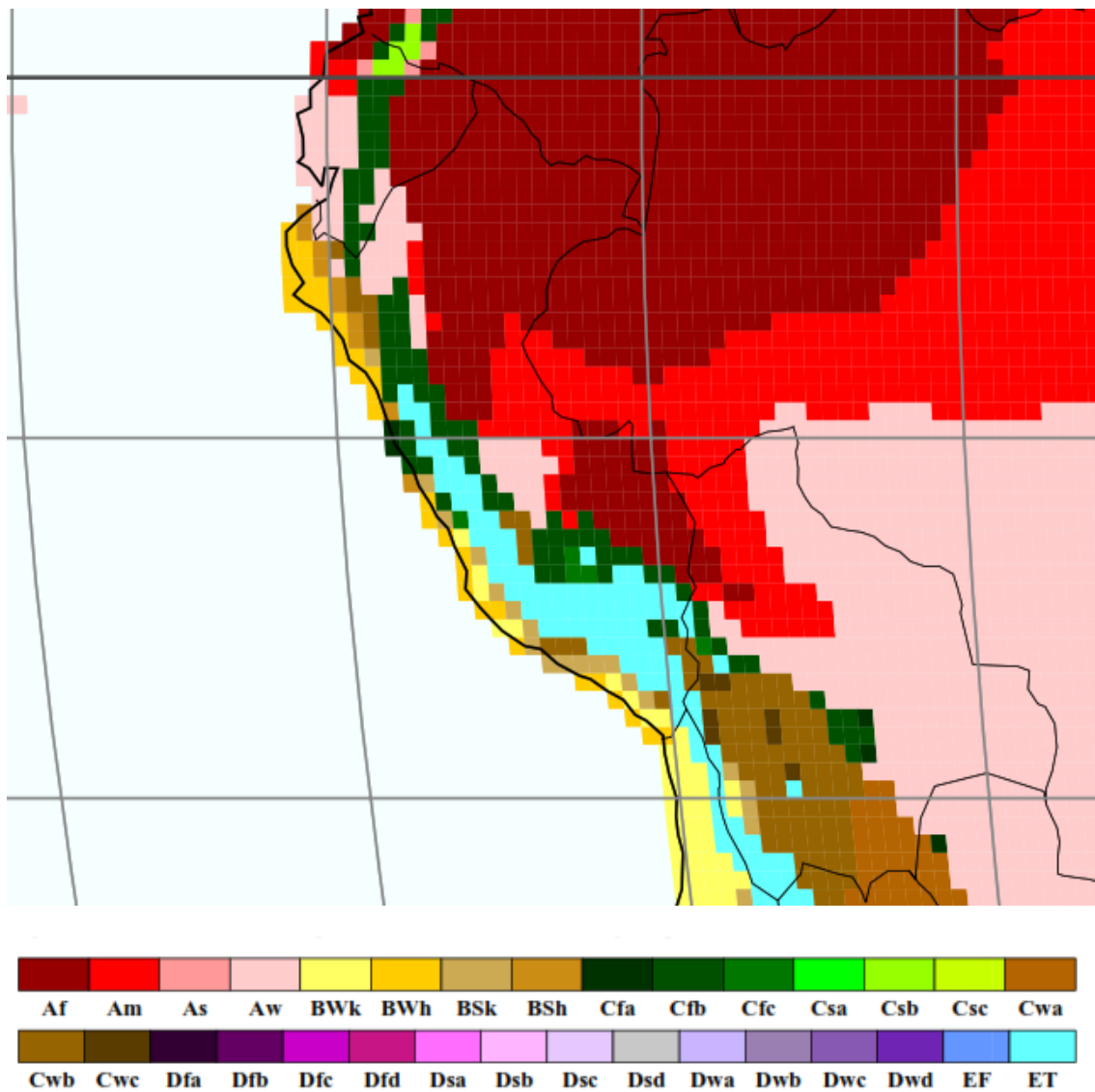
Lambayeque es una ciudad costera localizada al noroeste del Perú, perteneciente a la región de Lambayeque; dista 790 km de la ciudad de Lima, la capital del Perú. Se ubica a $6^{\circ}42'$ de latitud sur y $59^{\circ}54'$ de longitud oeste, es decir a -6.72° de latitud y -79.90° de longitud. La Fig. 21 muestra la localización de la ciudad.



Figura 21: Ubicación de Lambayeque

Fuente: Google Maps

Presenta un clima árido con una temperatura caliente-árida y una clasificación BWh-BSh en la escala de Köppen-Geiger según (Kottek, Grieser, Beck, Rudolf, & Rubel, 2006), presentando un alto nivel de irradiación anual. El potencial solar de esta ciudad y región es muy alto, pero no se dispone de datos de radiación diaria, irradiancia o valores de ángulo óptimo para colectores solares, lo cual representa un problema al momento de realizar estudios de factibilidad para centrales de energía solar u otras aplicaciones de la energía solar.



Main climates

A: equatorial
B: arid
C: warm temperate
D: snow
E: polar

Precipitation

W: desert
S: steppe
f: fully humid
s: summer dry
w: winter dry
m: monsoonal

Temperature

h: hot arid F: polar frost
k: cold arid T: polar tundra
a: hot summer
b: warm summer
c: cool summer
d: extremely continental

Figura 22: Mapa de Koppen-Geiger para el Perú

Fuente: (Kottek, Grieser, Beck, Rudolf, & Rubel, 2006)

2.3.1 Datos meteorológicos y de radiación

Para el estudio que queremos realizar requerimos datos de radiación, temperatura y otros datos atmosféricos de la ciudad de Lambayeque. En específico utilizaremos los siguientes datos:

- Datos de radiación estimados: Estos datos de radiación servirán para obtener los factores de los modelos matemáticos y entrenar a la red neuronal del dispositivo. Serán obtenidos a partir de NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources POWER (NASA, 2018) , NREL (NREL, s. f.) y del Atlas Solar del Perú (SENAMHI, 2003).
- Datos meteorológicos (temperatura, presión, precipitación, etc.): Estos datos serán obtenidos del SENAMHI y de la estación meteorológica de la UNPRG, servirán para validar las estimaciones y predicciones de radiación solar por medio del dispositivo.
- Predicciones en base de datos: Datos meteorológicos, en específico temperatura, predichos disponibles en bases de datos en internet que permitirán predecir la radiación solar.

2.3.1.1 Datos de radiación estimados

NASA POWER

Los datos de irradiación global, directa y difusa proporcionados por la Prediction Of Worldwide Energy Resources de la NASA (NASA, 2018) corresponden a valores promedios mensuales de irradiación sobre una superficie horizontal para una zona entre las latitudes -6.5 y 7.5 de latitud y -80 y -79 de longitud medidos en base a un periodo de 22 años (Julio 1983 - Junio 2005).

Las Tabla 1, Tabla 2, y Tabla 3 muestran los valores promedios mensuales de radiación global, directa y difusa en la ciudad de Lambayeque.

Mes	Irradiación Global (kWh/m ² /día)
Enero	5.70
Febrero	5.55
Marzo	5.84
Abril	5.38
Mayo	4.88
Junio	4.47
Julio	4.48
Agosto	4.91
Septiembre	5.59
Octubre	5.95
Noviembre	5.98
Diciembre	5.86
Promedio Anual	5.38

Tabla 1: Irradiación global promedio en un plano horizontal [kWh/m²/día]

Fuente: (NASA, 2018)

Mes	Irradiación Directa (kWh/m2/día)
Enero	5.12
Febrero	4.62
Marzo	5.20
Abril	5.00
Mayo	4.87
Junio	4.49
Julio	4.33
Agosto	4.49
Septiembre	5.02
Octubre	5.33
Noviembre	5.58
Diciembre	5.53
Promedio Anual	4.97

Tabla 2: Irradiación directa promedio en un plano horizontal [kWh/m2/día]

Fuente: (NASA, 2018)

Mes	Irradiación Difusa (kWh/m2/día)
Enero	2.20
Febrero	2.31
Marzo	2.16
Abril	1.96
Mayo	1.76
Junio	1.69
Julio	1.75
Agosto	1.91
Septiembre	2.07
Octubre	2.19
Noviembre	2.14
Diciembre	2.12
Promedio Anual	2.02

Tabla 3: Irradiación difusa promedio en un plano horizontal [kWh/m2/día]

Fuente: (NASA, 2018)

ATLAS SOLAR DEL PERÚ

También se cuenta con el Atlas Solar del Perú, 2003 (SENAMHI, 2016) elaborado por el SENAMHI pero los valores proporcionados por este atlas son generales a nivel regional, no son diarios ni en forma puntual o detallada además posee un margen de error muy significativo.

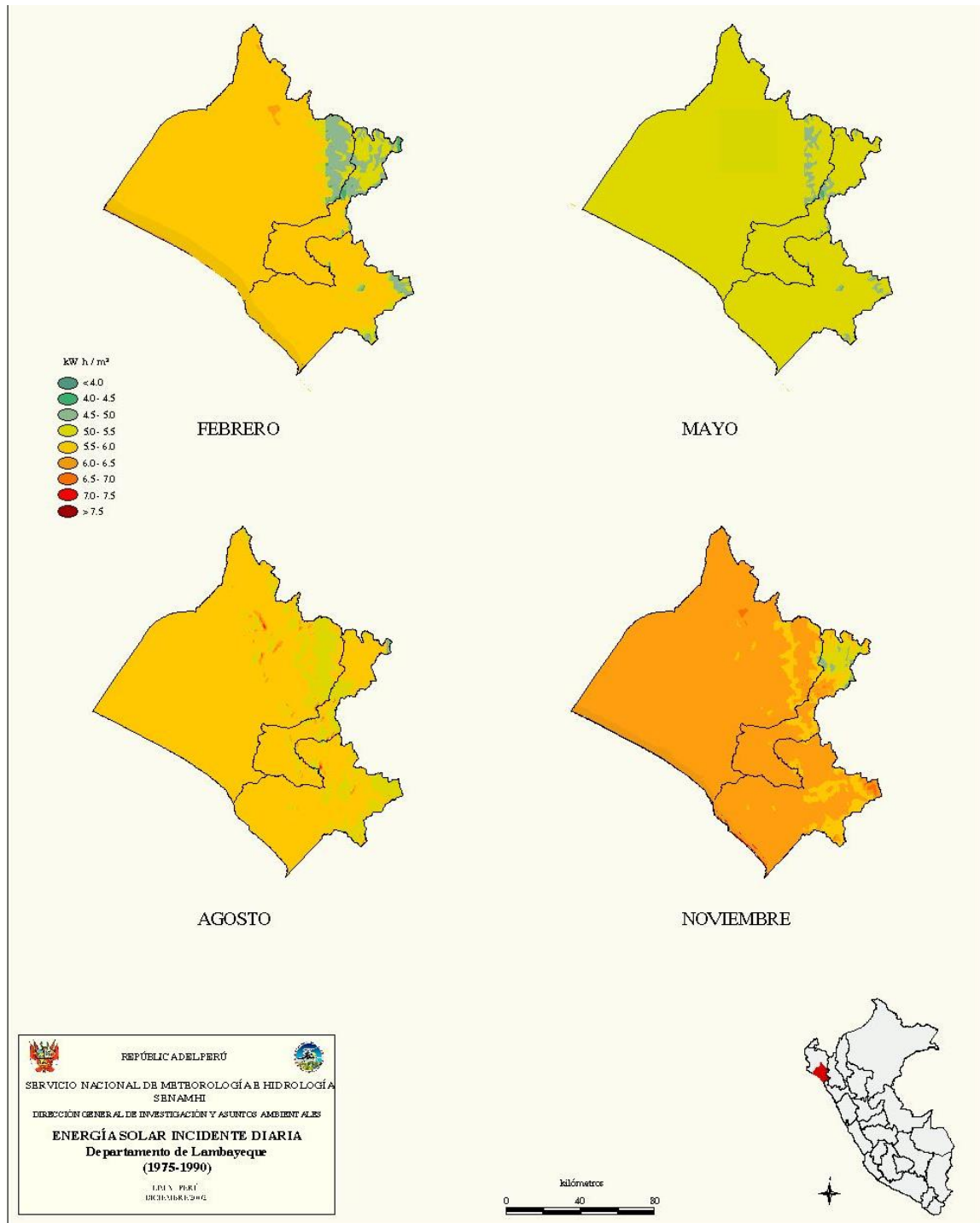


Figura 23: Datos de radiación promedio según el atlas de Energía Solar del Perú.

Fuente: (SENAMHI, 2003)

2.3.1.2 Datos meteorológicos

Respecto a la temperatura, presión y precipitación los datos fueron obtenidos del sitio web del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAHMI) (SENAMHI, 2016), la cual registra datos diarios de temperaturas en diversas ciudades del Perú desde hace más de 10 años. Los datos de temperaturas utilizados fueron tomados por la estación meteorológica LAMBAYEQUE-000301 ubicada a una latitud de $6^{\circ}43'54''$ S y una longitud $79^{\circ}54'9''$ O dentro de la UNPRG, estos datos por tanto están ubicados en el mismo lugar y son altamente confiables.

La Fig. 24 muestra los valores de temperatura máxima y mínima para la ciudad de Lambayeque. Se tomaron los valores de temperatura de los últimos 5 años (2012-2016) y se promediaron. Esto para obtener valores más confiables.

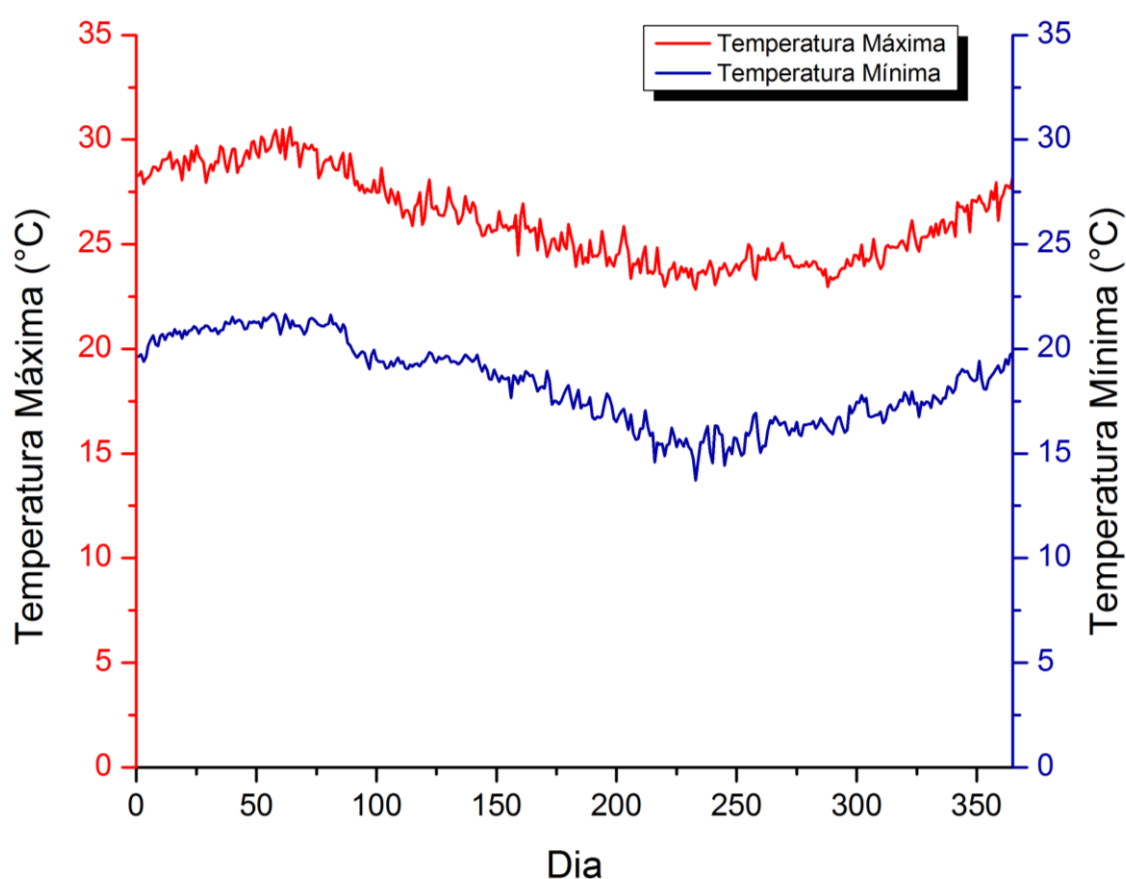


Figura 24: Temperatura máxima y mínima en Lambayeque.

Fuente: Elaboración propia

La Fig 25 muestra los valores de precipitación en Lambayeque.

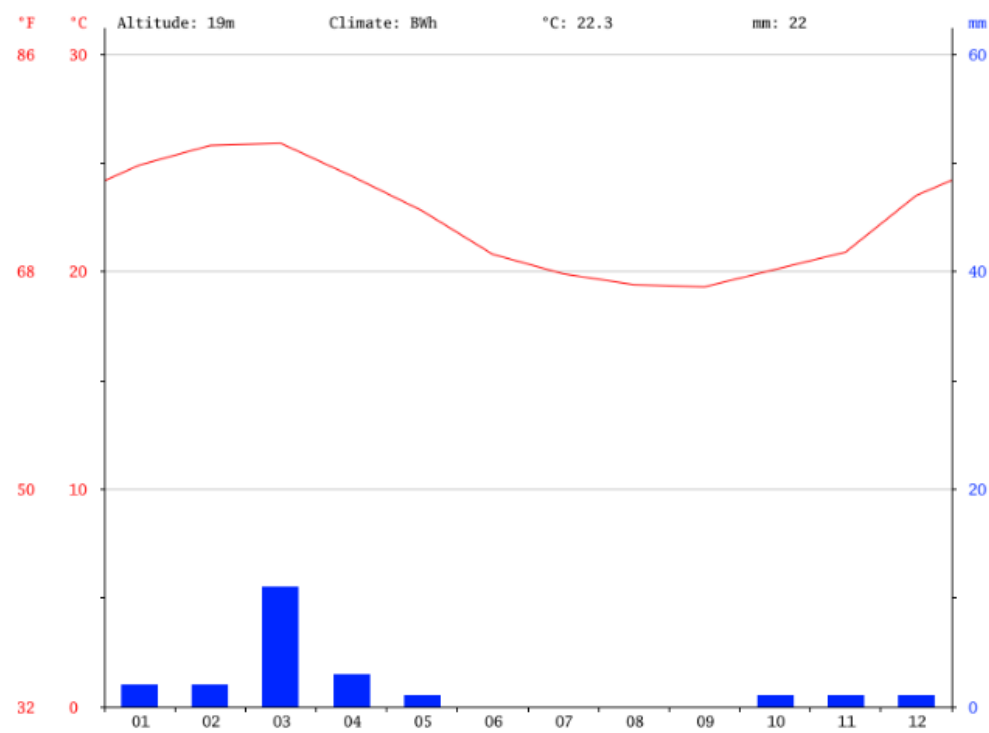


Figura 25: Precipitación en Lambayeque.

Fuente: Elaboración propia.

2.4 MODELOS MATEMÁTICOS

Los modelos matemáticos son un factor principal de nuestro dispositivo gracias a ellos se podrá estimar la radiación, para poder obtener el modelo óptimo para nuestra zona de estudio es necesario obtener los valores de la astronomía solar.

2.4.1 Astronomía Solar

Para poder modelar la radiación solar a partir de otros parámetros climatológicos es necesario conocer algunos conceptos de astronomía solar, es decir parámetros que definen la posición y el movimiento del sol.

Ángulo diario

$$\Gamma = \frac{2\pi(n - 1)}{360}$$

Donde:

n: número de día en el año juliano

Declinación

La declinación solar es el ángulo que forma la línea tierra-sol con el plano del ecuador terrestre a medida que la tierra recorre su órbita, en el hemisferio sur el ángulo de declinación solar varía desde +23.45° en el solsticio de invierno (21 o 22 de junio) hasta -23.45° en el solsticio de verano (20 o 21 de diciembre) y se hace nulo en los equinoccios (22 de marzo y 22 de setiembre).

La declinación se puede calcular mediante distintas ecuaciones existentes como:

Formula de Spencer (Spencer, 1971)

$$\delta(n) = 0.006918 - 0.0399912\cos\Gamma + 0.070257\sin\Gamma - 0.006758\cos2\Gamma + 0.000907\sin2\Gamma \\ - 0.002697\cos3\Gamma + 0.00148\sin3\Gamma$$

Fórmula aproximada de Cooper (Cooper, 1969):

$$\delta(n) = 23.45^\circ \sin\left(\frac{284 + n}{365.5} * 360^\circ\right)$$

Donde:

Γ : Ángulo diario

δ : Ángulo de declinación del sol

n: Número de día en el año juliano

Ángulo horario

El ángulo horario ω indica el desplazamiento angular del sol, de este a oeste, a una tasa de 15 grados/hora debido a la rotación de la tierra. Por convención, se considera el ángulo horario nulo en el mediodía solar, negativo en la mañana y positivo por la tarde. Este ángulo se define sobre el plano del ecuador, como el ángulo entre los meridianos del Sol y de un observador O ubicado en el hemisferio norte.

Lo importante para este trabajo es el valor del ángulo horario a la salida o puesta del sol, el cual se calcula mediante:

$$\cos(\omega_s) = -\operatorname{tg}(\phi) * \operatorname{tg}(\delta)$$

Donde:

ω_s : Ángulo horario (a la salida o puesta del sol) [rad]

δ : Ángulo de declinación del sol [°]

ϕ : Latitud del Lugar [°]

Corrección por excentricidad de la órbita

La órbita terrestre no es circular, sino que es elíptica con el sol en un foco, la órbita posee una excentricidad y a consecuencia la distancia de la tierra al sol varía en el tiempo y la irradiación presenta una variación estacional de $\pm 3\%$ debido a esta excentricidad (Abal, 2012). Para considerar este efecto se utiliza el coeficiente F_n denominado corrección por excentricidad de la órbita o corrección orbital, que según Spencer (Spencer, 1971) viene determinado por:

$$F_n = 1,000110 + 0,034221\cos(\Gamma) + 0,001280\sin(\Gamma) + 0,000719\cos(2\Gamma) + 0,000077\sin(2\Gamma)$$

Donde:

Γ : ángulo diario. [rad]

Constante Solar

La constante solar representa el flujo de radiación proveniente del sol que cruza por unidad de área, medida en la parte superior de la atmósfera terrestre y en forma normal a los rayos del sol, considerando una distancia de la tierra al sol de 1 UA (unidad astronómica). El valor de la constante solar considerado en este trabajo es de 1367 W/m². Por lo tanto:

$$G_{CS} = 1367 \text{ W/m}^2$$

Radiación Solar Extraterrestre

La radiación solar extraterrestre no tiene el mismo valor que el de la constante solar todos los días, el valor de radiación varía diariamente de acuerdo a las condiciones astronómicas y también que este último valor se calcula para un plano horizontal y no para uno normal. Por lo que se debe calcular la radiación solar extraterrestre diaria.

