

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA



# **Monitoreo de Irradiancia Solar en los diferentes Campus de la Universidad de El Salvador.**

PRESENTADO POR:

**FREDY ANTONIO MARENCO MOREIRA**

**HENRY ALFREDO MERINO RUANO**

**MANUEL EDGARDO ORELLANA CASTILLO**

PARA OPTAR AL TÍTULO DE:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

CIUDAD UNIVERSITARIA, FEBRERO DE 2017

**UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR**

**RECTOR INTERINO :**

**LIC. JOSÉ LUIS ARGUETA ANTILLÓN**

**SECRETARIA GENERAL :**

**DRA. ANA LETICIA ZAVALA DE AMAYA**

**FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**

**DECANO :**

**ING. FRANCISCO ANTONIO ALARCÓN SANDOVAL**

**SECRETARIO :**

**ING. JULIO ALBERTO PORTILLO**

**ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA.**

**DIRECTOR :**

**ING. ARMANDO MARTÍNEZ CALDERÓN**

UNIVERSIDAD DE EL SALVADOR  
FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELÉCTRICA

Trabajo de Graduación previo a la opción al Grado de:

**INGENIERO ELECTRICISTA**

Título :

**Monitoreo de Irradiancia Solar en los diferentes  
Campus de la Universidad de El Salvador.**

Presentado por :

**FREDY ANTONIO MARENCO MOREIRA**

**HENRY ALFREDO MERINO RUANO**

**MANUEL EDGARDO ORELLANA CASTILLO**

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**MSc. JORGE ALBERTO ZETINO CHICAS**

San Salvador, febrero de 2017

Trabajo de Graduación Aprobado por:

Docente Asesor :

**MSc. JORGE ALBERTO ZETINO CHICAS**

## ACTA DE CONSTANCIA DE NOTA Y DEFENSA FINAL

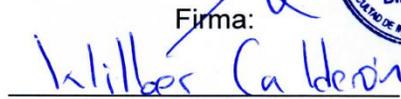
En esta fecha, lunes 31 de octubre de 2016, en la Sala de Lectura de la Escuela de Ingeniería Eléctrica, a las 11:00 p.m. horas, en presencia de las siguientes autoridades de la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de El Salvador:

1. Ing. Armando Martínez Calderón  
Director

Firma: 



2. MSc. José Wilber Calderón Urrutia  
Secretario

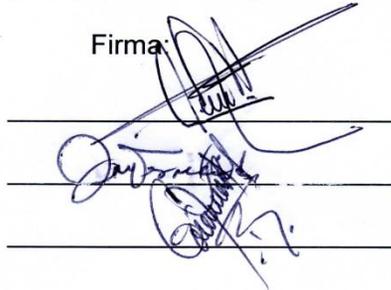
Firma: 

Y, con el Honorable Jurado de Evaluación integrado por las personas siguientes:

1- MSc. Jorge Alberto Zetino Chicas

2- Ing. José Miguel Hernández

3- MSc. Salomón Torres

Firma: 

Se efectuó la defensa final reglamentaria del Trabajo de Graduación:

Monitoreo de Irradiancia Solar en los diferentes Campus de la Universidad de El Salvador.

A cargo de los Bachilleres:

- Marengo Moreira Fredy Antonio
- Merino Ruano Henry Alfredo
- Orellana Castillo Manuel Edgardo

Habiendo obtenido en el presente Trabajo una nota promedio de la defensa final: 7.0

( SIETE PUNTO CERO. )

## AGRADECIMIENTOS.

Primeramente agradecer a Dios por darme la oportunidad de haber logrado obtener este triunfo tan importante en mi vida; luego agradecer a mis padres por todo su apoyo y consejos que me ayudaron como motivación para seguir siempre adelante a pesar de todas las adversidades.

También quiero agradecer a todas las personas que estuvieron siempre a mi lado apoyándome, a mis compañeros de estudio principalmente, con los cuales compartimos muchos momentos alegres así como también momentos difíciles pero que con la ayuda de Dios y con el esfuerzo de todos logramos salir adelante para obtener nuestro objetivo.

FREDY ANTONIO MARENCO MOREIRA.

## AGRADECIMIENTO

La culminación de esta carrera profesional es una bendición que Diosito y la Virgen me han permitido realizar, ya que a lo largo de una carrera de estudio me permitieron la sabiduría, la paciencia para no darme por vencido en los momentos difíciles.