La irradiación solar extraterrestre es la energía por unidad de área sobre un plano horizontal ubicado fuera de la atmosfera. Para calcular la irradiación solar extraterrestre en un día y latitud determinadas H_0 , utilizamos la siguiente ecuación (Abal, 2012):

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{CS} F_n (\cos \delta \cos \phi \sin \omega_s + \omega_s \sin \delta \sin \phi)$$

Donde:

H_0 : Irradiación solar extraterrestre en un día [kWh/m²/día]

ω_s : Ángulo horario [rad]

F_n : Corrección por excentricidad de la órbita

I_{CS} : Constante solar [Wh/m²]

δ : Declinación diaria [°]

ϕ : Latitud del Lugar [°]

2.4.2 Modelo de Bristow-Campbell

Uno de los modelos más apropiados resultan los planteados por Bristow y Campbell, conocidos también como correlación BC, y de Hargreaves y Samani, también conocido como correlación HS, estos modelos hacen uso de las temperaturas máxima y mínima diarias, o promedios mensuales de estas variables, mas valores teóricos de la radiación extraterrestre incidente que son fácilmente calculables.

El modelo de Bristow Campbell (Bristow, Campbell, & Saxton, 1985), emplea las variables de entrada en una expresión exponencial típica de fenómenos físicos que limita sus valores, máximo y mínimo a los valores posibles en los límites de su variación. Esto es, que la máxima energía que se puede alcanzar, es la incidente extraterrestre, y cero en un día absolutamente cubierto

$$H = a.H_o(1-e^{-b(\Delta T)^c})$$

Donde:

a, es la denominada transmisividad de la atmosfera.

b y c, son constantes específicas de la región.

H_o, es la energía extraterrestre diaria dependiente de la latitud y día del año.

ΔT=T_{max}–T_{min}, es la diferencia de temperaturas entre la máxima y mínima diarias.

2.4.3 Modelo de Hargreaves-Samani

Este modelo está basado en la diferencia entre la temperatura máxima y mínima del aire ya que a esta se relaciona con el grado de cobertura de nubes en la localidad. Cuando el cielo está despejado, durante el día, se determinan altas temperaturas ($T_{\text{máx}}$) ya que la atmosfera está libre de nubes y permite la entrada de la radiación solar, por otro lado las bajas temperaturas que se presentan en la noche ($T_{\text{mín}}$) es debido a que menos radiación saliente de onda larga es absorbida por la atmósfera. Por otra parte, en condiciones nubladas, $T_{\text{máx}}$ será relativamente menor porque una parte de la radiación solar entrante nunca llega a la superficie de la tierra y es reflejada y absorbida por las nubes. De la misma manera, $T_{\text{mín}}$ será relativamente mayor ya que la cubierta de nubes se comporta como un manto disminuyendo la salida de la radiación de onda larga. Por lo tanto la diferencia entre la temperatura del aire máxima y mínima ($T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}$) se puede usar como un indicador de la fracción de la radiación extraterrestre que alcanza la superficie de la tierra (Samani, 1985). El modelo de Hargreaves-Samani para estimar RS es el siguiente

$$H = aH_o\sqrt{(T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}})}$$

Donde:

H_o : radiación extraterrestre ya definida.

$T_{\text{máx}}$: temperatura máxima del día, o la promedio mensual.

$T_{\text{mín}}$: temperatura mínima del día, o la promedio mensual

a : es una constante de ajuste.

2.4.4 Modelo de Annandale

Annandale et al (Annandale, Jovanovic, Benadé, & Allen, 2002) modificaron el modelo de Hargreaves-Samani incluyendo una corrección por altitud, proponiendo un nuevo coeficiente:

$$H = kH_o\sqrt{(T_{max} - T_{min})}$$

$$k = (1 + 2.7 * 10^{-5} * z) * a$$

En esta ecuación a es el coeficiente propuesto por Hargreaves (1994) y z la elevación sobre el nivel del mar (m).

2.4.5 Modelo de Chen

Chen et al.(Chen, Ersi, Yang, Lu, & Zhao, 2004) propone el siguiente modelo:

$$H = \{0.28\ln(T_{max} - T_{min}) - 0.15\} * H_o$$

2.4.6 Modelo de Ertekin y Yaldiz

En 1999 Ertekin y Yaldiz sugieren un nuevo modelo matemático en el que la radiación puede ser calculada mediante (Maza León, 2016)

$$H = -4.46 + 0.477H_0 + 0,226T_{avg}$$

Donde:

T_{avg} : Es la temperatura promedio.

2.4.7 Evaluación de los modelos matemáticos

Para validar y comparar entre si los distintos modelos se usaron los siguientes estimadores estadísticos:

- Coeficiente de Determinación [R^2] que es la medida de qué tan bien la línea de regresión se aproxima a los puntos en la dispersión, un modelo es más eficiente cuando R^2 es más cercano a 1.
- Error medio cuadrático porcentual [RMSE%] que indica el rendimiento de los modelos, comparando la actual desviación entre los valores estimados y observados, si RMSE es menor, refleja un mejor rendimiento del modelo.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}}$$

$$\%RMSE = \frac{RMSE}{\hat{y}} * 100$$

- Error medio de sesgo porcentual [MBE%] al igual que RMSE indica el rendimiento de los modelos y además indica si un determinado modelo tiene una tendencia a sobreestimar o subestimar los valores.

$$MBE = \sum \frac{y_i - \hat{y}_i}{n}$$

$$\%MBE = \frac{MBE}{\hat{y}} * 100$$

Donde:

y_i : Dato estimado

\hat{y}_i : Dato medido

n : Número de datos.

2.5 SENSORES Y CONTROL

- Sensores

Sensor de temperatura: El sensor de temperatura será el encargado de proveer los datos de temperatura máxima, mínima y promedio diaria al sistema.

Celda Solar: La celda solar produce una corriente directamente proporcional a la radiación incidente. Se medirá la corriente en la celda por medio de un amperímetro y el voltaje utilizando un voltímetro. Estos datos se almacenarán cada 15 minutos en el dispositivo. Como la medición será cada 15 minutos se puede obtener una curva proporcional a la curva de radiación diaria.

Sensor de humedad: Se medirá la humedad para calibrar los valores de temperatura.

- Estimación de la radiación

El dispositivo estimará la radiación solar diaria de la siguiente manera:

Con los datos de temperatura provistos por el sensor de temperatura y con ayuda del sensor de humedad, el dispositivo estimará el valor de radiación global diaria utilizando el modelo empírico seleccionado.

Con los datos de corriente y voltaje provisto por los sensores de la celda solar, se obtendrá una curva de potencia horaria en el día.

La integral de esta potencia es directamente proporcional a la radiación solar global diaria, a través de un ajuste obtendremos el coeficiente de proporcionalidad, el cual dependerá de la eficiencia, el tamaño de la celda y un ajuste de calibración.

- Predicción de la radiación

El dispositivo debe permitir predecir la radiación en un rango de 1 a 2 días con confiabilidad. Para ello se realizan 2 pasos.

- Predicción por modelo empírico

El modelo empírico permitirá predecir la radiación solar global diaria utilizando los datos de temperaturas provistos por bases de datos en internet.

- Predicción por red neuronal

Utilizando una red neuronal se puede predecir con mayor precisión e incluso podemos predecir la curva de radiación diaria. Para ello utilizaremos datos de internet y los datos almacenados pasados como entrenamiento.

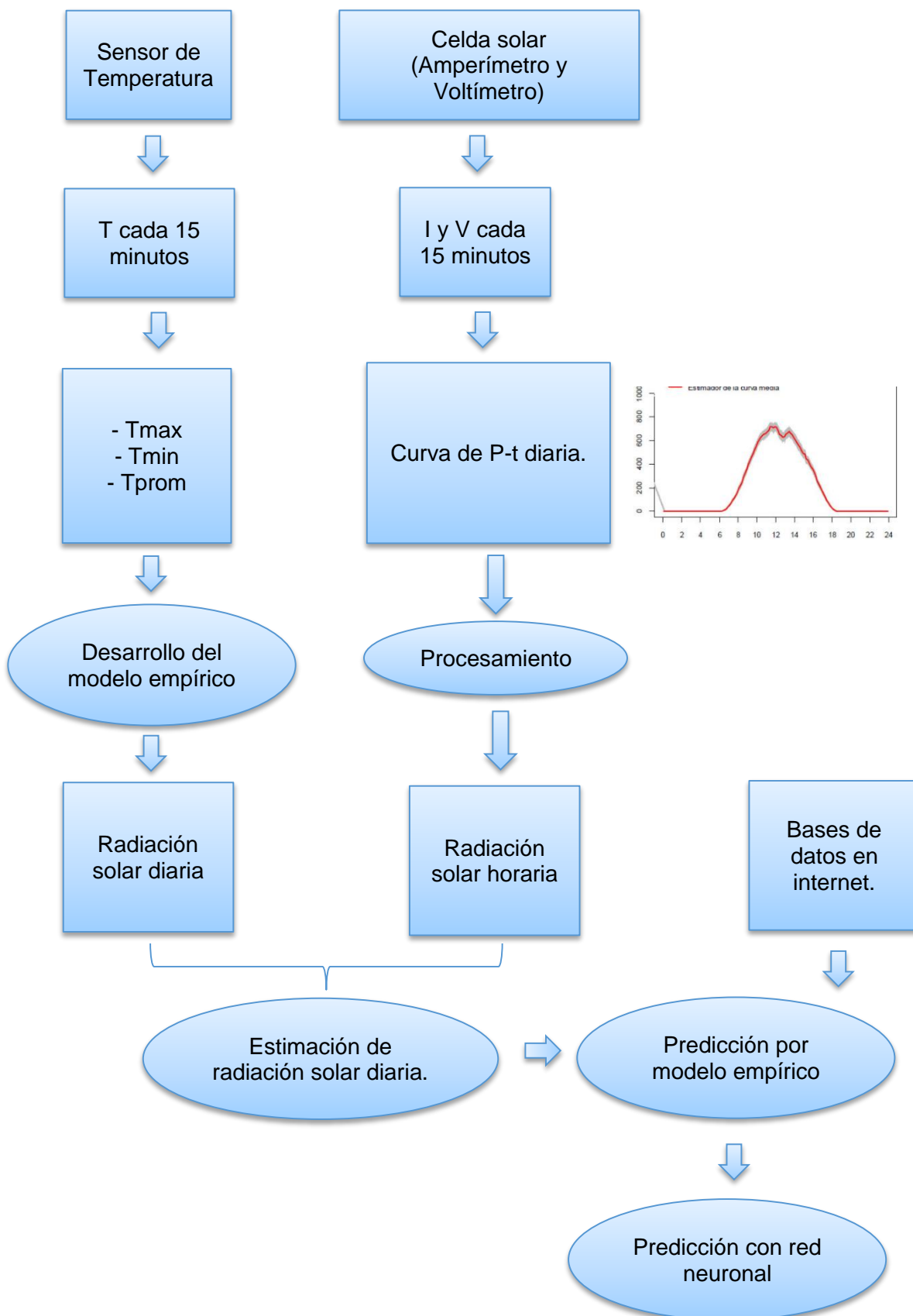


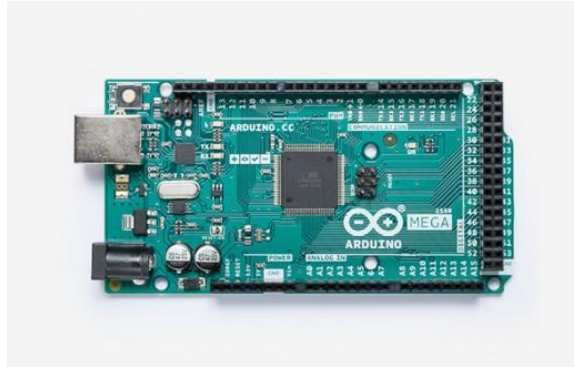
Figura 26: Diagrama de control y sensores.

Fuente: Elaboración propia

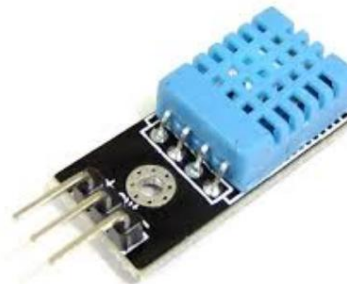
2.6 MATERIALES

El dispositivo que vamos a realizar requiere pocos materiales pues una de las consideraciones es realizar un diseño de bajo costo, la mayoría del trabajo se centra en el desarrollo del código en Arduino. Los materiales necesarios son:

- Arduino MEGA 2560 Rev 3



- Sensor de Temperatura y Humedad DHT11



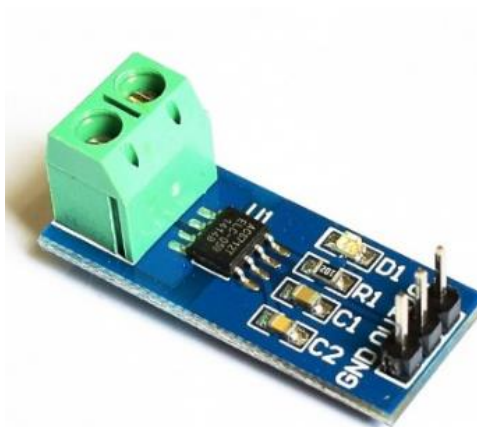
- Celda Solar



- Módulo SPI de almacenamiento SD Card



- Sensor de corriente ACS712



Equipos

- Protoboard, resistencias, capacitores, etc.
- Computadora con software de Arduino Instalado y conexión Ethernet.

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 MODELOS EMPÍRICOS

Los modelos matemáticos son uno de los factores principales de nuestro dispositivo gracias a ellos se podrá estimar la radiación, para poder obtener el modelo óptimo para nuestra zona de estudio es necesario obtener los valores de la astronomía solar.

3.1.1 Astronomía Solar

Para poder modelar la radiación solar a partir de otros parámetros climatológicos es necesario antes realizar el cálculo de los parámetros que definen la posición y el movimiento del sol.

Ángulo diario

$$\Gamma = \frac{2\pi(n - 1)}{360}$$

Donde:

n: número de día en el año juliano

La Tabla 4 muestra los resultados para cada mes y en el Anexo 2 se muestran los datos diarios.

Tabla 4: Valores para el ángulo diario en [°] considerando el día 15 de cada mes, los números en rojo indican valores negativos.

Fuente: Elaboración propia

Mes	Ángulo Diario [°]
Enero	14.0
Febrero	44.0
Marzo	74.0
Abril	104.0
Mayo	134.0
Junio	164.0
Julio	194.0
Agosto	224.0
Septiembre	254.0
Octubre	284.0
Noviembre	314.0
Diciembre	344.00

Declinación

En la sección anterior se definió el concepto de declinación, la cual la podemos calcular mediante la formular de Spencer o la de Cooper:

(Spencer, 1971)

$$\delta(n) = 0.006918 - 0.0399912\cos\Gamma + 0.070257\sin\Gamma - 0.006758\cos2\Gamma + 0.000907\sin2\Gamma \\ - 0.002697\cos3\Gamma + 0.00148\sin3\Gamma$$

(Cooper, 1969):

$$\delta(n) = 23.45^\circ \sin\left(\frac{284 + n}{365.5} * 360^\circ\right)$$

Donde:

Γ : Ángulo diario

δ : Ángulo de declinación del sol

n: Número de día en el año juliano

Debido a que la fórmula de Spencer es fácil de utilizar en cálculos por computadora y posee un menor margen de error, calculamos la declinación mediante esta fórmula. La Fig. 27 muestra los valores de declinación en grados para cada día del año, se indican también los valores para el día 15 de cada mes, la Tabla 5 muestra el valor exacto para cada uno de esos días. En el Anexo 3 se encuentra los datos diarios de declinación.

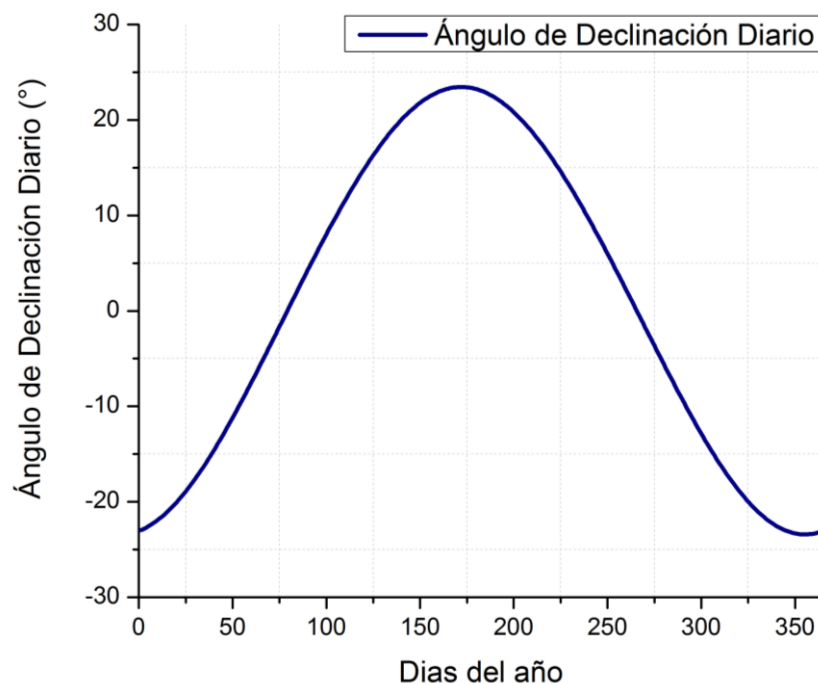


Figura 27: Valores de declinación diaria en [°], se indican los valores para el 15 de cada mes.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 5: Valores para el ángulo de declinación en [°] considerando el día 15 de cada mes, los números en rojo indican valores negativos.

Fuente: Elaboración propia

Mes	Declinación [°]
Enero	21.09
Febrero	12.61
Marzo	2.04
Abril	9.84
Mayo	18.91
Junio	23.33
Julio	21.51
Agosto	13.99
Septiembre	2.96
Octubre	8.59
Noviembre	18.56
Diciembre	23.27

Ángulo horario

El ángulo horario ω indica el desplazamiento angular del sol, de este a oeste, a una tasa de 15 grados/hora debido a la rotación de la tierra. Por convención, se considera el ángulo horario nulo en el mediodía solar, negativo en la mañana y positivo por la tarde. Este ángulo se define sobre el plano del ecuador, como el ángulo entre los meridianos del Sol y de un observador O ubicado en el hemisferio norte.

Lo importante para este trabajo es el valor del ángulo horario a la salida o puesta del sol, el cual se calcula mediante:

$$\cos(\omega_s) = -\operatorname{tg}(\phi) * \operatorname{tg}(\delta)$$

Donde:

ω_s : Ángulo horario (a la salida o puesta del sol) [rad]

δ : Ángulo de declinación del sol [°]

ϕ : Latitud del Lugar [°]

Por lo que el ω_s será:

$$\omega_s = \arccos(-tg(\phi) * tg(\delta))$$

La tabla 6 muestra los datos mensuales promedios de ángulos horarios a la salida o puesta del sol. En el Anexo 4 se muestran los cálculos diarios de este ángulo.

Tabla 6: Valores para el ángulo horario considerando el día 15 de cada mes, los números en rojo indican valores negativos.

Fuente: Elaboración propia

Mes	Declinación [°]	Ángulo horario [°]
Enero	21.09	87.3955
Febrero	12.61	88.4896
Marzo	2.04	89.7595
Abril	9.84	91.1710
Mayo	18.91	92.3133
Junio	23.33	92.9129
Julio	21.51	92.6616
Agosto	13.99	91.6822
Septiembre	2.96	90.3491
Octubre	8.59	91.0198
Noviembre	18.56	87.7327
Diciembre	23.27	87.0955

Corrección por excentricidad de la órbita

La órbita terrestre no es circular, sino que es elíptica con el sol en un foco, la órbita posee una excentricidad y a consecuencia la distancia de la tierra al sol varía en el tiempo y la irradiación presenta una variación estacional de $\pm 3\%$ debido a esta excentricidad (Abal, 2012). Para considerar este efecto se utiliza el coeficiente F_n denominado corrección por excentricidad de la órbita o corrección orbital, que según Spencer (Spencer, 1971) viene determinado por:

$$F_n = 1,000110 + 0,034221\cos(\Gamma) + 0,001280\sin(\Gamma) + 0,000719\cos(2\Gamma) + 0,000077\sin(2\Gamma)$$

Donde:

Γ : Ángulo diario. [rad]

Desarrollando la ecuación se obtiene el factor de corrección diario durante el año, el cual se muestra en el Anexo 5.

Constante Solar

La constante solar representa el flujo de radiación proveniente del sol que cruza por unidad de área, medida en la parte superior de la atmosfera terrestre y en forma normal a los rayos del sol, considerando una distancia de la tierra al sol de 1 UA (unidad astronómica). El valor de la constante solar considerado en este trabajo es de 1367 W/m². Por lo tanto:

$$G_{CS} = 1367 \text{ W/m}^2$$

Radiación Solar Extraterrestre

Para calcular la irradiación solar extraterrestre en un día y latitud determinada H_0 utilizamos la siguiente ecuación (Abal, 2012):

$$H_0 = \frac{24}{\pi} I_{CS} F_n (\cos\delta \cos\phi \sin\omega_s + \omega_s \sin\delta \sin\phi)$$

Donde:

H_0 : Irradiación solar extraterrestre en un día [kWh/m²/día]

ω_s : Ángulo horario [rad]

F_n : Corrección por excentricidad de la órbita

I_{CS} : Constante solar [Wh/m²]

δ : Declinación diaria [°]

ϕ : Latitud del Lugar [°]

La Fig. 28 muestra la radiación extraterrestre calculada, en el anexo 09 se muestran los valores correspondientes.

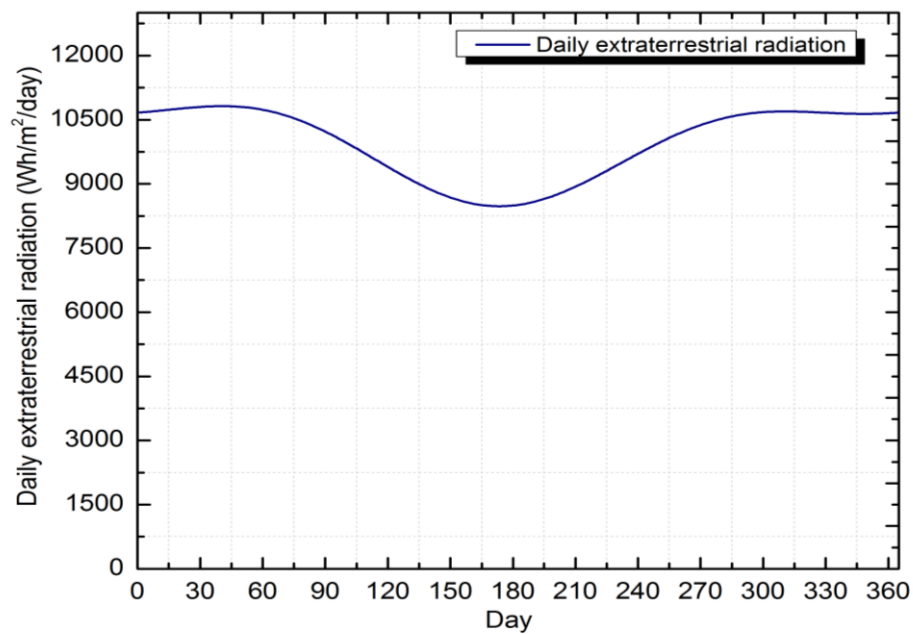


Figura 28: Radiación extraterrestre

Fuente: Elaboración propia

Modelos empíricos

Modelo de Bristow-Campbell

Uno de los modelos más apropiados resultan los planteados por Bristow y Campbell, conocidos también como correlación BC, este modelo hace uso de las temperaturas máxima y mínima diarias, o promedios mensuales de estas variables, más valores teóricos de la radiación extraterrestre incidente que son fácilmente calculables.

El modelo de Bristow Campbell (Bristow et al., 1985), emplea las variables de entrada en una expresión exponencial típica de fenómenos físicos que limita sus valores, máximo y mínimo a los valores posibles en los límites de su variación. Esto es, que la máxima energía que se puede alcanzar, es la incidente extraterrestre, y cero en un día absolutamente cubierto

$$H = a.H_o(1 - e^{-b(\Delta T)^c})$$

Donde:

a : es la denominada transmisividad de la atmósfera.

b y c : son constantes específicas de la región.

H_o : es la energía extraterrestre diaria dependiente de la latitud y día del año.

ΔT=T_{max}–T_{min}: es la diferencia de temperaturas entre la máxima y mínima diarias.

El modelo lo podemos expresar de la siguiente manera para adecuarnos al ajuste por mínimos cuadrados:

$$\frac{H}{H_o} = a(1 - e^{-b(\Delta T)^c})$$

Después de desarrollar el modelo se obtuvieron los siguientes coeficientes:

$$a = 0.75$$

$$b=0.05$$

$$c=1.50$$

Estos se ven corroborados por (Camayo-Lapa et al., 2015).

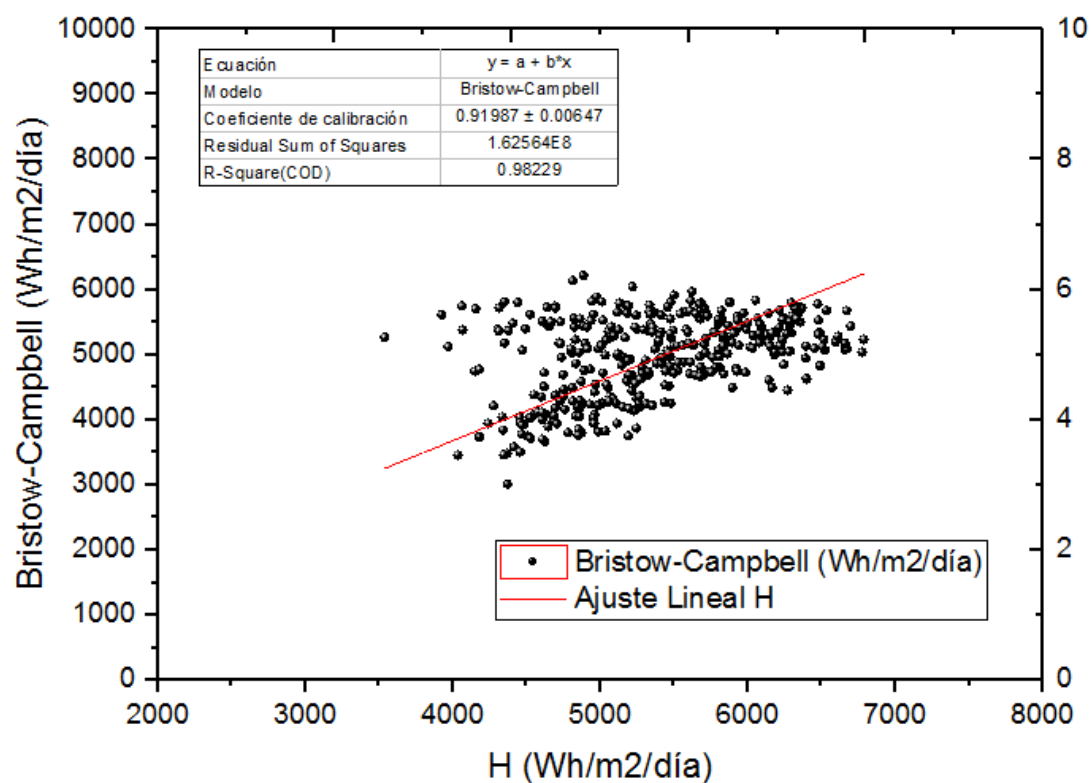


Figura 29: Ajuste del modelo de Bristow-Campbell

Fuente: Elaboración propia

La Fig. 29 muestra el ajuste del modelo, la Tabla 7 los parámetros estadísticos encontrados, mientras que en la Fig. 30 y Fig. 31 se muestran los valores estimados y reales.

Tabla 7: Parámetros estadísticos para el modelo de Bristow-Campbell

Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Valor
Módulo	<i>Bristow-Campbell</i>
Coefficiente de calibración	0.919
Número de Datos Utilizados	365
Coficiente de Determinación R^2	0.9822
RMSE	668.284
RMSE%	13.119%
MBE	-125.432
MBE%	-0.578%

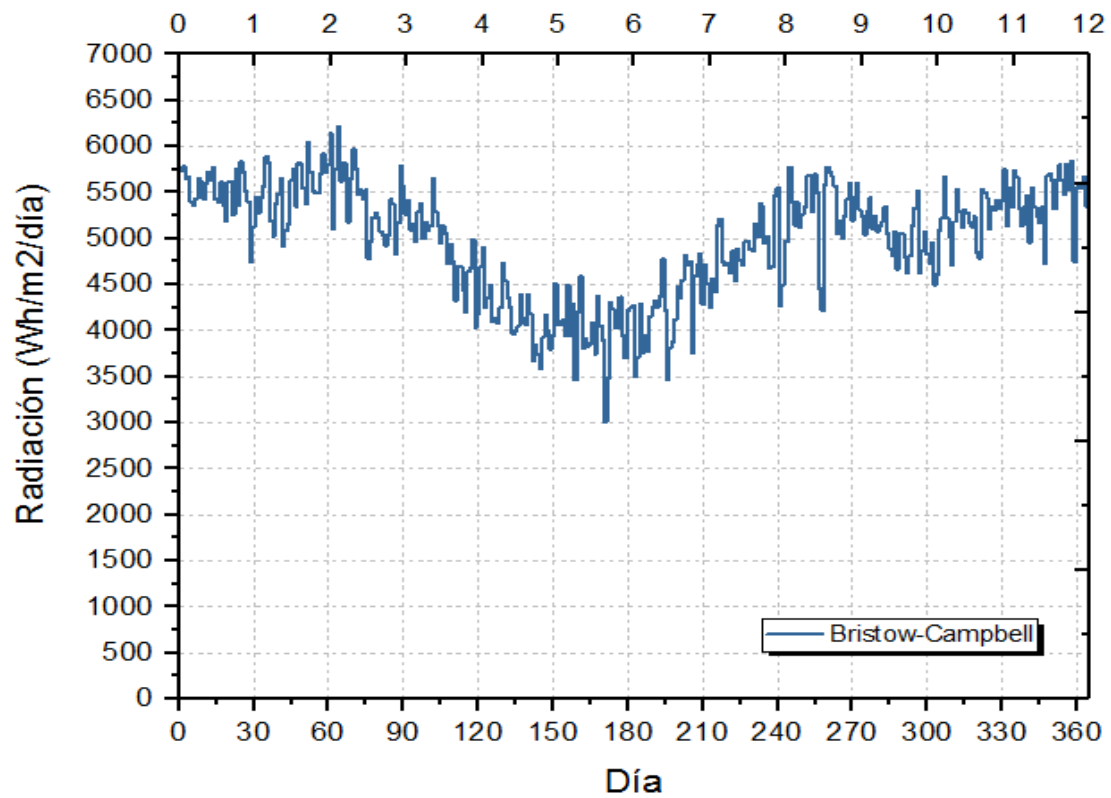


Figura 30: Valores estimados por Bristow-Campbell

Fuente: Elaboración propia

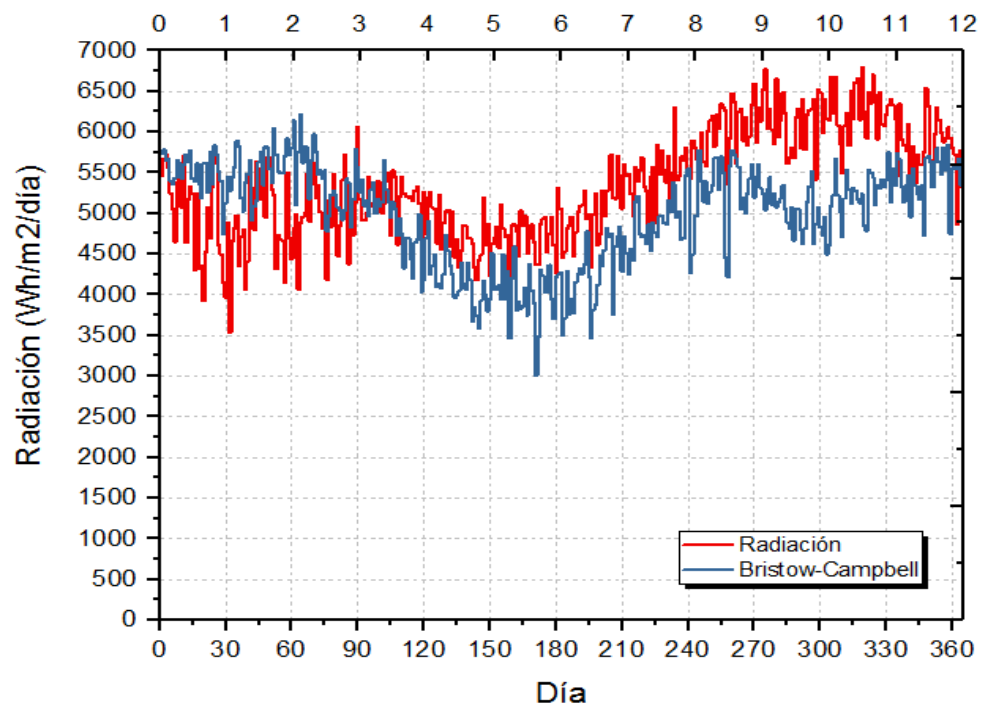


Figura 31: Comparación entre los valores estimados por el modelo de Bristow-Campbell y los valore reales.

Fuente: Elaboración propia

Modelo de Hargreaves-Samani

Este modelo está basado en la diferencia entre la temperatura máxima y mínima del aire ya que a esta se relaciona con el grado de cobertura de nubes en la localidad. Cuando el cielo está despejado, durante el día, se determinan altas temperaturas ($T_{\text{máx}}$) ya que la atmosfera está libre de nubes y permite la entrada de la radiación solar, por otro lado las bajas temperaturas que se presentan en la noche ($T_{\text{mín}}$) es debido a que menos radiación saliente de onda larga es absorbida por la atmósfera. Por otra parte, en condiciones nubladas, $T_{\text{máx}}$ será relativamente menor porque una parte de la radiación solar entrante nunca llega a la superficie de la tierra y es reflejada y absorbida por las nubes. De la misma manera, $T_{\text{mín}}$ será relativamente mayor ya que la cubierta de nubes se comporta como un manto disminuyendo la salida de la radiación de onda larga. Por lo tanto la diferencia entre la temperatura del aire máxima y mínima ($T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}$) se puede usar como un indicador de la fracción de la radiación extraterrestre que alcanza la superficie de la tierra (Samani, 1985). El modelo de Hargreaves-Samani para estimar RS es el siguiente

$$H = aH_o\sqrt{(T_{\text{max}} - T_{\text{min}})}$$

Donde:

H_o : radiación extraterrestre ya definida.

$T_{\text{máx}}$: temperatura máxima del día, o la promedio mensual.

T_{min} : temperatura mínima del día, o la promedio mensual

a : es una constante de ajuste.

Para desarrollar este modelo debemos comparar la radiación extraterrestre (calculada en la sección anterior) multiplicada por la raíz cuadrada de la diferencia de temperaturas con datos de radiación del lugar. De esta manera, por medio de un ajuste de mínimos cuadrados podemos obtener la constante “a” de Hargreaves-Samani para la cual el modelo estime con el menor error posible la radiación de Lambayeque.

Para los cálculos utilizaremos como datos de radiación del lugar los datos mensuales de la NASA (NASA POWER) y los datos de temperaturas han sido obtenidos de la estación meteorológica del SENAMHI.

Para desarrollar el modelo de Hargreaves-Samani primero calculamos el valor de la diferencia de temperaturas máxima y mínima, el cual se muestra en la Fig. 32.

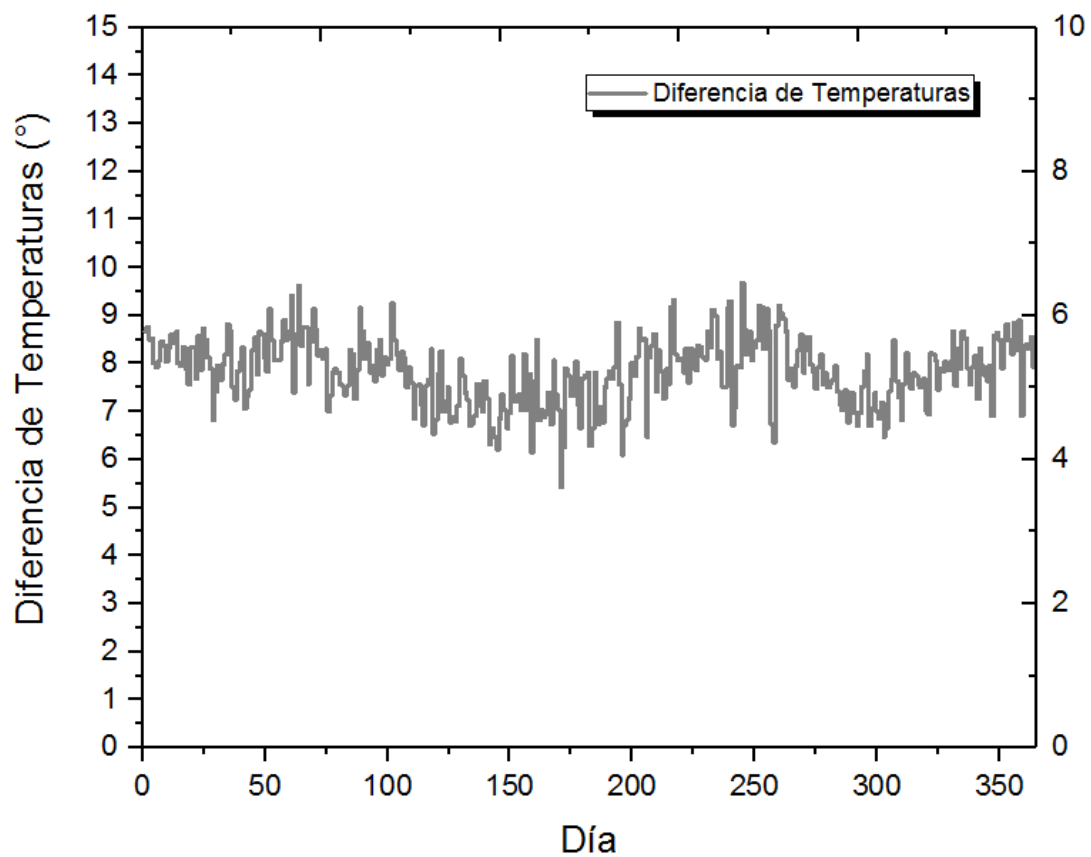


Figura 32: Diferencia de temperaturas en Lambayeque.

Fuente: Elaboración propia

Para obtener el ajuste y el desarrollo del modelo utilizamos el software OriginPro 2017 con el cual se obtuvo el ajuste mostrado en al Fig. 33 y los parámetros estadísticos mostrados en la Tabla 8.

En la Fig. 34 se muestra un gráfico de la radiación estimada por el modelo de Hargreaves-Samani y en la Fig. 35 una comparación con los valores de radiación reales.

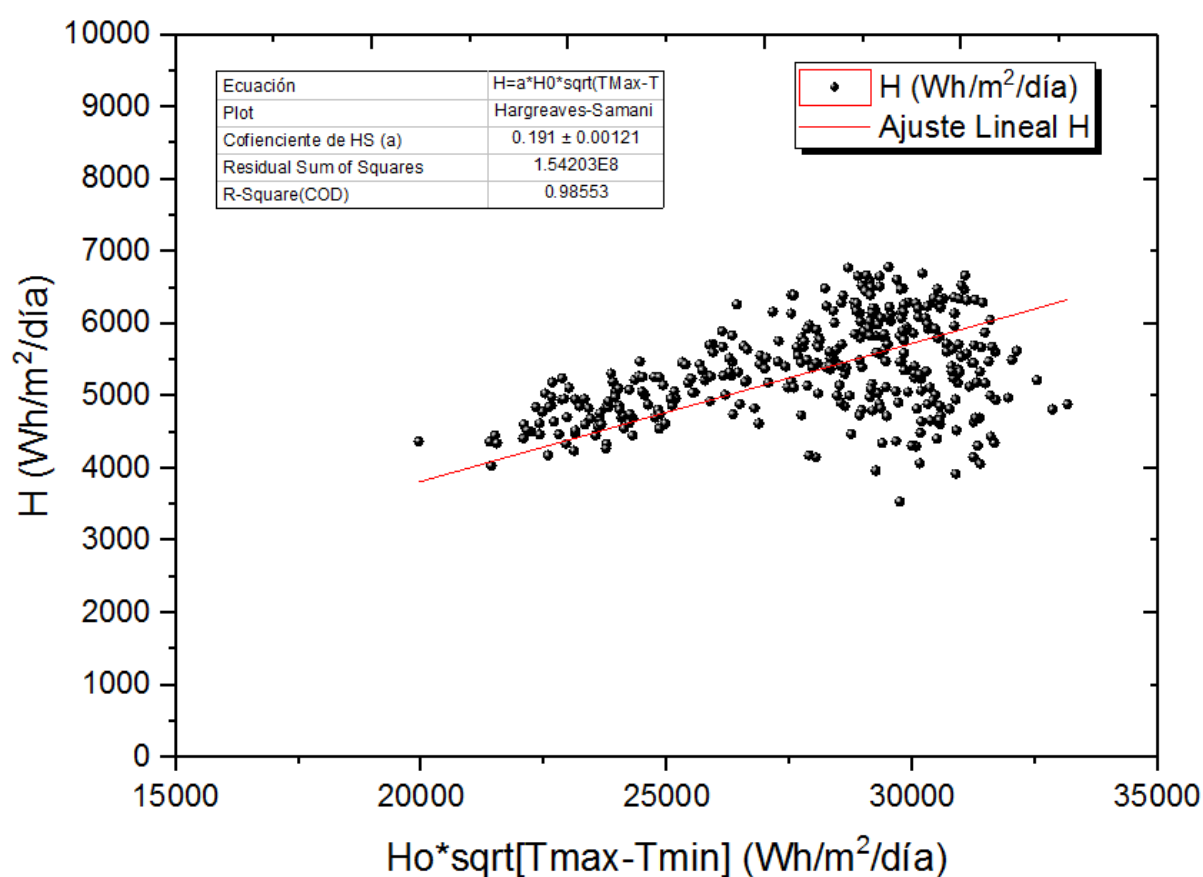


Figura 33: Ajuste del modelo de Hargreaves-Samani.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 8: Parámetros estadísticos para el modelo de Hargreaves-Samani.

Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Valor
Módulo	Hargreaves-Samani
Coficiente Encotrado	0.191
Número de Datos Utilizados	365
Coficiente de Determinación R^2	0.9855
RMSE	650.872
RMSE%	12.119%
MBE	-25.633
MBE%	-0.478%

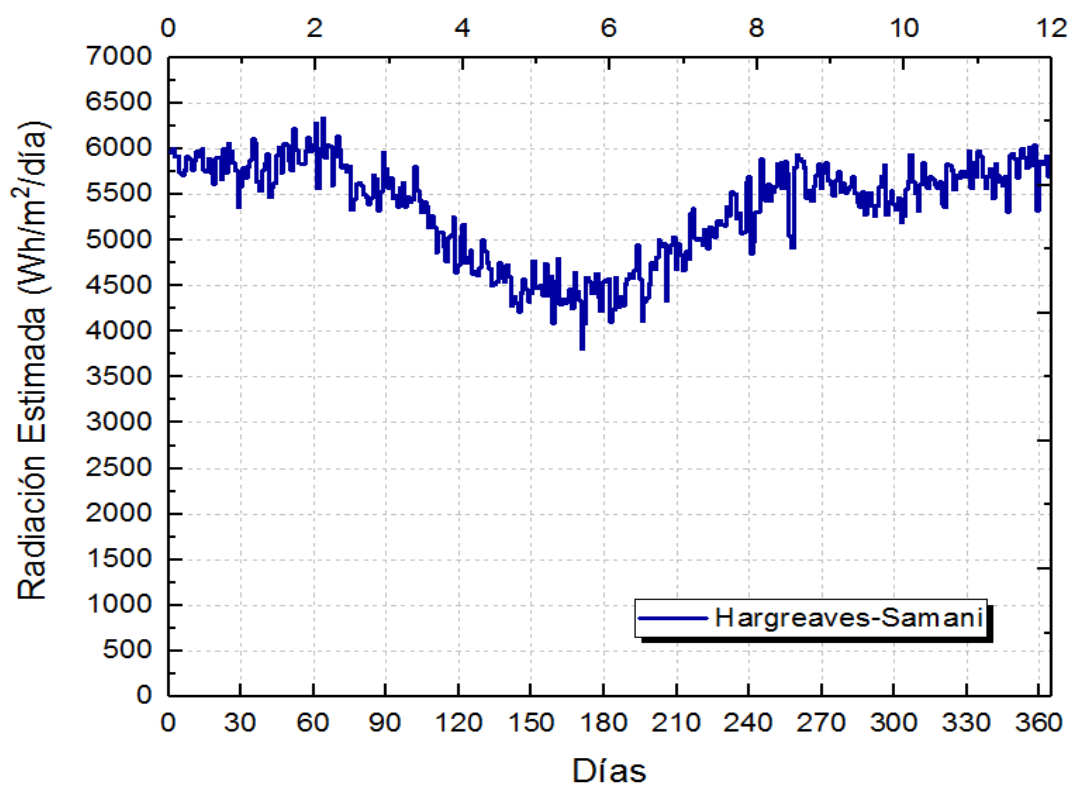


Figura 34: Valores estimados por el modelo de Hargreaves-Samani

Elaboración propia

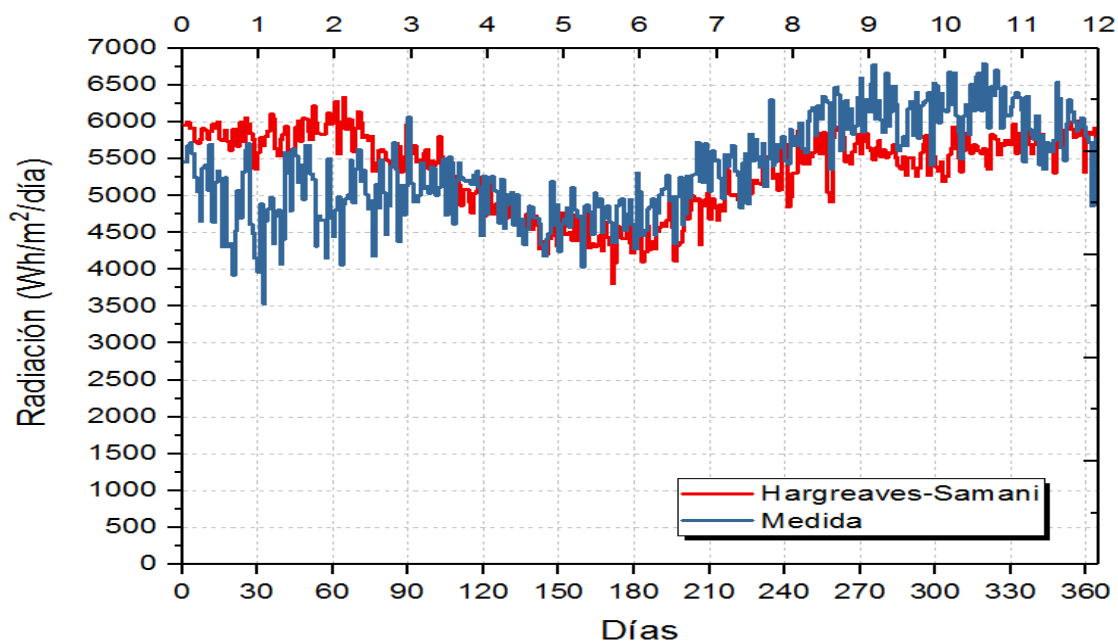


Figura 35: Comparación entre los valores estimados por el modelo de Hargreaves-Samani y los valores reales.

Fuente: Elaboración propia

Modelo de Annandale

Annandale et al (Annandale et al., 2002) modificaron el modelo de Hargreaves-Samani incluyendo una corrección por altitud, proponiendo un nuevo coeficiente:

$$H = kH_o\sqrt{(T_{max} - T_{min})}$$

$$k = (1 + 2.7 * 10^{-5} * z) * a$$

En esta ecuación a es el coeficiente propuesto por Hargreaves-Samani y z la elevación sobre el nivel del mar (m).

En la sección anterior obtuvimos que el coeficiente de Hargreaves-Samani es igual a 0.193. La ciudad de Lambayeque se encuentra a 18 m.s.n.m. Por lo que la variación en el modelo de Annandale será mínima y su coeficiente será:

$$k = (1 + 2.7 * 10^{-5} * 18) * 0.191$$

$$k = 0.191$$

Es decir existe una variación de menos de 3 cifras significativas por lo que consideraremos que el modelo de Annandale estimará exactamente igual al modelo de Hargreaves-Samani. La estimación del modelo de Annandale puede observarse en la Fig. 36.

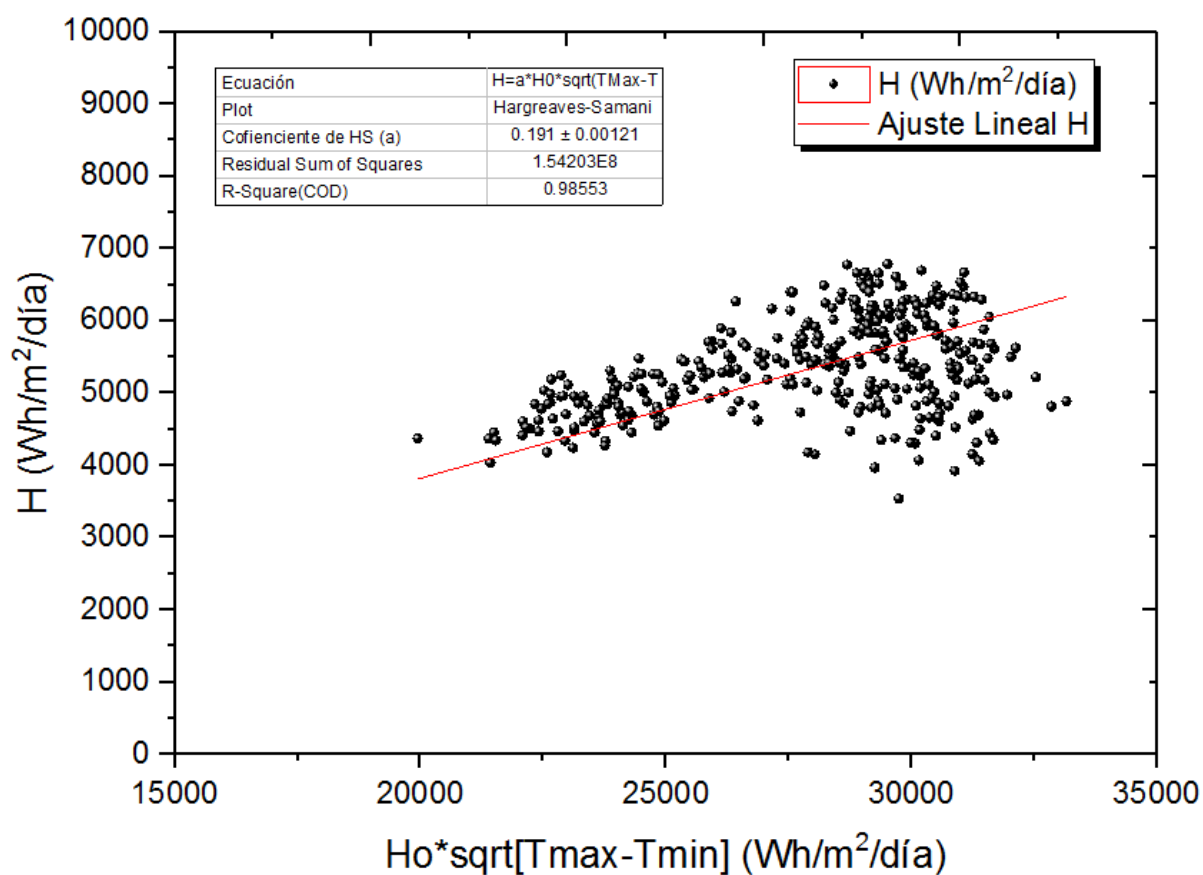


Figura 36: Ajuste del modelo de Annandale (basado en el modelo de Hargreaves-Samani).

Fuente: Elaboración propia

Tabla 9: Parámetros estadísticos para el modelo de Annandale

Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Valor
Módulo	Annandale
Coficiente Encotrado	0.191
Número de Datos Utilizados	365
Coficiente de Determinación R^2	0.9855
RMSE	650.872
RMSE%	12.119%
MBE	-25.633
MBE%	-0.478%

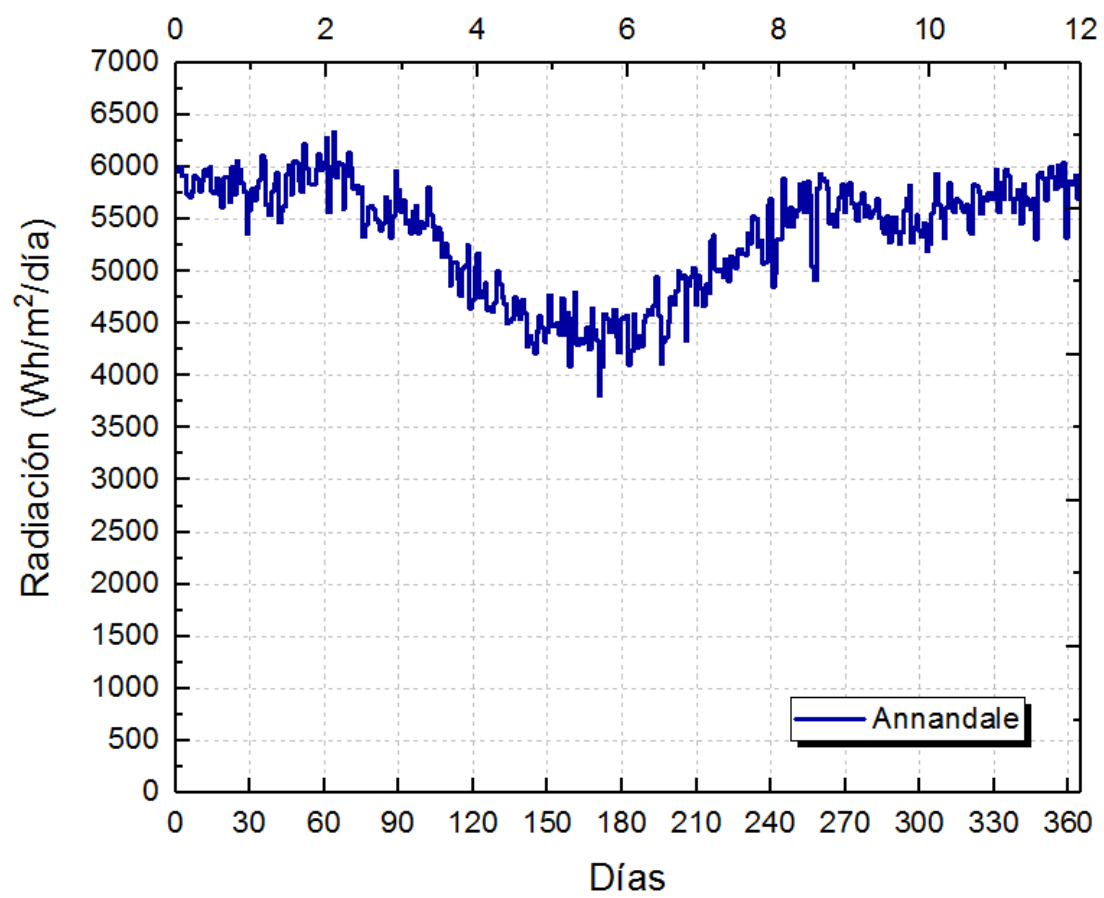


Figura 37: Valores estimados por el modelo de Annandale.

Fuente: Elaboración propia

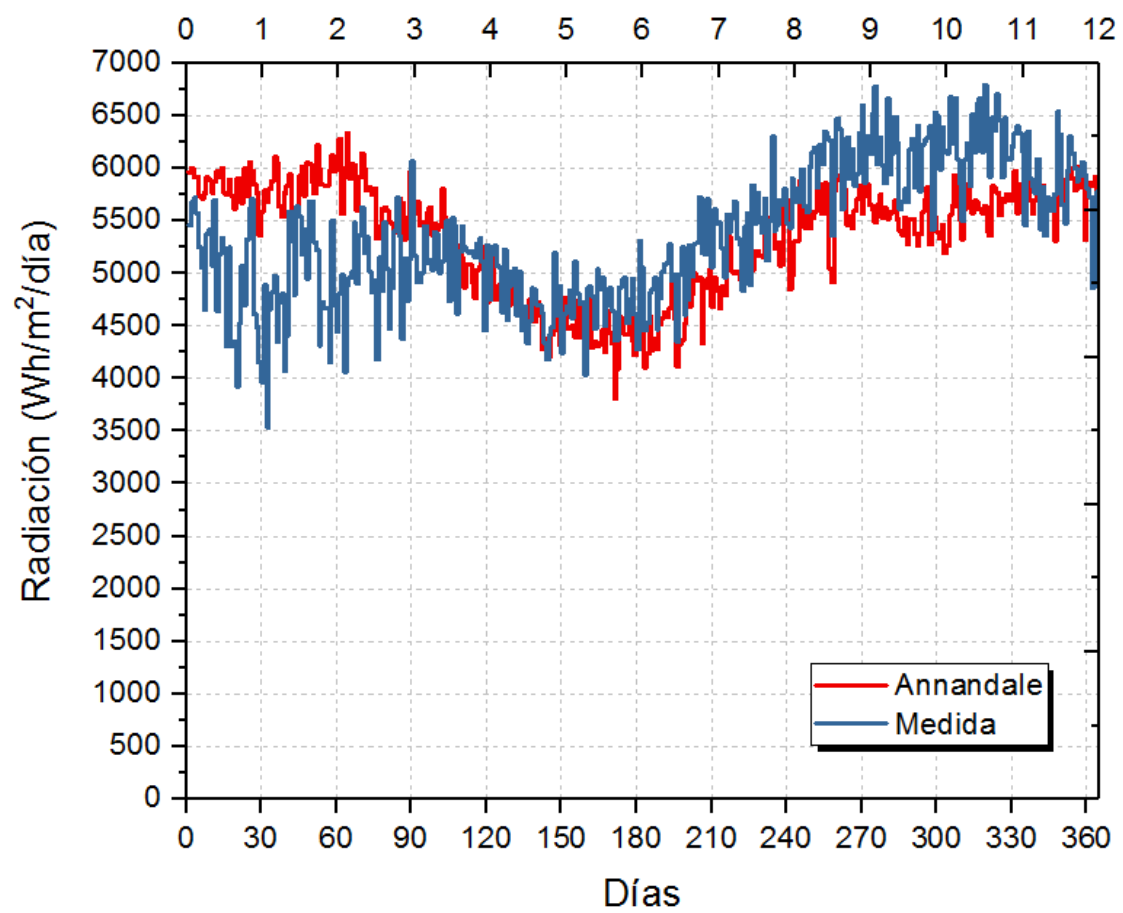


Figura 38: Comparación entre valores estimados y reales.

Fuente: Elaboración propia

Modelo de Chen

Chen et al.(Chen et al., 2004) propone el siguiente modelo:

$$H = (0.28\ln(T_{max} - T_{min}) - 0.15) * Ho$$

El modelo de Chen no requiere hallar un coeficiente, puesto que todos ya están dados. Desarrollando el modelo obtenemos los valores de estimación mostrados en la Fig. X mientras que los valores estadísticos se muestran en la Tabla X.

$$H = Ho * 0.28\ln(T_{max} - T_{min}) - Ho * 0.15$$

$$H = -Ho * 0.15 + Ho * 0.28 * \ln(T_{max} - T_{min})$$

$$y = a - b * \ln(x - c)$$

Considerando a la variable independiente como la diferencia de temperaturas, tenemos que a,b y c toman el valor de:

$$a = -Ho * 0.15$$

$$b = Ho * 0.28$$

$$c = 0$$

Coeficiente de calibración 1.252.

$$H = 1.252 * [Ho * 0.28\ln(T_{max} - T_{min}) - Ho * 0.15]$$

Resulta en la ecuación de Chen calibrada para Lambayeque:

$$H = 0.350 * Ho * \ln(T_{max} - T_{min}) - 0.188 * Ho$$

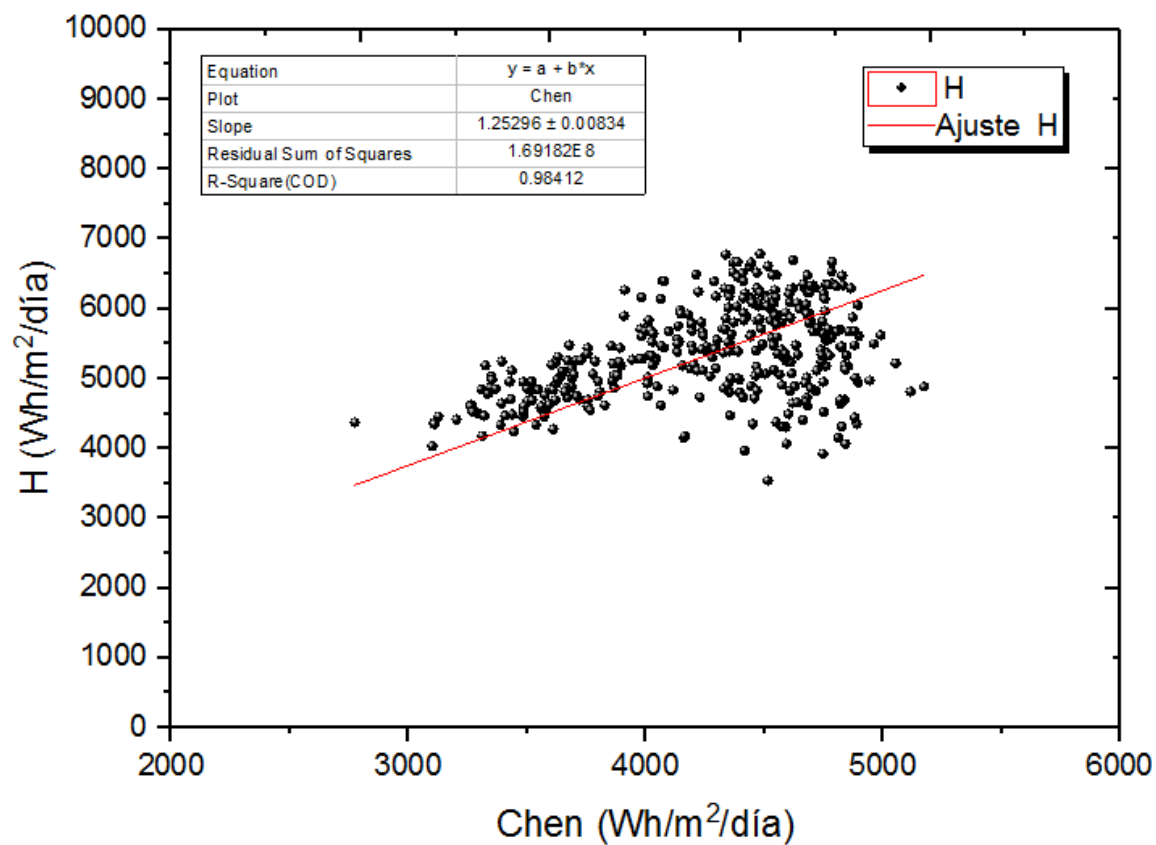


Figura 39: Ajuste del modelo de Chen.

Fuente: Elaboración propia

Tabla 10: Parámetros estadísticos para el modelo de Chen

Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Valor
Módulo	Chen
Coficiente de Calibración	1.252
Número de Datos Utilizados	365
Coficiente de Determinación R^2	0.9841
RMSE	681.752
RMSE%	12.711%
MBE	-37.388
MBE%	-0.697%

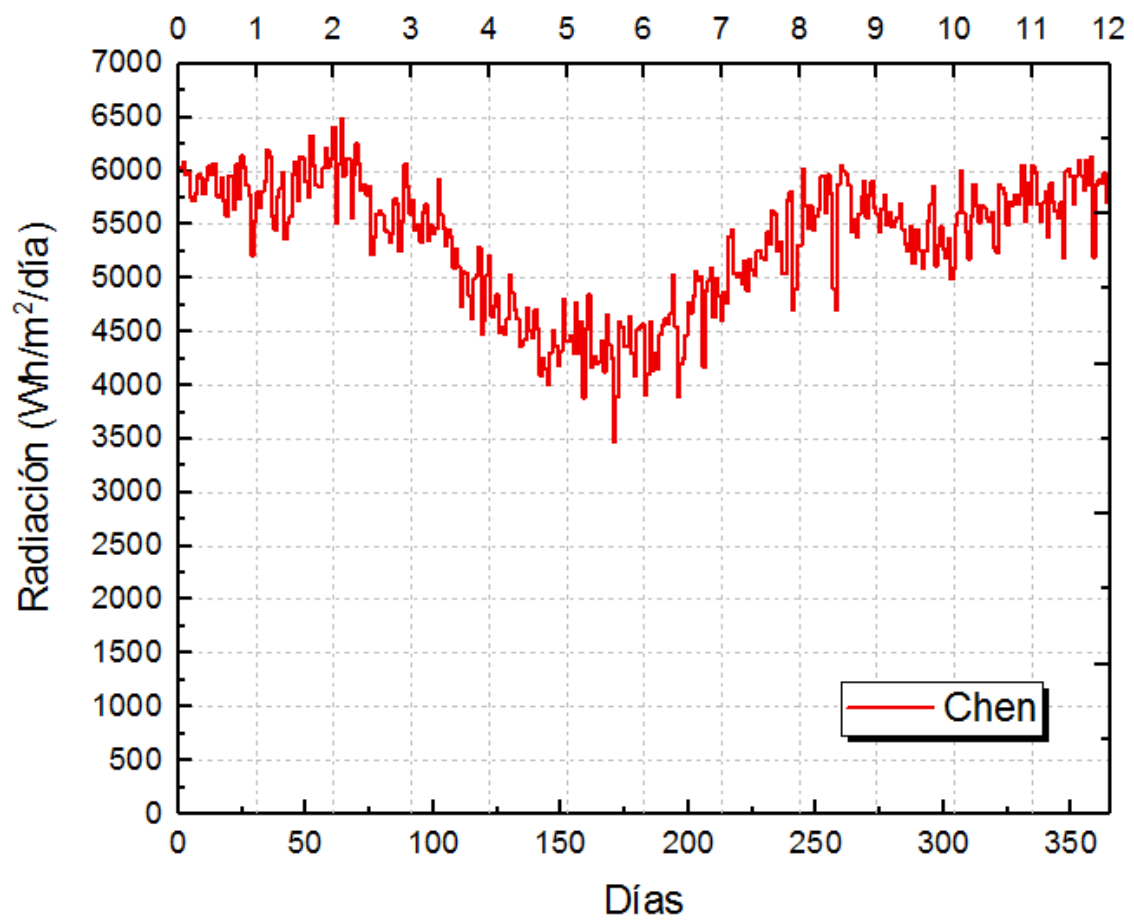


Figura 40: Valores estimados por el modelo de Chen.