Este logro no lo pude también a verlo realizado sino fuese sido por mis padres que son las personas más grandes influyentes de este proyecto, porque ellos fueron los que me dieron todo pero lo que es todo lo necesario para poderla realizar, nunca me negaron una ayuda siempre me motivaron a seguir adelante y hasta altura sus rostros reflejan mucha felicidad a pesar del cansancio de sus trabajos a ellos les dedico este trabajo y sobre todo darle infinitamente las gracias y este es fruto de todo sus esfuerzo, no tengo como pagárselos pero de ahora en adelante me toca trabajar mucho para que ellos puedan descansar de sus trabajos. A mis hermanos también darle las gracias por sus apoyos y a pesar de sus regaños por el desorden que dejaba en la mesa de mis cuadernos siempre me apoyaron

No puede quedar atrás el agradecimiento a todos mis compañeros que me ayudaron a cumplir este proyecto, ellos fueron lo que siempre estuvieron en cada una de las materias cursadas, sus apoyos en los estudios fueron esencial para poder ir dando saltos de logro en cada ciclo sin ellos mi carrera hubiese sido más larga, no puedo mencionar a todos ya que todos fueron una pieza importante en este logro.

A todo el personal de la escuela de eléctrica se le agradece por sus enseñanzas que nos brindaron, por su ayuda en los tramites académicos, ayuda en los equipos de laboratorio para poder realizar nuestros trabajos, siempre nos brindaron su mano día a día.

Y siempre recalcar que sin Dios nunca hubiese sido posible llegar hasta aquí.

Henry Alfredo Merino Ruano.

## AGRADECIMIENTO

Le agradezco primeramente a Dios por todas las Bendiciones y milagros que ha realizado en mi vida por darme la fuerza y fortaleza a lo largo de mi carrera, también agradezco intensamente a Dios por regalarme una familia que me ha apoyado a seguir siempre adelante y especialmente a mis Padres José Manuel Orellana y Ernestina Castillo que siempre están apoyándome incondicionalmente en mis proyecto de vida y en mis estudios.

También agradezco a mis hermanas Carolina Orellana y Sonia Beatriz Orellana por todo el apoyo que me brindan por sus consejos, también agradezco a mis amigos y hermanos en Cristo por su gran apoyo incondicional.

Muchas gracias a todos por estar siempre conmigo apoyándome, por sus oraciones y muchas gracias padre Dios porque tú has hecho posible que culmine mi carrera Universitaria.

Manuel Edgardo Orellana Castillo

## INDICE

INTRODUCCIÓN .....	14
OBJETIVOS .....	15
1. Conceptos, Generalidades y antecedentes .....	16
1.1 El recurso solar.....	17
1.1.1 El sol. ....	17
1.1.1.1 Composición y estructura del sol. ....	17
1.1.1.2 Fusión nuclear del Sol.....	19
1.1.1.3 Energía solar. ....	20
1.1.1.4 La constante solar.....	20
1.1.2 Radiación solar. ....	21
1.1.2.1 Espectro de la radiación solar. ....	22
1.1.3 Geometría solar.....	24
1.1.3.1 Distancia de la tierra-sol.....	24
1.1.3.3 Coordenadas terrestres.....	25
1.1.3.4 Movimientos terrestres.....	27
1.1.3.5 Movimiento de traslación y la eclíptica.....	27
1.1.3.6 Movimiento de rotación.....	28
1.1.3.7 Declinación solar. ....	29
1.1.3.8 Día solar.....	30
1.1.3.9 Ecuación del tiempo. ....	31
1.1.3.10 Tiempo solar verdadero. ....	32
1.1.3.11 Posición del sol respecto a superficies horizontales. ....	33
1.1.4 La irradiación.....	36
1.1.4.1 Tipos de Irradiación. ....	36
1.1.5 Irradiancia solar.....	37
1.1.6 Hora Solar Pico (HSP). ....	38
1.1.7 El Brillo solar.....	39
1.2 Temperatura y humedad relativa.....	40
1.2.1 Temperatura.....	40