Fuente: Elaboración propia

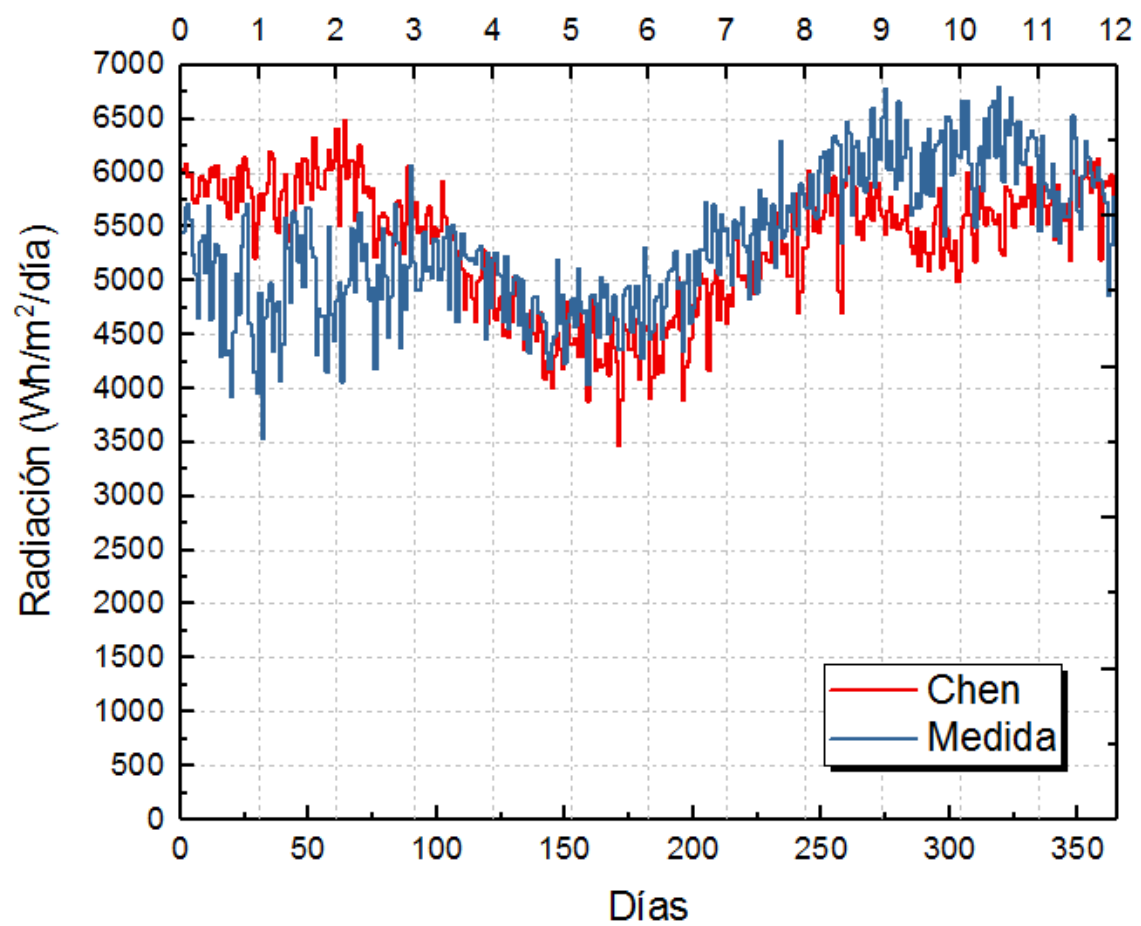


Figura 41: Comparación entre valores estimados y reales según el modelo de Chen.

Fuente: Elaboración propia

Modelo de Ertekin y Yaldiz

En 1999 Ertekin y Yaldiz sugieren un nuevo modelo matemático en que el que la radiación puede ser calculada mediante: (Maza León, 2016)

$$H = -4.46 + 0.477H_0 + 0,226T_{avg}$$

Donde:

T_{avg} : Es la temperatura promedio.

El modelo de Ertekin-Yaldiz tampoco requiere hallar un coeficiente. Desarrollando el modelo obtenemos los valores de estimación mostrados en la Fig. 42 mientras que los valores estadísticos se muestran en la Tabla 11.

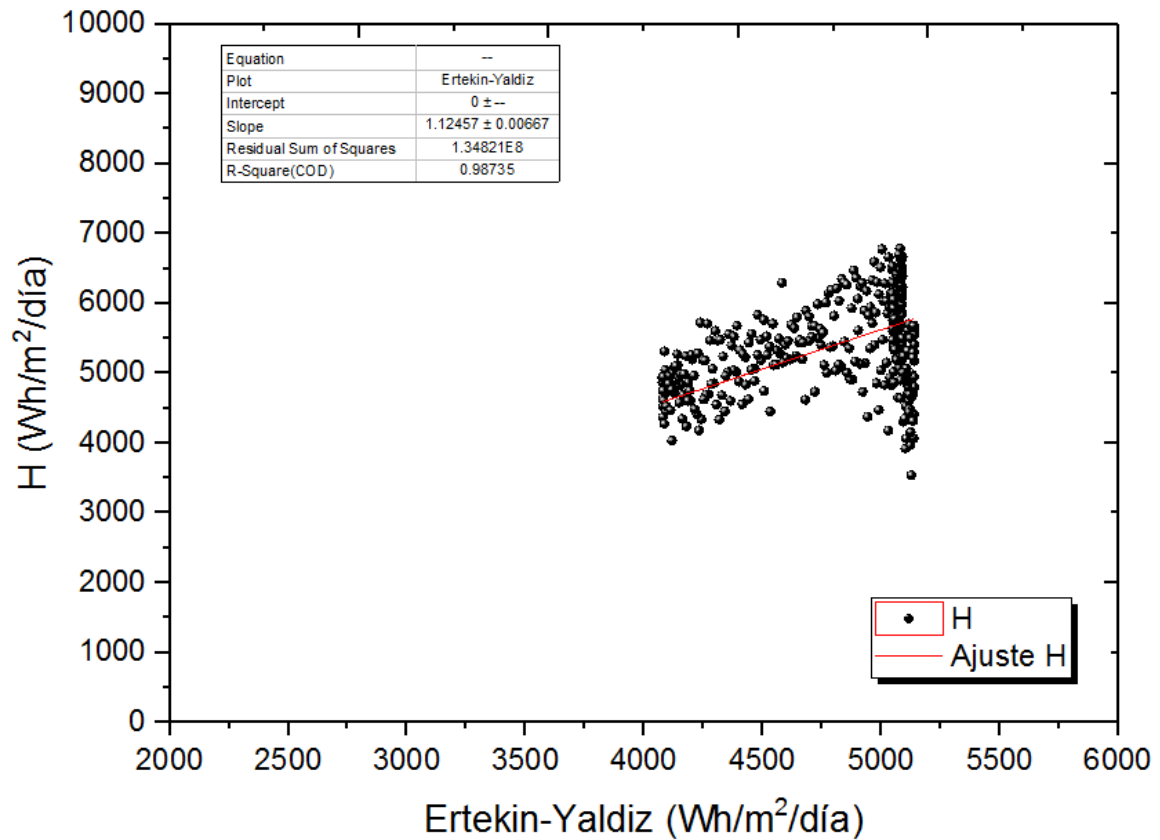


Figura 42: Ajuste del modelo de Ertekin-Yaldiz

Fuente: Elaboración propia

Tabla 11: Parámetros estadísticos para el modelo de Erlekin-Yaldiz

Fuente: Elaboración propia

Parámetro	Valor
Módulo	Ertekin-Yaldiz
Coficiente de Calibración	1.125
Número de Datos Utilizados	365
Coficiente de Determinación R^2	0.98735
RMSE	608.595
RMSE%	11.347%
MBE	-11.610
MBE%	-0.216%

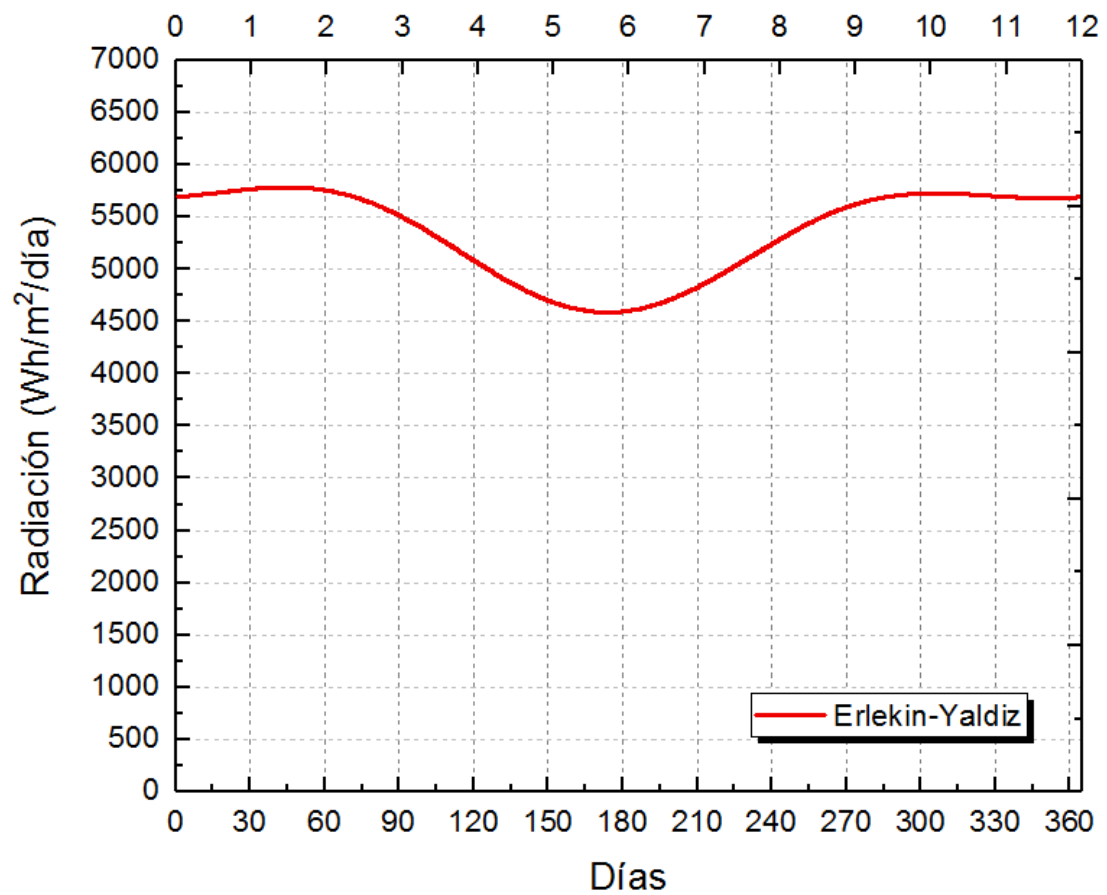


Figura 43: Estimacion del modelo de Erlekin-Yaldiz

Fuente: Elaboración propia

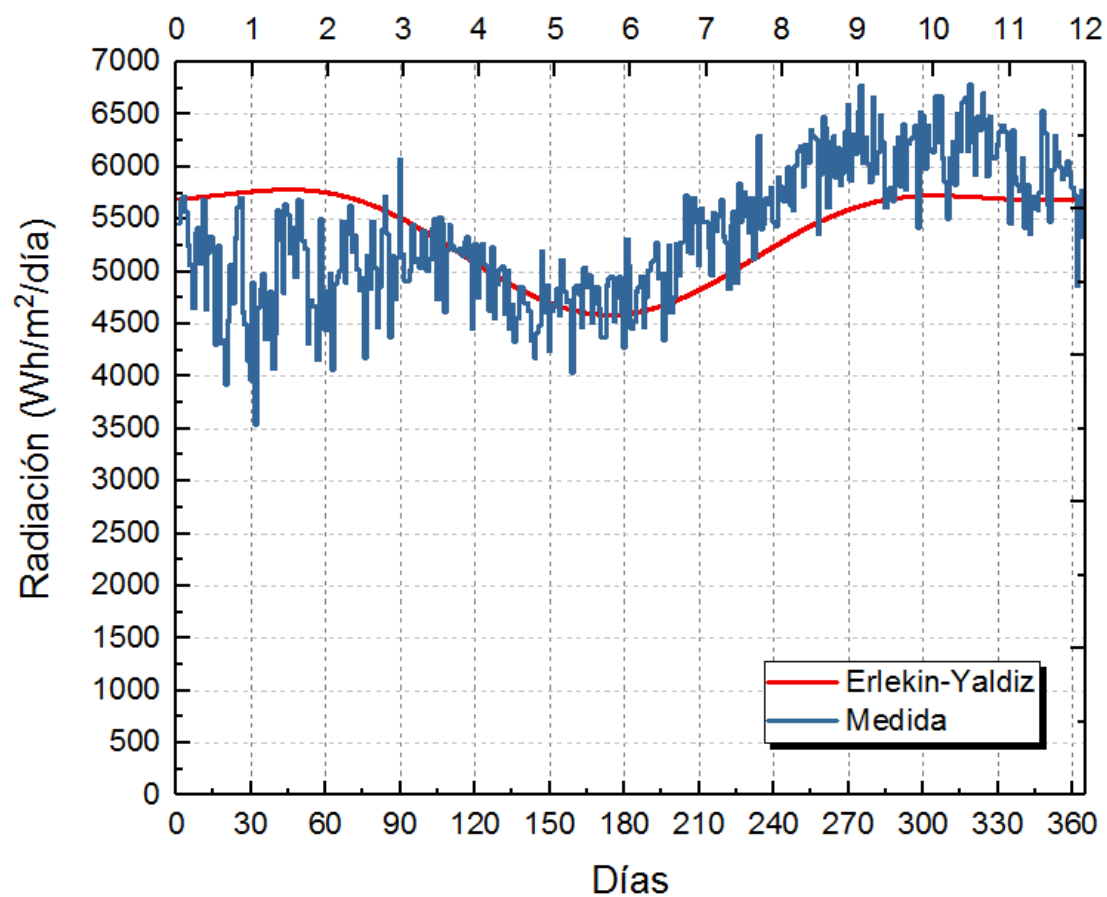


Figura 44: Comparación entre valores estimados y medidos.

Fuente: Elaboración propia

3.1.2 Selección del modelo adecuado

Después de evaluar los modelos anteriores comparándolos con datos in-situ de la estación meteorológica, se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 12: Parámetros estadísticos de los modelos evaluados.

Fuente: Elaboración propia

	Bristow-Campbell	Hargreaves-Samani	Annandale	Chen	Ertekin-Yaldiz
Coeficiente Encontrado	0.9187	0.191	0.191	1.252	1.125
Número de Datos Utilizados	365	365	365	365	365
Coficiente de Determinación R²	0.9822	0.9855	0.9855	0.9841	0.9874
RMSE	668.284	650.872	650.872	681.752	608.595
RMSE%	12.619%	12.119%	12.119%	12.711%	11.347%
MBE	-35.432	-25.633	-25.633	-37.388	-11.610
MBE%	-0.578%	-0.478%	-0.478%	-0.697%	-0.216%

Observando los resultados concluimos que el modelo que estima con mayor precisión la radiación solar diaria en Lambayeque es el modelo de Ertekin-Yaldiz, modificado con un coeficiente de calibración de 1.125.

$$H = 1.125 * (-4.46 + 0.477H_0 + 0,226T_{avg})$$

Donde:

T_{avg} : Es la temperatura promedio.

Procederemos a realizar el diseño del dispositivo con este modelo matemático.

3.2 DISEÑO DEL DISPOSITIVO

El procesamiento de los datos y los sensores será realizado por el Arduino Mega. Para ello se debe desarrollar el código en el entorno de desarrollo de Arduino utilizando el lenguaje Wiring.

3.2.1 Sensores

3.2.1.1 Sensor de Temperatura y Humedad

El sensor de temperatura y humedad será el encargado de proveernos los datos requeridos para estimar y predecir la radiación solar utilizando el modelo matemático.

Para procesar los datos utilizaremos un Arduino Mega. La conexión del sensor de temperatura al Arduino es mostrado en al Fig. 45.

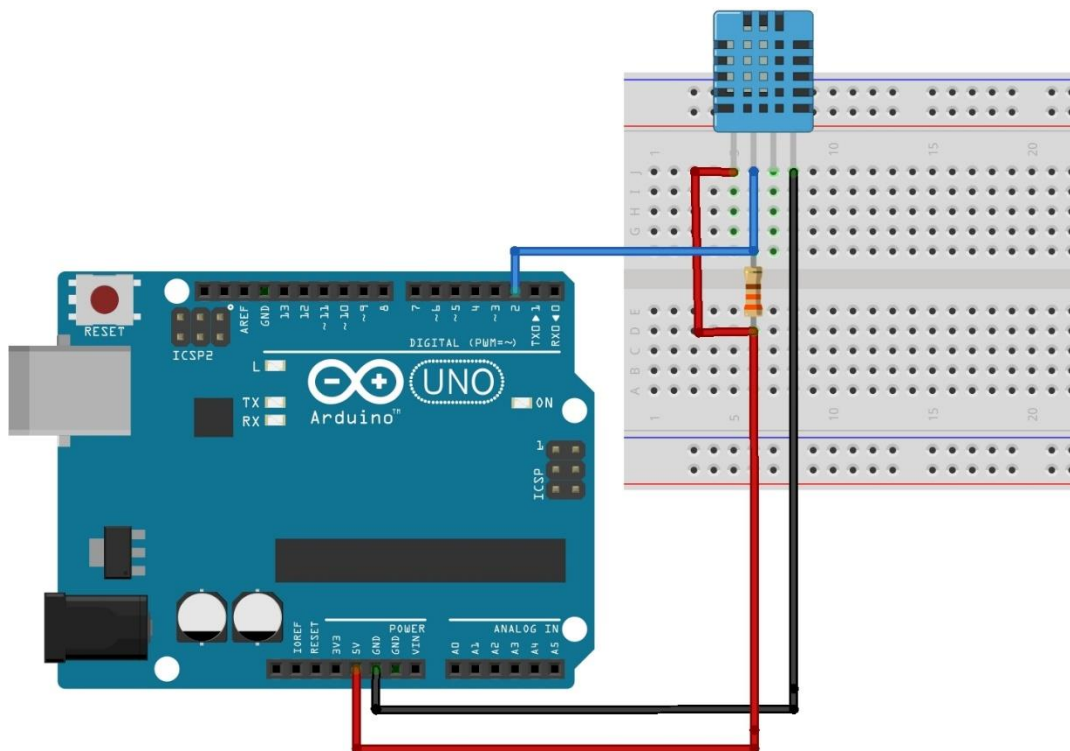


Figura 45: Conexión de temperatura al Arduino

Fuente: Arduino

El procesamiento de datos debe permitir obtener los siguientes valores diarios:

- Temperatura Máxima
- Temperatura Mínima
- Temperatura Promedio

Para esto se realizarán mediciones cada 15 minutos. Los diagramas de flujo de los procesos que se realizarán en Arduino Mega se muestran a continuación y el código general se encuentra en el Anexo 6.

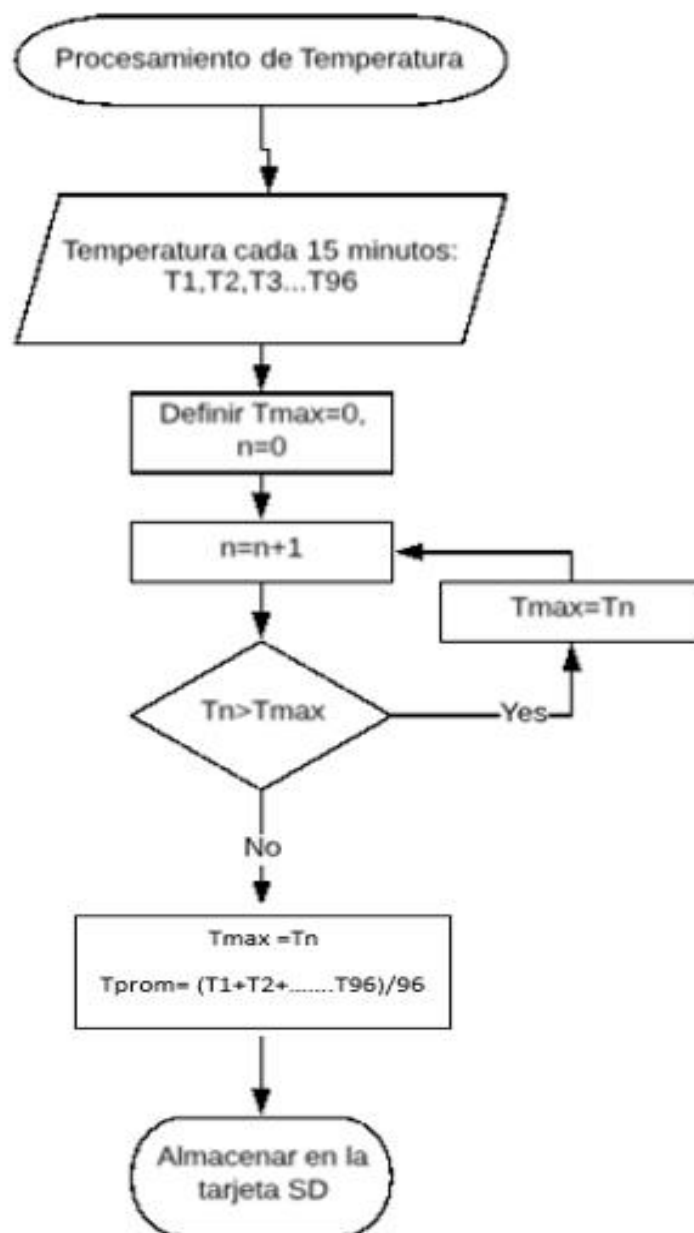


Figura 46: Diagrama de flujo para procesamiento de datos de temperatura.

Fuente: Elaboración propia

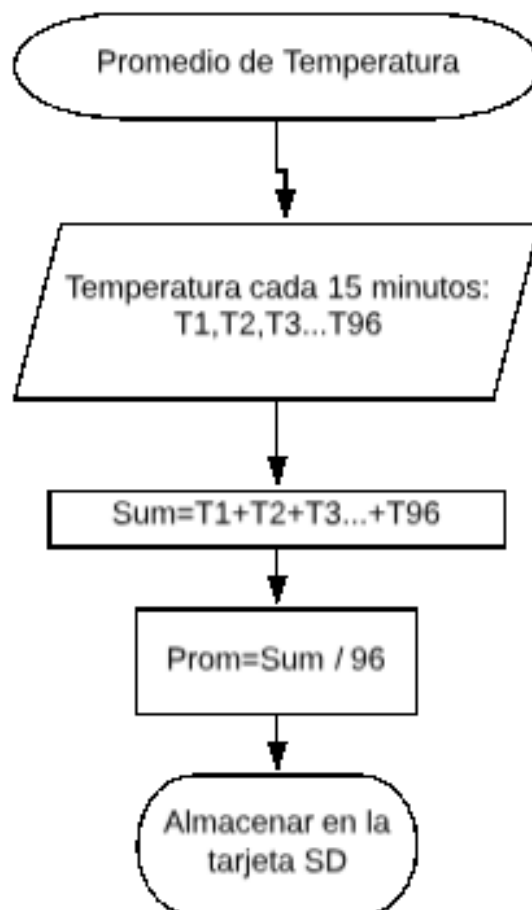


Figura 47: Diagrama de flujo para la obtención de la temperatura promedio.

Fuente: Elaboración propia.

3.2.1.2 Celda Solar

Una celda solar es un dispositivo electrónico que transforma la energía solar en energía eléctrica, la corriente eléctrica que produce es directamente proporcional a la radiación y a si medimos la tensión producida podemos obtener la potencia producida. Con un método de regresión adecuado se puede obtener la radiación solar incidente sobre la celda y la curva horaria de esta.

Para medir la corriente producida por la celda solar utilizaremos un sensor de corriente ACS712. La Fig. 48 muestra una imagen de este sensor y en la Fig. 49 se muestra la conexión con el Arduino.

También se medirá la tensión producida por la celda utilizando un arreglo de voltímetro mostrado en la Fig. 50.

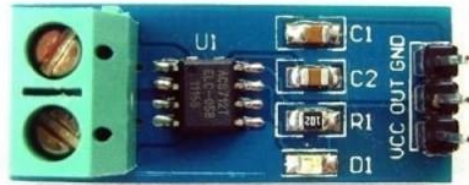


Figura 48: Sensor de corriente ACS712

Fuente: Arduino

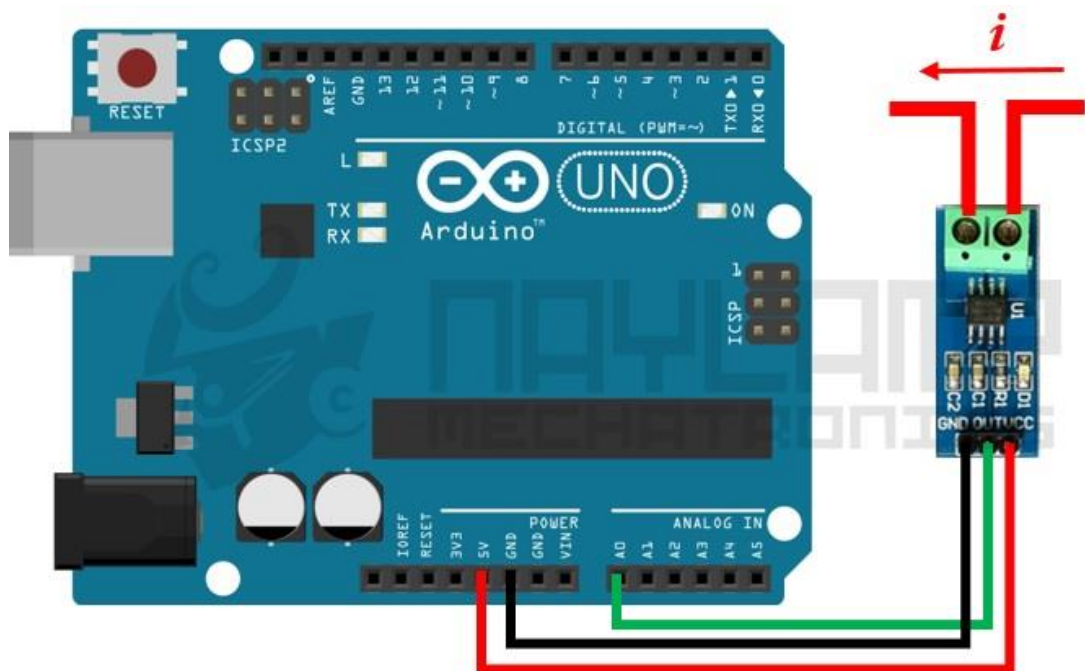


Figura 49: Conexión del sensor de corriente.

Fuente: Arduino

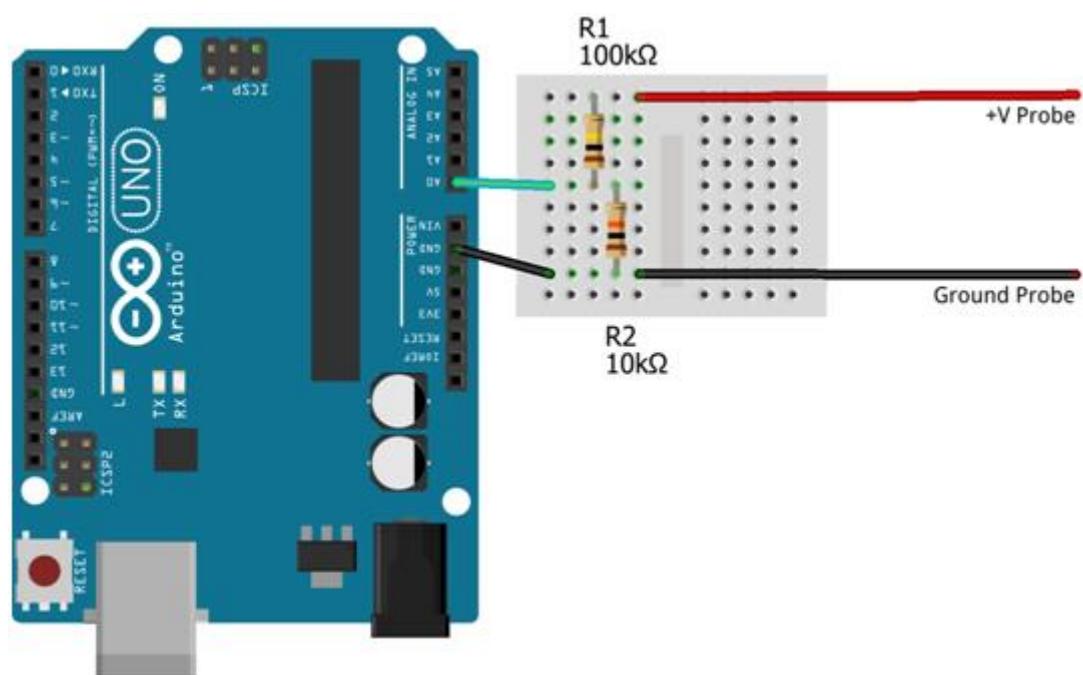
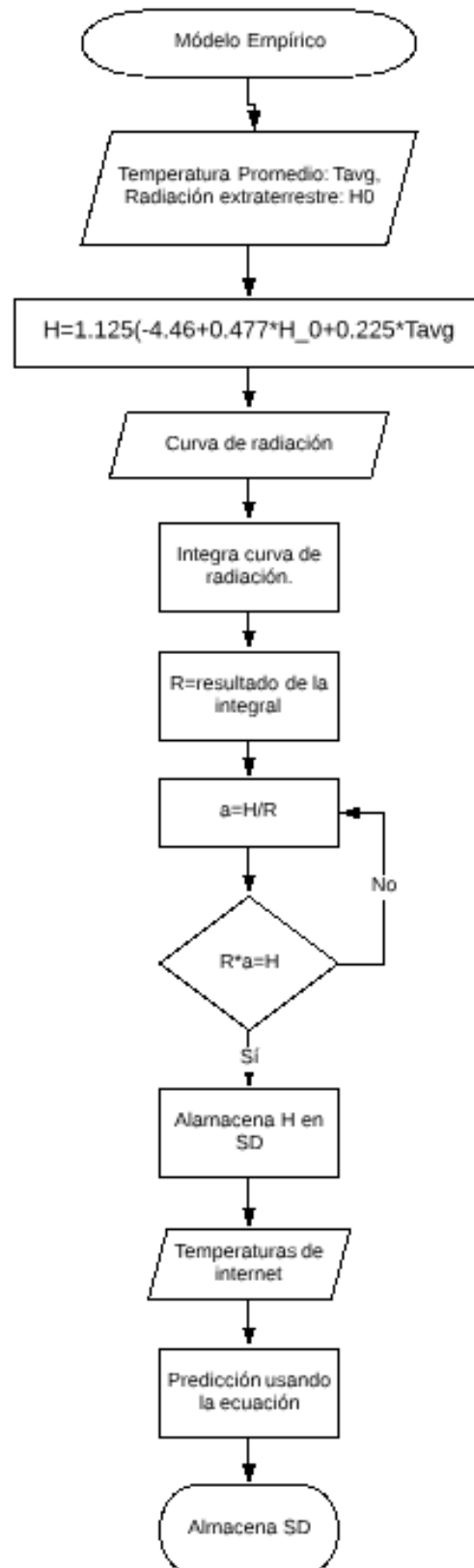


Figura 50: Conexión del voltímetro

Fuente: Elaboración propia

3.2.2 Procesamiento

El procesamiento para la estimación y predicción de radiación utilizando el modelo empírico se muestra en el diagrama de flujo siguiente:



3.2.3 Red Neuronal

Recientemente, algunos investigadores han aplicado las redes neuronales artificiales (RNAs) a máquinas de soporte de vectores y otros métodos híbridos de inteligencia artificial para estimaciones en aplicaciones fotovoltaicas (Mellit et al., 2014). Los modelos basados en RNAs son principalmente clasificados en tres tipos. El primer tipo estima la irradiancia (G) producida usando combinaciones de valores instantáneos de variables meteorológicas (dirección D y velocidad S del viento, humedad relativa H y temperatura del ambiente TA), temperatura de MFV (TM), y potencia eléctrica (P) (Teke et al., 2015). Entonces, esta relación está dada por las entradas matemáticamente expresadas como:

$$G(t) = f(D(t), S(t), H(t), T_A(t), T_M(t))$$

En el segundo tipo de modelos basados en RNAs, llamado series de tiempo, los valores pasados de irradiancia son usados en orden para predecir valores futuros (Teke et al., 2015). Las relaciones entre las entradas y las salidas pueden ser expresadas como:

$$G(t+1) = f(G(t), G(t-1), G(t-2) \dots)$$

Estos tipos de modelos pueden estimar la irradiancia sin la necesidad de parámetros meteorológicos. El tercer tipo de modelos presentan una combinación de los anteriores: predicen mediante los valores de irradiancia pasados y los valores instantáneos de parámetros meteorológicos. Las relaciones de entrada/salida se expresan mediante

$$G(t+1) = f[G(t), G(t-1), G(t-2) \dots, G(t+1), T(t+1), H(t+1), V(t+1), D(t+1), P(t+1) \dots]$$

Los datos meteorológicos pueden ser obtenidos por modelos de predicción numérica o de las observaciones satelitales (Mathiesen y Kleissl, 2011). El método a emplear es consecuente de la aplicación a realizar. Para este estudio se usaron los datos antes utilizados provenientes de la NASA POWER y de SENAMHI. Esta información se procesa para realizar los entrenamientos de las RNAs. Las RNA's son ampliamente aceptadas para predecir resultados a partir de ejemplos. Son capaces de lidiar con problemas no lineales, y una vez hecho el entrenamiento pueden realizar estimaciones a altas velocidades sin requerir nuevos datos estadísticos (Mellit et al., 2013). Las RNAs se desarrollan como generalizaciones de modelos matemáticos que imitan el pensamiento humano, basadas en los siguientes enunciados (Fausett, 1994):

1. El procesamiento de información ocurre en elementos simples llamados neuronas.
2. Las señales son transmitidas entre neuronas a través de conexiones.
3. Cada conexión tiene un peso, que multiplica la señal recibida.

4. Cada neurona aplica una función de activación a la suma de las señales de entrada para determinar la señal de salida

Una RNA es caracterizada por (Fausett, 1994):

1. El patrón de conexión entre las neuronas (arquitectura). Las redes pueden ser de una sola capa o de múltiples capas.
2. El método para determinar los pesos en las conexiones (entrenamiento, aprendizaje o algoritmo). El aprendizaje se divide en: supervisado o no supervisado. El aprendizaje supervisado puede ser por refuerzo o por corrección.
3. La función de activación.

La neurona artificial es la unidad principal de procesamiento. Cada neurona tiene un estado interno, llamado nivel de activación o función de transferencia f , donde se evalúa la sumatoria de las señales de entrada. Típicamente, una neurona envía su activación como una señal a otras neuronas (Espadas, 2002). Considerando una neurona u , que recibe las señales de entradas x_1, x_2 hasta x_n . Los pesos correspondientes son w_1, w_2 , hasta w_n y una bia b . (Alejos Moo, Bassam, Flota - Bañuelos, Outmane, & Cisneros-Villalobos, 2016)

En el presente trabajo se utiliza la siguiente red neuronal artificial para estimar la radiación:

$$G_{SIM} = \sum_{j=1}^O \left[w_{2O} * \left(\frac{2}{1 + e^{-2(\sum_{l=1}^E (w_{1(O,E)} * X_E) + b_{1O})}} - 1 \right) \right] + b_2$$

4 CONCLUSIONES

- Para el estudio se obtuvo: 1) Los datos de temperatura diaria a partir de la base de datos POWER de la NASA y de la estación meteorológica del SENAMHI, en específico se obtuvieron la temperatura máxima, mínima y promedio diaria. 2) Datos de radiación solar de las bases de datos POWER de la NASA, y del National Renewable Energy Laboratories (NREL).
- Se cuantificaron los datos obtenidos separándolos en datos de satélite: POWER de la NASA, NREL, en datos medidos in-situ: Estación meteorológica del SENAMHI, y en predicciones de internet: temperaturas previstas.
- Se adaptaron los siguientes modelos físico-matemáticos empíricos para estimar la radiación solar en Lambayeque: 1) Bristow-Campbell, 2) Hargreaves-Samani, 3) Annandale 4) Chen y 5) Ertekin-Yaldiz, con los siguientes resultados: 1) Para el modelo de Bristow-Campbell se encontró un coeficiente de 0.919, posee un coeficiente de determinación R^2 de 0.9822, un RMSE porcentual de 12.619% y un MBE% de -0.578%. 2) Para el modelo de Hargreaves-Samani se encontró un coeficiente de 0.191, posee un coeficiente de determinación R^2 de 0.9855, un RMSE porcentual de 12.119% y un MBE% de -0.478%. 3) Para el modelo de Annandale se encontró un coeficiente de 0.191, posee un coeficiente de determinación R^2 de 0.9855, un RMSE porcentual de 12.119% y un MBE% de -0.478%. 4) Para el modelo de Chen se encontró un coeficiente de 1.252, posee un coeficiente de determinación R^2 de 0.9841, un RMSE porcentual de 12.711% y un MBE% de -0.697%. 5) Para el modelo de Ertekin-Yaldiz se encontró un coeficiente de 1.125, posee un coeficiente de determinación R^2 de 0.9874, un RMSE porcentual de 11.347% y un MBE% de -0.216%.
- Se determinó el modelo empírico más adecuado para estimar la radiación solar diaria en Lambayeque, concluyéndose que el modelo que mejor estima la radiación en el lugar es el modelo de Ertekin-Yaldiz con un coeficiente de calibración de 1.125 obteniéndose la siguiente ecuación: $H = -5.0175 + 0.536H_0 + 0.293T_{avg}$. Este modelo posee el mayor coeficiente de determinación R^2 de 0.9874 y menor RMSE y MBE porcentual.
- Se realizó el programa para estimar la radiación en Arduino. El programa está compuesto por 3 códigos principales: 1) El primero obtiene los valores de temperaturas máxima, mínima y promedio a partir de datos de temperatura cada 15 minutos provenientes del sensor de

temperatura y humedad, se realizó el diagrama de flujo y el código en Arduino; 2) Se obtienen los valores de corriente y tensión a partir de un sensor de corriente y un voltímetro conectado a la celda solar. 3) Un código permite procesar los datos para estimar la radiación diaria a través del modelo seleccionado.

- Se propuso una red neuronal artificial adecuada que predice la radiación solar diaria en Lambayeque de manera confiable con un rango de 1 a 2 días.
- Se diseñó el dispositivo que pueda estimar y predecir la radiación utilizando los modelos matemáticos y las redes neuronales. Para ello se utiliza un dispositivo basado en Arduino el cual estima la radiación a través del modelo de Ertekin-Yaldiz utilizando como datos de entrada las temperaturas provistas por un sensor de temperatura y humedad, la curva de potencia provista por los sensores de corriente y voltímetro. Una vez obtenidos estos datos se integra la curva de potencia y la energía obtenida es utilizada para hallar un coeficiente de calibración que lo iguale a la energía estimada por el modelo empírico, de esta manera se puede estimar la radiación y la curva diaria con mayor exactitud. Una vez se tiene estimada la radiación se procede a predecir la radiación solar utilizando el modelo empírico y datos de temperatura previstos encontrados en internet. Finalmente se mejora la predicción de la radiación utilizando la red neuronal a través de múltiples entrenamientos.

5 RECOMENDACIONES

- Los autores recomiendan realizar mejoras en la red neuronal a través de numerosos entrenamientos con datos in situ.
- Se recomienda validar el dispositivo en diferentes lugares y por mayor tiempo.
- Construir el dispositivo mencionado y probarlo en un lugar estratégico.

BIBLIOGRAFÍA

- Adrian Jimenez, V., Will, A., & Rodríguez, S. (2017). Estimación de Radiación Solar Horaria Utilizando Modelos Empíricos y Redes Neuronales Artificiales. *Ciencia y Tecnología*, 29-43.
- Alejos Moo, E. de J., Bassam, A., Flota - Bañuelos, M., Outmane, O., & Cisneros-Villalobos, L. (2016). Estimación de irradiancia empleando redes neuronales artificiales con variables meteorológicas y eléctricas de módulos fotovoltaicos. *Ingeniería*, 20(3). Recuperado de <http://www.redalyc.org/resumen.oa?id=46750929003>
- Annandale, J., Jovanovic, N., Benadé, N., & Allen, R. (2002). Software for missing data error analysis of Penman-Monteith reference evapotranspiration. *Irrigation Science*, 21(2), 57-67. <https://doi.org/10.1007/s002710100047>
- Bristow, K. L., Campbell, G. S., & Saxton, K. E. (1985). An equation for separating daily solar irradiation into direct and diffuse components. *Agricultural and Forest Meteorology*, 35(1), 123-131. [https://doi.org/10.1016/0168-1923\(85\)90079-6](https://doi.org/10.1016/0168-1923(85)90079-6)
- Camayo-Lapa, B., Massipe-Hernandez, J., Pamachagua-Paucar, J., Torres-Ten, A., & Quispe-Flores, M. (2015). Desarrollo del modelo Bristow-Campbell para estimar la radiación solar global de la región de Junin, Perú. *Revista Tecnología Química*, 220-234.
- Chen, R., Ersi, K., Yang, J., Lu, S., & Zhao, W. (2004). Validation of five global radiation models with measured daily data in China. *Energy Conversion and Management*, 45(11), 1759-1769. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2003.09.019>
- Cooper, P. I. (1969). The absorption of radiation in solar stills. *Solar Energy*, 12(3), 333-346. [https://doi.org/10.1016/0038-092X\(69\)90047-4](https://doi.org/10.1016/0038-092X(69)90047-4)
- COURSERA, & DTU University. (2016). *Curso Introducción a las Celdas Solares* (Curso Online).
- da Rosa, A. V. (2009). Chapter 12 - Solar Radiation. En *Fundamentals of Renewable Energy Processes (Second Edition)* (pp. 521-568). Boston: Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-374639-9.00012-9>

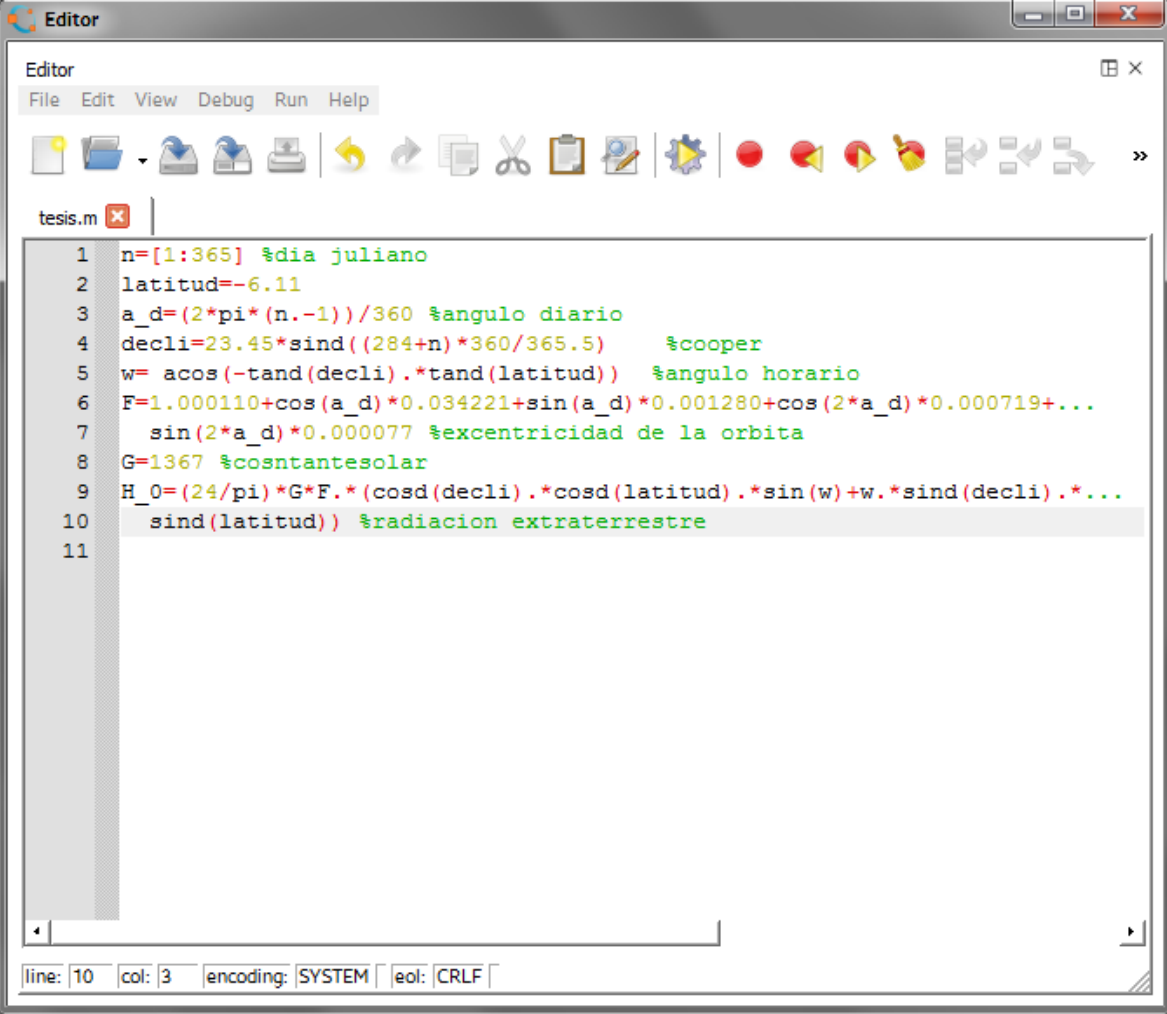
- Da Silva, C., da Silva, V., Alves Junior, J., & de P. Carvalho, H. (2012). Estimation of solar radiation by air temperature models for three regions of Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 281-288.
- Delgado Orellana, G., & Orellana Samaniego, M. (2015). *Estimación de la radiación solar global diaria en El Cantón Cuenca mediante la aplicación del modelo Bristow-Campbell*. Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.
- Gastelo-Roque, J. A., Morales-Acevedo, A., & Tineo Soto, J. (2018). Estimación de la radiación solar y ángulos óptimos de inclinación en Lambayeque(Perú) utilizando el modelo de Hargreaves-Samani. *Ciencia, Tecnología y Humanidades UNPRG*.
- Kaplanis, S., & Kaplani, E. (2007). A model to predict expected mean and stochastic hourly global solar radiation values. *Renewable Energy*, 1414-1425.
- Letcher, T. M. (2018). 1 - Why Solar Energy? En *A Comprehensive Guide to Solar Energy Systems* (pp. 3-16). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811479-7.00001-4>
- Maza León, A. P. (2016). *Estudio comparativo entre modelos de estimación de radiación solar y déficit de presión de vapor en dos gradientes altitudinales*. Universidad de Cuenca, Cuenca, Ecuador.
- NASA. (2018). *Power NASA*. Recuperado de <https://power.larc.nasa.gov/>
- NREL. (s. f.). NSRDB Data Viewer. Recuperado 19 de noviembre de 2018, de <https://maps.nrel.gov/nsrdb-viewer/?aL=UdPEX9%25Bv%255D%3Dt%26f69KzE%25Bv%255D%3Dt%26f69KzE%255Bd%255D%3D1&bL=clight&cE=0&lR=0&mC=4.740675384778373%2C22.8515625&zL=2>
- OLADE. (2017). *Anuario de Estadísticas Energéticas 2017*. Buenos Aires: OLADE.
- Samani, Z. (1985). Estimating Solar Radiation and Evapotranspiration Using Minimum Climatological Data (Hargreaves-Samani equation), 13.
- Sarbu, I., & Sebarchievici, C. (2017). Chapter 2 - Solar Radiation. En *Solar Heating and Cooling Systems* (pp. 13-28). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811662-3.00002-5>

SENAMHI. (2003). *Atlas Solar del Perú*. Lima: SENAMHI.

Spencer, J. W. (1971). Fourier Series Representation of the Position of the Sun. *Fourier Series Representation of the Position of the Sun*, 172.

ANEXOS

1. Código en Lenguaje M para el cálculo de la astronomía solar.



The screenshot shows a MATLAB Editor window titled "Editor" with a menu bar (File, Edit, View, Debug, Run, Help) and a toolbar. The script file is named "tesis.m". The code is as follows:

```
1 n=[1:365] %dia juliano
2 latitud=-6.11
3 a_d=(2*pi*(n.-1))/360 %angulo diario
4 decli=23.45*sind((284+n)*360/365.5) %cooper
5 w= acos(-tand(decli).*tand(latitud)) %angulo horario
6 F=1.000110+cos(a_d)*0.034221+sin(a_d)*0.001280+cos(2*a_d)*0.000719+...
7   sin(2*a_d)*0.000077 %excentricidad de la orbita
8 G=1367 %constantesolar
9 H_0=(24/pi)*G*F.*(cosd(decli).*cosd(latitud).*sin(w)+w.*sind(decli).*...
10  sind(latitud)) %radiacion extraterrestre
11
```

The status bar at the bottom indicates: line: 10, col: 3, encoding: SYSTEM, eol: CRLF.

2. Valores diarios para el ángulo diario

0	0.69813	1.3963	2.0944	2.7925		3.4907	4.1888	4.8869	5.5851	6.2832
0.017453	0.71558	1.4137	2.1118	2.81		3.5081	4.2062	4.9044	5.6025	6.3006
0.034907	0.73304	1.4312	2.1293	2.8274		3.5256	4.2237	4.9218	5.62	6.3181
0.05236	0.75049	1.4486	2.1468	2.8449		3.543	4.2412	4.9393	5.6374	6.3355
0.069813	0.76794	1.4661	2.1642	2.8623		3.5605	4.2586	4.9567	5.6549	6.353
0.087266	0.7854	1.4835	2.1817	2.8798		3.5779	4.2761	4.9742	5.6723	
0.10472	0.80285	1.501	2.1991	2.8972		3.5954	4.2935	4.9916	5.6898	
0.12217	0.8203	1.5184	2.2166	2.9147		3.6128	4.311	5.0091	5.7072	
0.13963	0.83776	1.5359	2.234	2.9322		3.6303	4.3284	5.0265	5.7247	
0.15708	0.85521	1.5533	2.2515	2.9496		3.6477	4.3459	5.044	5.7421	
0.17453	0.87266	1.5708	2.2689	2.9671		3.6652	4.3633	5.0615	5.7596	
0.19199	0.89012	1.5882	2.2864	2.9845		3.6826	4.3808	5.0789	5.777	
0.20944	0.90757	1.6057	2.3038	3.002		3.7001	4.3982	5.0964	5.7945	
0.22689	0.92502	1.6232	2.3213	3.0194		3.7176	4.4157	5.1138	5.8119	
0.24435	0.94248	1.6406	2.3387	3.0369		3.735	4.4331	5.1313	5.8294	
0.2618	0.95993	1.6581	2.3562	3.0543		3.7525	4.4506	5.1487	5.8469	
0.27925	0.97738	1.6755	2.3736	3.0718		3.7699	4.468	5.1662	5.8643	
0.29671	0.99484	1.693	2.3911	3.0892		3.7874	4.4855	5.1836	5.8818	
0.31416	1.0123	1.7104	2.4086	3.1067		3.8048	4.5029	5.2011	5.8992	
0.33161	1.0297	1.7279	2.426	3.1241		3.8223	4.5204	5.2185	5.9167	
0.34907	1.0472	1.7453	2.4435	3.1416		3.8397	4.5379	5.236	5.9341	
0.36652	1.0647	1.7628	2.4609	3.159		3.8572	4.5553	5.2534	5.9516	
0.38397	1.0821	1.7802	2.4784	3.1765		3.8746	4.5728	5.2709	5.969	
0.40143	1.0996	1.7977	2.4958	3.194		3.8921	4.5902	5.2883	5.9865	
0.41888	1.117	1.8151	2.5133	3.2114		3.9095	4.6077	5.3058	6.0039	
0.43633	1.1345	1.8326	2.5307	3.2289		3.927	4.6251	5.3233	6.0214	
0.45379	1.1519	1.85	2.5482	3.2463		3.9444	4.6426	5.3407	6.0388	
0.47124	1.1694	1.8675	2.5656	3.2638		3.9619	4.66	5.3582	6.0563	
0.48869	1.1868	1.885	2.5831	3.2812		3.9794	4.6775	5.3756	6.0737	
0.50615	1.2043	1.9024	2.6005	3.2987		3.9968	4.6949	5.3931	6.0912	
0.5236	1.2217	1.9199	2.618	3.3161		4.0143	4.7124	5.4105	6.1087	
0.54105	1.2392	1.9373	2.6354	3.3336		4.0317	4.7298	5.428	6.1261	
0.55851	1.2566	1.9548	2.6529	3.351		4.0492	4.7473	5.4454	6.1436	
0.57596	1.2741	1.9722	2.6704	3.3685		4.0666	4.7647	5.4629	6.161	
0.59341	1.2915	1.9897	2.6878	3.3859		4.0841	4.7822	5.4803	6.1785	
0.61087	1.309	2.0071	2.7053	3.4034		4.1015	4.7997	5.4978	6.1959	
0.62832	1.3265	2.0246	2.7227	3.4208		4.119	4.8171	5.5152	6.2134	
0.64577	1.3439	2.042	2.7402	3.4383		4.1364	4.8346	5.5327	6.2308	
0.66323	1.3614	2.0595	2.7576	3.4558		4.1539	4.852	5.5501	6.2483	
0.68068	1.3788	2.0769	2.7751	3.4732		4.1713	4.8695	5.5676	6.2657	

3. Valores diarios para el ángulo de inclinación (°)

-23.041	-15.039	-0.20156	14.728	22.963	20.762	9.125	-6.6594	-19.417	-23.35
-22.963	-14.728	0.20156	15.039	23.041	20.572	8.7523	-7.0449	-19.64	-23.309
-22.878	-14.412	0.60461	15.346	23.113	20.375	8.3771	-7.4283	-19.858	-23.262
-22.786	-14.092	1.0075	15.649	23.178	20.173	7.9993	-7.8096	-20.069	-23.207
-22.687	-13.767	1.4101	15.947	23.235	19.964	7.6192	-8.1885	-20.275	
-22.582	-13.439	1.8122	16.24	23.286	19.75	7.2369	-8.565	-20.474	
-22.47	-13.107	2.2139	16.528	23.331	19.529	6.8524	-8.939	-20.668	
-22.352	-12.77	2.6148	16.812	23.368	19.303	6.4658	-9.3103	-20.855	
-22.226	-12.43	3.015	17.09	23.398	19.072	6.0774	-9.6789	-21.036	
-22.095	-12.087	3.4143	17.364	23.421	18.834	5.6872	-10.045	-21.211	
-21.956	-11.74	3.8126	17.632	23.438	18.591	5.2953	-10.407	-21.38	
-21.811	-11.389	4.2098	17.895	23.447	18.343	4.9018	-10.767	-21.543	
-21.66	-11.035	4.6058	18.153	23.45	18.089	4.5069	-11.124	-21.699	
-21.502	-10.677	5.0003	18.406	23.446	17.83	4.1106	-11.477	-21.848	
-21.338	-10.317	5.3934	18.653	23.434	17.565	3.7132	-11.827	-21.991	
-21.168	-9.9535	5.7849	18.894	23.416	17.296	3.3146	-12.173	-22.128	
-20.992	-9.5871	6.1747	19.13	23.391	17.021	2.9151	-12.516	-22.258	
-20.809	-9.2178	6.5627	19.36	23.359	16.741	2.5147	-12.855	-22.382	
-20.62	-8.8457	6.9487	19.585	23.32	16.456	2.1135	-13.19	-22.499	
-20.425	-8.4711	7.3327	19.804	23.274	16.167	1.7117	-13.521	-22.609	
-20.224	-8.094	7.7145	20.017	23.222	15.872	1.3095	-13.849	-22.713	
-20.017	-7.7145	8.094	20.224	23.162	15.573	0.9068	-14.172	-22.81	
-19.804	-7.3327	8.4711	20.425	23.096	15.27	0.50386	-14.491	-22.9	
-19.585	-6.9487	8.8457	20.62	23.022	14.962	0.10078	-14.806	-22.983	
-19.36	-6.5627	9.2178	20.809	22.942	14.649	-0.30233	-15.116	-23.06	
-19.13	-6.1747	9.5871	20.992	22.856	14.332	-0.70536	-15.422	-23.13	
-18.894	-5.7849	9.9535	21.168	22.762	14.011	-1.1082	-15.724	-23.193	
-18.653	-5.3934	10.317	21.338	22.662	13.686	-1.5107	-16.02	-23.249	
-18.406	-5.0003	10.677	21.502	22.555	13.356	-1.9127	-16.312	-23.298	
-18.153	-4.6058	11.035	21.66	22.441	13.023	-2.3142	-16.599	-23.34	
-17.895	-4.2098	11.389	21.811	22.321	12.686	-2.715	-16.882	-23.376	
-17.632	-3.8126	11.74	21.956	22.194	12.345	-3.115	-17.159	-23.404	
-17.364	-3.4143	12.087	22.095	22.061	12	-3.514	-17.431	-23.426	
-17.09	-3.015	12.43	22.226	21.921	11.652	-3.9121	-17.698	-23.441	
-16.812	-2.6148	12.77	22.352	21.774	11.301	-4.3089	-17.96	-23.449	
-16.528	-2.2139	13.107	22.47	21.621	10.946	-4.7045	-18.217	-23.45	
-16.24	-1.8122	13.439	22.582	21.462	10.588	-5.0987	-18.468	-23.443	
-15.947	-1.4101	13.767	22.687	21.296	10.226	-5.4914	-18.714	-23.43	
-15.649	-1.0075	14.092	22.786	21.125	9.8622	-5.8825	-18.954	-23.411	
-15.346	-0.60461	14.412	22.878	20.946	9.495	-6.2719	-19.188	-23.384	

4. Ángulo Horario

1.6163	1.5996	1.5712	1.5427	1.5254	1.5302	1.5536	1.5833	1.6085	1.617
1.6162	1.5989	1.5704	1.542	1.5253	1.5306	1.5543	1.584	1.609	1.6169
1.616	1.5983	1.5697	1.5414	1.5251	1.531	1.555	1.5848	1.6095	1.6168
1.6158	1.5977	1.5689	1.5408	1.5249	1.5315	1.5558	1.5855	1.6099	1.6167
1.6156	1.597	1.5682	1.5402	1.5248	1.5319	1.5565	1.5862	1.6104	1.6166
1.6153	1.5964	1.5674	1.5396	1.5247	1.5324	1.5572	1.5869	1.6108	
1.6151	1.5957	1.5667	1.539	1.5246	1.5328	1.5579	1.5876	1.6112	
1.6148	1.5951	1.5659	1.5384	1.5245	1.5333	1.5587	1.5883	1.6116	
1.6146	1.5944	1.5652	1.5379	1.5245	1.5338	1.5594	1.5891	1.612	
1.6143	1.5937	1.5644	1.5373	1.5244	1.5343	1.5601	1.5898	1.6124	
1.614	1.593	1.5637	1.5368	1.5244	1.5348	1.5609	1.5905	1.6127	
1.6136	1.5924	1.5629	1.5362	1.5244	1.5353	1.5616	1.5912	1.6131	
1.6133	1.5917	1.5622	1.5357	1.5243	1.5358	1.5624	1.5918	1.6134	
1.613	1.591	1.5614	1.5352	1.5244	1.5364	1.5631	1.5925	1.6137	
1.6126	1.5903	1.5607	1.5347	1.5244	1.5369	1.5638	1.5932	1.614	
1.6123	1.5896	1.56	1.5342	1.5244	1.5375	1.5646	1.5939	1.6143	
1.6119	1.5889	1.5592	1.5337	1.5245	1.538	1.5653	1.5946	1.6146	
1.6115	1.5882	1.5585	1.5332	1.5245	1.5386	1.5661	1.5952	1.6149	
1.6111	1.5875	1.5577	1.5327	1.5246	1.5392	1.5668	1.5959	1.6151	
1.6107	1.5867	1.557	1.5322	1.5247	1.5398	1.5676	1.5965	1.6154	
1.6102	1.586	1.5563	1.5318	1.5249	1.5404	1.5683	1.5972	1.6156	
1.6098	1.5853	1.5556	1.5314	1.525	1.541	1.5691	1.5978	1.6158	
1.6094	1.5846	1.5549	1.5309	1.5251	1.5416	1.5699	1.5985	1.616	
1.6089	1.5838	1.5541	1.5305	1.5253	1.5422	1.5706	1.5991	1.6162	
1.6084	1.5831	1.5534	1.5301	1.5255	1.5428	1.5714	1.5997	1.6164	
1.6079	1.5824	1.5527	1.5297	1.5257	1.5434	1.5721	1.6003	1.6165	
1.6074	1.5816	1.552	1.5293	1.5259	1.5441	1.5729	1.6009	1.6167	
1.6069	1.5809	1.5513	1.529	1.5261	1.5447	1.5736	1.6015	1.6168	
1.6064	1.5802	1.5506	1.5286	1.5263	1.5454	1.5744	1.6021	1.6169	
1.6059	1.5794	1.5499	1.5283	1.5266	1.546	1.5751	1.6027	1.617	
1.6054	1.5787	1.5492	1.5279	1.5268	1.5467	1.5759	1.6033	1.6171	
1.6048	1.5779	1.5485	1.5276	1.5271	1.5474	1.5766	1.6039	1.6171	
1.6043	1.5772	1.5479	1.5273	1.5274	1.548	1.5774	1.6044	1.6172	
1.6037	1.5764	1.5472	1.527	1.5277	1.5487	1.5781	1.605	1.6172	
1.6031	1.5757	1.5465	1.5268	1.528	1.5494	1.5789	1.6055	1.6172	
1.6026	1.5749	1.5459	1.5265	1.5284	1.5501	1.5796	1.606	1.6172	
1.602	1.5742	1.5452	1.5263	1.5287	1.5508	1.5803	1.6066	1.6172	
1.6014	1.5734	1.5446	1.526	1.5291	1.5515	1.5811	1.6071	1.6172	
1.6008	1.5727	1.5439	1.5258	1.5294	1.5522	1.5818	1.6076	1.6172	
1.6002	1.5719	1.5433	1.5256	1.5298	1.5529	1.5826	1.6081	1.6171	

5. Corrección por excentricidad de la órbita

1.0351	1.0273	1.0067	0.98368	0.96889	0.96812	0.9816	1.0041	1.0256	1.0351
1.0351	1.027	1.0061	0.98318	0.96869	0.96829	0.98208	1.0047	1.026	1.0351
1.0351	1.0265	1.0055	0.98268	0.9685	0.96847	0.98258	1.0053	1.0264	1.0351
1.0351	1.0261	1.0049	0.98218	0.96831	0.96866	0.98307	1.0059	1.0268	1.0351
1.0351	1.0257	1.0043	0.98169	0.96814	0.96887	0.98358	1.0065	1.0272	1.0351
1.035	1.0253	1.0037	0.98121	0.96797	0.96908	0.98408	1.0071	1.0276	
1.035	1.0249	1.0031	0.98074	0.96781	0.96929	0.9846	1.0077	1.028	
1.0349	1.0244	1.0025	0.98027	0.96767	0.96952	0.98512	1.0083	1.0283	
1.0349	1.024	1.0019	0.9798	0.96753	0.96976	0.98564	1.0088	1.0287	
1.0348	1.0235	1.0013	0.97934	0.9674	0.97001	0.98617	1.0094	1.0291	
1.0347	1.023	1.0007	0.97889	0.96728	0.97026	0.9867	1.01	1.0294	
1.0346	1.0226	1.0001	0.97845	0.96717	0.97052	0.98724	1.0106	1.0297	
1.0345	1.0221	0.99947	0.97801	0.96707	0.9708	0.98778	1.0112	1.0301	
1.0344	1.0216	0.99887	0.97758	0.96698	0.97108	0.98833	1.0117	1.0304	
1.0343	1.0211	0.99828	0.97716	0.9669	0.97136	0.98888	1.0123	1.0307	
1.0342	1.0206	0.99768	0.97674	0.96683	0.97166	0.98943	1.0129	1.031	
1.034	1.0201	0.99709	0.97633	0.96676	0.97197	0.98999	1.0135	1.0313	
1.0338	1.0196	0.99649	0.97593	0.96671	0.97228	0.99055	1.014	1.0316	
1.0337	1.0191	0.9959	0.97553	0.96667	0.9726	0.99112	1.0146	1.0318	
1.0335	1.0186	0.99531	0.97515	0.96663	0.97293	0.99169	1.0151	1.0321	
1.0333	1.018	0.99473	0.97477	0.96661	0.97327	0.99226	1.0157	1.0323	
1.0331	1.0175	0.99414	0.97439	0.96659	0.97362	0.99283	1.0162	1.0326	
1.0329	1.017	0.99356	0.97403	0.96659	0.97397	0.99341	1.0168	1.0328	
1.0327	1.0164	0.99298	0.97367	0.96659	0.97434	0.99399	1.0173	1.033	
1.0324	1.0159	0.9924	0.97333	0.96661	0.97471	0.99457	1.0178	1.0332	
1.0322	1.0153	0.99183	0.97299	0.96663	0.97508	0.99516	1.0184	1.0334	
1.0319	1.0148	0.99126	0.97265	0.96666	0.97547	0.99574	1.0189	1.0336	
1.0317	1.0142	0.99069	0.97233	0.9667	0.97586	0.99633	1.0194	1.0338	
1.0314	1.0137	0.99013	0.97201	0.96676	0.97626	0.99692	1.0199	1.0339	
1.0311	1.0131	0.98957	0.97171	0.96682	0.97667	0.99752	1.0204	1.0341	
1.0308	1.0125	0.98901	0.97141	0.96689	0.97708	0.99811	1.0209	1.0342	
1.0305	1.0119	0.98846	0.97112	0.96697	0.97751	0.99871	1.0214	1.0344	
1.0302	1.0114	0.98791	0.97083	0.96706	0.97793	0.9993	1.0219	1.0345	
1.0299	1.0108	0.98736	0.97056	0.96716	0.97837	0.9999	1.0224	1.0346	
1.0295	1.0102	0.98682	0.9703	0.96727	0.97881	1.0005	1.0229	1.0347	
1.0292	1.0096	0.98629	0.97004	0.96738	0.97926	1.0011	1.0233	1.0348	
1.0288	1.009	0.98576	0.96979	0.96751	0.97971	1.0017	1.0238	1.0349	
1.0285	1.0084	0.98523	0.96955	0.96765	0.98018	1.0023	1.0242	1.0349	
1.0281	1.0079	0.98471	0.96932	0.9678	0.98064	1.0029	1.0247	1.035	
1.0277	1.0073	0.98419	0.9691	0.96795	0.98112	1.0035	1.0251	1.035	

6. Código para la obtención de temperaturas.

```
#include <SD.h> // Librería SD

#include <SPI.h> // Library SPI Interfaz

#include <DHT.h>

#include <DHT_U.h> // Libraries Temperature Sensor


#define SSpin 53 // Se define el pin SS para la conexión SPI con SD.

File archivo; // Se crea el objeto archivo.


int pinPotenciometro = A0; // Pin para potenciómetro (Cualquier pin analógico).

float Potenciometro; //Valor en V.

int pinLed = 45; // Cualquier pin digital


float tMax=0; // Valor inicial de t

float tPromedio; // Variable a imprimir.

int contador=0; // Se utiliza para calcular promedio.

float sumaT=0; // Variable para la suma de T.


int pinSensorT = 49; // Pin digital para sensor de T y H.

float Temperatura; // almacenar temperatura
```

```
float Humedad; //Variables de Temperatura y Humedad.
```

```
DHT sensorTH (pinSensorT, DHT11); // Se crea el objeto sensorTH (sensor de temperatura y humedad)
```

```
float horaActualM = 0; // Se escribe la hora actual en minutos.
```

```
float horaMedicionM; // Hora de medición en minutos.
```

```
float horaMedicionH; // Hora de medición en horas.
```

```
float hora;
```

```
void setup() {
```

```
    // put your setup code here, to run once:
```

```
    pinMode(pinSensorT, INPUT);
```

```
    pinMode(pinLed, OUTPUT);
```

```
    Serial.begin (9600); // Se inicia el monitor serial, mediante este comando se inicia la TX por el puerto serial desde el arduino hacia el monitor serial de arduino(9600 es la velocidad de TX)
```

```
    sensorTH.begin(); // Se inicializa el sensor.
```

```
    Serial.println ("Iniciando tarjeta ...");
```

```
    if (!SD.begin(SSpin)){
```

```
        Serial.println ("Fallo en inicialización !");
```

```
        return;
```

```
    }
```

```
    Serial.println("Iniciación correcta");
```

```

archivo = SD.open ("datos.txt", FILE_WRITE);

}

void loop() {

    // put your main code here, to run repeatedly:

    Potenciometro = analogRead(pinPotenciometro); // Se almacena voltaje de Potenciómetro.

    if (Potenciometro <1023){

        if (SD.begin(SSpin)){

            if (archivo){

                digitalWrite(pinLed, HIGH); //Encender led si está almacenando datos.

                Temperatura = sensorTH.readTemperature();

                Humedad=sensorTH.readHumidity();

                horaMedicionM = (millis()/60000)+horaActualM;

                horaMedicionH = horaMedicionM /60;

                if(Temperatura>tMax)

                {

                    tMax=Temperatura;

                }

            }

        }

        if (horaMedicionH<24){

```

```

sumaT=sumaT+Temperatura;

contador = contador +1;

tPromedio = sumaT/contador;


archivo.print ("Día 1"); // archivo de texto almacenamiento

archivo.print(",");

archivo.print (horaMedicionH);

archivo.print(",");

archivo.print(Temperatura);

archivo.print(",");

archivo.print(Humedad);

archivo.print(",");

archivo.print(tMax);

archivo.print(",");

archivo.println(tPromedio);


Serial.print ("Día 1");

Serial.print(",");

Serial.print (horaMedicionH);

Serial.print(",");

Serial.print(Temperatura);

Serial.print(",");

Serial.print(Humedad);

```



```

Serial.print(",");

Serial.print(tMax);

Serial.print(",");

Serial.print(tPromedio);

Serial.print(",");

Serial.println(Potenciometro);

delay(900000);

}

if ((horaMedicionH>24) && (horaMedicionH<48)){

    hora = horaMedicionH -24;

    if (contador == 24){

        sumaT=0;

        contador=0;

    }

    sumaT=sumaT+Temperatura;

    contador = contador +1;

    tPromedio = sumaT/contador;

    archivo.print ("Día 2"); // archivo de texto almacenamiento

    archivo.print(",");

    archivo.print (hora);

```

```

archivo.print(",");

archivo.print(Temperatura);

archivo.print(",");

archivo.print(Humedad);

archivo.print(",");

archivo.print(tMax);

archivo.print(",");

archivo.println(tPromedio);


Serial.print ("Día 2");

Serial.print(",");

Serial.print (hora);

Serial.print(",");

Serial.print(Temperatura);

Serial.print(",");

Serial.print(Humedad);

Serial.print(",");

Serial.print(tMax);

Serial.print(",");

Serial.println(tPromedio);

delay(900000); // medición de 15 minutos

}

if ((horaMedicionH>48) && (horaMedicionH<72)){

```

```
hora = horaMedicionH -48;

if (contador == 24){

    sumaT=0;

    contador=0;

}

sumaT=sumaT+Temperatura;

contador = contador +1;

tPromedio = sumaT/contador;

archivo.print ("Día 3");

archivo.print(",");

archivo.print (hora);

archivo.print(",");

archivo.print(Temperatura);

archivo.print(",");

archivo.print(Humedad);

archivo.print(",");

archivo.print(tMax);

archivo.print(",");

archivo.println(tPromedio);
```

```

Serial.print ("Día 3");

Serial.print(",");

Serial.print (hora);

Serial.print(",");

Serial.print(Temperatura);

Serial.print(",");

Serial.print(Humedad);

Serial.print(",");

Serial.print(tMax);

Serial.print(",");

Serial.println(tPromedio);

delay(900000);

}

if ((horaMedicionH>72) && (horaMedicionH<96)){

    hora = horaMedicionH -72;

    if (contador == 24){

        sumaT=0;

        contador=0;

    }

    sumaT=sumaT+Temperatura;

    contador = contador +1;

```

```
tPromedio = sumaT/contador;
```

```
archivo.print ("Día 4");
```

```
archivo.print(",");
```

```
archivo.print (hora);
```

```
archivo.print(",");
```

```
archivo.print(Temperatura);
```

```
archivo.print(",");
```

```
archivo.print(Humedad);
```

```
archivo.print(",");
```

```
archivo.print(tMax);
```

```
archivo.print(",");
```

```
archivo.println(tPromedio);
```

```
Serial.print ("Día 4");
```

```
Serial.print(",");
```

```
Serial.print (hora);
```

```
Serial.print(",");
```

```
Serial.print(Temperatura);
```

```
Serial.print(",");
```

```
Serial.print(Humedad);
```

```
Serial.print(",");
```

```
Serial.print(tMax);
```

```

Serial.print(",");

Serial.println(tPromedio);

delay(900000);

}

if ((horaMedicionH>96) && (horaMedicionH<120)){

    hora = horaMedicionH -96;

    if (contador == 24){

        sumaT=0;

        contador=0;

    }

    sumaT=sumaT+Temperatura;

    contador = contador +1;

    tPromedio = sumaT/contador;


    archivo.print ("Día 5");

    archivo.print(",");

    archivo.print (hora);

    archivo.print(",");

    archivo.print(Temperatura);

    archivo.print(",");

    archivo.print(Humedad);

    archivo.print(",");

```

```

    archivo.print(tMax);

    archivo.print(",");

    archivo.println(tPromedio);


    Serial.print ("Día 5");

    Serial.print(",");

    Serial.print (hora);

    Serial.print(",");

    Serial.print(Temperatura);

    Serial.print(",");

    Serial.print(Humedad);

    Serial.print(",");

    Serial.print(tMax);

    Serial.print(",");

    Serial.println(tPromedio);

    delay(900000);

}

}

}

}

if (Potenciometro==1023){

    archivo.close();

    digitalWrite(pinLed, LOW);

```

```
Serial.println (Potenciometro);
```

```
delay (10000);
```

```
}
```

```
}
```


7. Código para la medición de corriente y voltaje en la celda solar

//Código que lea la corriente de un amperímetro y la tensión de un voltímetro (ambos de una celda) cada 15 minutos , los almacene y realice una curva de potencia ($I \cdot A$) al final del día

// Código que lea I y V de un voltímetro, los almacene y guarde

//cada 15 min, y que se muestre una curva de potencia al final del día.

#include <SD.h> // Librería SD (memoria)

#include <SPI.h> // Library SPI (comunicacion entre arduino y memoria)

#define SSpin 53 // Se define el pin SS para la conexión SPI con SD. (si esta en “1” hay comunicación)

File archivo; // Se crea el objeto archivo. (almacenar datos)

int pinVoltaje = A0; // Pin para voltaje de entrada (Cualquier pin analógico)-(Voltaje en la celda)

float Voltaje; //Valor en V(Variable Almacenar lectura de Voltaje)

int pinPotenciometro = A1; // Pin para potenciómetro (Cualquier pin analógico).

float Potenciometro; //Valor en V.

int pinLed = 45; // Cualquier pin digital

int pinIntensidad = A2; // Pin para sensor de corriente por efecto hall (lectura del sensor)

float sensibilidad = 0.185 // 0.185 para el de 5A.

float voltajeSensorI; // Almacenar corriente del sensor

float Intensidad;

```

float Potencia; // Potencia a graficar.

float horaActualM = 0; // Se escribe la hora actual en minutos.

float horaMedicionM; // Hora de medición en minutos.

float horaMedicionH; // Hora de medición en horas.

float hora;

void setup() {

    // put your setup code here, to run once:

    Serial.begin (9600); // Se inicia el monitor serial.

    Serial.println ("Iniciando tarjeta ...");

    if (!SD.begin(SSpin)){ // Prueba

        Serial.println ("Fallo en inicialización !");

        return;

    }

    Serial.println("Inicialización correcta");

    archivo = SD.open ("datos.txt", FILE_WRITE);

}

void loop() {

    // put your main code here, to run repeatedly:

    Potenciometro = analogRead(pinPotenciometro); // Se almacena voltaje de Potenciometro.

```

```

if (Potenciometro <1023){

  if (SD.begin(SSpin)){ // pregunta si hay comunicacion entre la memoria SD y el arduino

    if (archivo){ // archivo SD esta listo para recibir datos.

      digitalWrite(pinLed, HIGH); //Encender led si está almacenando datos.

      Voltaje = analogRead(A0)*10/1023; // covertir valor de voltaje

      voltajeSensorI=analogRead(pinIntensidad)* (5.0/1023.0); // Lectura del sensor.

      Intensidad = (voltajeSensorI - 2.5)/sensibilidad; Ecuación para obtener la corriente.


      horaMedicionM = (millis()/60000)+horaActualM; // contar el tiempo que transcurre desde que
      se inicio el programa.

      horaMedicionH = horaMedicionM /60; // convertir a horas


      if (horaMedicionH<24){

        archivo.print ("Día 1"); //almacenar archive de texto.

        archivo.print(",");

        archivo.print (Voltaje);

        archivo.print(",");

        archivo.print(Intensidad);

        archivo.print(",");

        archivo.println(Potencia);


        Serial.print ("Día 1");

        Serial.print(",");

```

```

Serial.print (Voltaje);

Serial.print(",");

Serial.print(Intensidad);

Serial.print(",");

Serial.println(Potencia);

delay(900000);

}

if ((horaMedicionH>24) && (horaMedicionH<48)){

    hora = horaMedicionH -24;

    archivo.print ("Día 2");

    archivo.print(",");

    archivo.print (Voltaje);

    archivo.print(",");

    archivo.print(Intensidad);

    archivo.print(",");

    archivo.println(Potencia);

    Serial.print ("Día 2");

    Serial.print(",");

    Serial.print (Voltaje);

    Serial.print(",");

```

```

Serial.print(Intensidad);

Serial.print(",");

Serial.println(Potencia);

delay(900000);

}

if ((horaMedicionH>48) && (horaMedicionH<72)){

    hora = horaMedicionH -48;

    archivo.print ("Día 3");

    archivo.print(",");

    archivo.print (Voltaje);

    archivo.print(",");

    archivo.print(Intensidad);

    archivo.print(",");

    archivo.println(Potencia);

    Serial.print ("Día 3");

    Serial.print(",");

    Serial.print (Voltaje);

    Serial.print(",");

    Serial.print(Intensidad);

    Serial.print(",");

```

```

    Serial.println(Potencia);

    delay(900000);

}

if ((horaMedicionH>72) && (horaMedicionH<96)){

    hora = horaMedicionH -72;

    archivo.print ("Día 4");

    archivo.print(",");

    archivo.print (Voltaje);

    archivo.print(",");

    archivo.print(Intensidad);

    archivo.print(",");

    archivo.println(Potencia);


    Serial.print ("Día 4");

    Serial.print(",");

    Serial.print (Voltaje);

    Serial.print(",");

    Serial.print(Intensidad);

    Serial.print(",");

    Serial.println(Potencia);

    delay(900000);

}

if ((horaMedicionH>96) && (horaMedicionH<120)){

```

```

    hora = horaMedicionH -96;

    archivo.print ("Día 5");

    archivo.print(",");

    archivo.print (Voltaje);

    archivo.print(",");

    archivo.print(Intensidad);

    archivo.print(",");

    archivo.println(Potencia);


    Serial.print ("Día 5");

    Serial.print(",");

    Serial.print (Voltaje);

    Serial.print(",");

    Serial.print(Intensidad);

    Serial.print(",");

    Serial.println(Potencia);

    delay(900000);

}

}

}

}

if (Potenciometro==1023){

```

```
archivo.close();  
  
digitalWrite(pinLed, LOW);  
  
Serial.println (Potenciometro);  
  
delay (900000);  
  
}  
  
}
```


8.Código para la estimación y predicción mediante modelo empírico.

```
#include <SD.h> // Librería SD
```

```
#include <SPI.h> // Library SPI
```

```
#include <DHT.h>
```

```
#include <DHT_U.h> // Libraries Temperature Sensor
```

```
#define SSpin 53 // Se define el pin SS para la conexión SPI con SD.
```

```
File archivo; // Se crea el objeto archivo.
```

```
int pinPotenciometro = A0; // Pin para potenciómetro (Cualquier pin analógico).
```

```
float Potenciometro; //Valor en V.
```

```
int pinLed = 45; // Cualquier pin digital
```

```
float tMin1=50;
```

```
float tMin2=50;
```

```
float tMin3=50;
```

```
float tMin4=50;
```

```
float tMin5=50;
```

```
float tMin6=50;
```

```
float tMax1=0;
```

```
float tMax2=0;
```

```
float tMax3=0;
```

```
float tMax4=0;

float tMax5=0;

float tMax6=0;

float tMin;

float tMax;

float sumaT1=0;

float sumaT2=0;

float sumaT3=0;

float sumaT4=0;

float sumaT5=0;

float sumaT6=0;

float contador1;

float contador2;

float contador3;

float contador4;

float contador5;

float contador6;

float H01; //Ingresar valor.

float H02; //Ingresar valor.

float H03; //Ingresar valor.

float H04; //Ingresar valor.

float H05; //Ingresar valor.

float H06; //Ingresar valor.
```

```

float H;

float tPromedio; // Variable a imprimir.

int divisorQuince=90;

int divisorDia = 8640;


int pinSensorT = 49; // Pin digital para sensor de T y H.

float Temperatura;


float Humedad; //Variables de Temperatura y Humedad.

DHT sensorTH (pinSensorT, DHT11); // Se crea el objeto sensorTH


float horaActualM = 0; // Se escribe la hora actual en minutos.

float horaMedicionM; // Hora de medición en minutos.

float horaMedicionH; // Hora de medición en horas.

float hora;

float dia;

long contador= (horaActualM*6.0); // Se utiliza para todo


void setup() {

    // put your setup code here, to run once:

    pinMode(pinSensorT, INPUT);

    pinMode(pinLed, OUTPUT);

```

```
Serial.begin (9600); // Se inicia el monitor serial.
```

```
sensorTH.begin(); // Se inicializa el sensor.
```

```
Serial.println ("Iniciando tarjeta ...");
```

```
if (!SD.begin(SSpin)){ // si nos da ! significa que está en cero
```

```
    Serial.println ("Fallo en inicialización!");
```

```
    return;
```

```
}
```

```
Serial.println("Iniciación correcta");
```

```
archivo = SD.open ("datos.txt", FILE_WRITE);
```

```
}
```

```
void loop() {
```

```
    // put your main code here, to run repeatedly:
```

```
    Potenciometro = analogRead(pinPotenciometro); // Se almacena voltaje de Potenciómetro.
```

```
    if(Potenciometro<1023)
```

```
    {
```

```
        if (SD.begin(SSpin))
```

```
        {
```

```
            if (archivo)
```

```
            {
```

```

digitalWrite(pinLed, HIGH); //Encender led si está almacenando datos.

contador = contador + 1; // Por cada delay (cada10s) el contador aumenta en 1.

Temperatura = sensorTH.readTemperature();

Humedad=sensorTH.readHumidity();

horaMedicionM=contador /6.0; // Devuelve la hora en minutos (Cuando contador = 720,
horaMedicionM=120);

horaMedicionH = horaMedicionM/60; //Convierte a Horas el valor anterior.

if (horaMedicionH<24)

{

if (Temperatura<tMin1){tMin1=Temperatura;}

if (Temperatura>tMax1){tMax1=Temperatura;}

dia=1;

tMin=tMin1;

tMax=tMax1;

sumaT1=sumaT1+Temperatura;

contador1=contador1+1;

tPromedio = sumaT1/contador1;

H=1.125*(-4.46+0.477*H01+0.226*tPromedio);

}

if ((horaMedicionH>24) && (horaMedicionH<48))

{

if (Temperatura<tMin2){tMin2=Temperatura;}

if (Temperatura>tMax2){tMax2=Temperatura;}

dia=2;

```

```

tMin=tMin2;

tMax=tMax2;

sumaT2=sumaT2+Temperatura;

contador2=contador2+1;

tPromedio = sumaT2/contador2;

H=1.125*(-4.46+0.477*H02+0.226*tPromedio);

}

if ((horaMedicionH>48) && (horaMedicionH<72))

{

if (Temperatura<tMin3){tMin3=Temperatura;}

if (Temperatura>tMax3){tMax3=Temperatura;}

dia=3;

tMin=tMin3;

tMax=tMax3;

sumaT3=sumaT3+Temperatura;

contador3=contador3+1;

tPromedio = sumaT3/contador3;

H=1.125*(-4.46+0.477*H03+0.226*tPromedio);

}

if ((horaMedicionH>72) && (horaMedicionH<96))

{

if (Temperatura<tMin4){tMin4=Temperatura;}

if (Temperatura>tMax4){tMax4=Temperatura;}

```

```

dia=4;

tMin=tMin4;

tMax=tMax4;

sumaT4=sumaT4+Temperatura;

contador4=contador4+1;

tPromedio = sumaT4/contador4;

H=1.125*(-4.46+0.477*H04+0.226*tPromedio);

}

if ((horaMedicionH>96) && (horaMedicionH<120))

{

if (Temperatura<tMin5){tMin5=Temperatura;}

if (Temperatura>tMax5){tMax5=Temperatura;}

dia=5;

tMin=tMin5;

tMax=tMax5;

sumaT5=sumaT5+Temperatura;

contador5=contador5+1;

tPromedio = sumaT5/contador5;

H=1.125*(-4.46+0.477*H05+0.226*tPromedio);

}

if ((horaMedicionH>120) && (horaMedicionH<144))

{

if (Temperatura<tMin6){tMin6=Temperatura;}

```

```

if (Temperatura>tMax6){tMax6=Temperatura;}

dia=6;

tMin=tMin6;

tMax=tMax6;

sumaT6=sumaT6+Temperatura;

contador6=contador6+1;

tPromedio = sumaT6/contador6;

H=1.125*(-4.46+0.477*H06+0.226*tPromedio);

}

if (contador % divisorQuince == 0)

{

    archivo.print ("Día ");

    archivo.print (dia);

    archivo.print(", ");

    archivo.print (horaMedicionH);

    archivo.print(", ");

    archivo.print(Temperatura);

    archivo.print(", ");

    archivo.println(Humedad);

    if (contador % divisorDia == 0)

    {

        archivo.print(tMax);

        archivo.print(", ");

```



```

archivo.print(tMin);

archivo.print(",");

archivo.print(tPromedio);

archivo.print(",");

archivo.println(H);

}

Serial.print ("Día ");

Serial.print (dia);

Serial.print(", ");

Serial.print (horaMedicionH);

Serial.print(",");

Serial.print(Temperatura);

Serial.print(",");

Serial.println(Humedad);

if (contador % divisorDia == 0)

{

Serial.print(tMax);

Serial.print(",");

Serial.print(tMin);

Serial.print(",");

Serial.print(tPromedio);

Serial.print(",");

Serial.println(H);

```

```

    }

}

delay (10000);

}

}

}

if (Potenciometro==1023)

{

archivo.close();

digitalWrite(pinLed, LOW);

Serial.println (Potenciometro);

delay (10000);

}

}

```

Anexo 9.Radiación extraterrestre calculada

10608	10764	10589	9785	8851.6	8568.2	9159	10090	10624	10635	10594
10611	10767	10574	9756.9	8832.1	8573.7	9184.1	10113	10630	10632	10596
10615	10769	10559	9728.8	8813.2	8580	9209.4	10135	10636	10629	10599
10619	10771	10544	9700.6	8794.8	8587	9234.9	10157	10641	10626	10601
10623	10772	10528	9672.3	8777	8594.7	9260.7	10179	10645	10623	10603
10627	10773	10512	9643.9	8759.8	8603.1	9286.6	10200	10650	10620	
10632	10774	10495	9615.6	8743.2	8612.2	9312.8	10221	10653	10617	
10636	10775	10477	9587.2	8727.2	8622	9339.1	10241	10657	10615	
10641	10775	10459	9558.9	8711.9	8632.5	9365.6	10261	10660	10612	
10645	10774	10441	9530.5	8697.2	8643.7	9392.2	10281	10662	10609	
10645	10774	10421	9502.3	8683.1	8655.5	9418.9	10300	10665	10607	
10650	10773	10402	9474.1	8669.7	8668	9445.7	10318	10667	10604	
10655	10771	10382	9446	8657	8681.1	9472.5	10336	10668	10602	
10660	10769	10361	9418.1	8645	8694.9	9499.4	10354	10669	10600	
10665	10767	10340	9390.3	8633.6	8709.3	9526.4	10371	10670	10598	
10670	10764	10319	9362.6	8623	8724.4	9553.3	10388	10671	10596	
10675	10761	10297	9335.1	8613.1	8740	9580.3	10404	10671	10594	
10680	10757	10275	93307.8	8603.8	8756.3	9607.2	10420	10671	10592	
10690	10753	10252	9280.7	8595.3	8773.1	9634.1	10435	10671	10591	
10695	10748	10229	9253.9	8587.5	8790.5	9660.9	10450	10670	10590	
10700	10743	10205	9227.3	8580.4	8808.4	9687.7	10464	10669	10588	
10705	10737	10181	9201	8574.1	8826.9	9714.3	10478	10668	10587	
10709	10731	10157	9175	8568.5	8845.9	9740.8	10491	10667	10586	

10714	10724	10132	9149.3	8563.6	8865.5	9767.2	10504	10666	10586	
10719	10717	10107	9123.9	8559.5	8885.5	9793.4	10516	10664	10585	
10724	10710	10082	9098.9	8556.1	8906	9819.5	10528	10672	10585	
10728	10701	10056	9074.3	8553.5	8927	9845.3	10539	10660	10585	
10733	10692	10030	9050	8551.6	8948.4	9871	10550	10658	10585	
10737	10683	10003	9026.1	8550.5	8970.3	9896.4	10560	10656	10585	
10741	10673	9976.9	9002.7	8550.1	8992.6	9921.6	10570	10654	10586	
10745	10663	9950.1	8979.7	8550.4	9015.3	9946.6	10579	10651	10586	
10749	10652	9923.1	8957.1	8551.5	9038.4	9971.2	10588	10649	10587	
10752	10640	9895.8	8935	8553.4	9061.9	9995.6	10596	10646	10588	
10756	10628	9838.3	8913.4	8556	9085.7	10020	10604	10643	10589	
10759	10615	9840.7	8892.3	8559.3	9109.8	10043	10611	10640	10591	
10762	10602	9812.9	8871.7	8563.4	9134.3	10067	10618	10637	10593	