1.2.2	Temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco.....	41
1.2.3	Humedad relativa.....	42
1.2.3.1	El Higrómetro.....	43
1.3	El recurso solar en El Salvador .....	43
1.3.1	Generalidades de El Salvador.....	43
1.3.2	Antecedentes meteorológicas en El Salvador.....	44
1.3.3	Energía solar en El Salvador .....	44
1.4	Instrumentos de medida de Radiación Solar.....	47
1.4.1	Pirheliómetros.....	48
1.3.2	Piranómetros.....	51
1.3.2.1	Tipos de piranómetros. ....	52
1.3.2.2	Clasificación de los piranómetros.....	53
1.3.3	Heliógrafo.....	53
1.3.3.1	Modo de funcionamiento.....	55
2.	Implementación de medidor de irradiancia solar con hardware y software libre. ....	57
2.1	Hardware libre Arduino. ....	58
2.1.1	Características técnicas del Arduino Uno. ....	59
2.1.2	Software Arduino. ....	61
2.1.2.1	Herramientas del software Arduino.....	61
2.1.3	Programación Arduino. ....	63
2.1.3.1	Estructura del Lenguaje de programación de Arduino. ....	63
2.1.3.2	Variables .....	64
2.1.3.3	Funciones y Referencia.....	65
2.1.4	Librerías Arduino .....	66
2.2	Diseño e implementación de medidor de irradiancia solar. ....	67
2.2.1	Características Arduino mega 2560. ....	68
2.2.2	Elementos y accesorios para el diseño de medidor de irradiancia solar compatibles con Arduino. ....	71
2.2.2.1	Pantallas LCD. ....	71
2.2.2.2	Sensor de temperatura y humedad DHT 11.....	72

2.2.2.3 Módulo RTC DS1307 reloj externo para Arduino.....	74
2.2.2.4 Arduino Ethernet Shield .....	77
2.2.3.1 Ampliador de instrumentación AD 625.....	79
2.2.3 amplificación de señal con el AD 625.....	81
2.2.4 Implementación de circuitos para el medidor de irradiancia solar.....	83
2.2.4.1 Circuito Arduino.....	83
2.2.4.2 circuitos de amplificación de señal. ....	85
3. Desarrollo de mediciones y manipulación de datos. ....	97
3.1. Descripción del sistema de medición de irradiancia solar. ....	98
3.1.1 Comparación de datos obtenidos de irradiancia solar. ....	99
3.1.2 Calculo del error de las tres variables de medición del sistema.....	100
Irradiancia solar.....	100
3.1.3 Desarrollo sistemático de mediciones de irradiancia. ....	101
3.1.3.1 Equipo y sensores utilizados.....	102
3.1.4. Validación del tiempo de medición.....	107
3.1.5. Vida útil del instrumento. ....	108
3.1.6. Resultados obtenidos de mediciones. ....	109
3.1.7 Comparación de cuatro medidores con el medidor patrón datalogger. ....	112
3.1.8. Presupuesto del instrumento de medición de irradiancia solar.....	113
CONCLUSIONES.....	114
BIBLIOGRAFÍA .....	115
ANEXO.....	117

## CONTENIDO DE TABLAS

Tabla 1.1 Datos básicos del Sol.....	17
Tabla 1.2 Composición de la fotosfera. ....	18
Tabla 1.3 Latitud, longitud y zona horaria de El Salvador. ....	44
Tabla 1.4 Radiación promedio (KWh/m <sup>2</sup> /día). ....	46
Tabla 1.5 Instrumentos meteorológicos para la medida de la radiación.....	47
Tabla 1.6 Características de Pirheliómetros.....	50
Tabla 1.7 Características de piranómetros.....	54

Tabla 2.1 Librerías Arduino.....	67
Tabla 2.2 Especificaciones técnicas Arduino ATmega 2560.....	69
Tabla 2.3 Voltaje de comparacion de AD 625.....	82
Tabla 2.4 Conexión de la LCD al Arduino.....	85
Tabla 2.5 Conexión DTH11, pulsos y RTC DS 1307 a los pines del Arduino.....	85
Tabla 2.6 Tabla que muestra los componentes a utilizar.....	86
Tabla 3.1 Comparación de la lectura del medidor con datos obtenidos de un piranómetro.....	100
Tabla 3.2 Presupuesto del instrumento de medición de irradiancia implementado.....	113

### CONTENIDO DE FIGURAS

Figura 1.1 Capas concéntricas del sol.....	18
Figura 1.2 Fusión nuclear.....	19
Figura 1.3 Concepto de constante solar.....	21
Figura 1.4 Rango de frecuencias y longitud de onda del espectro solar.....	22
Figura 1.5 Esfera celeste.....	25
Figura 1.6 Paralelos terrestres y meridianos terrestres.....	26
Figura 1.7 Eclíptica y movimientos de traslación solar.....	28
Figura 1.8 Movimiento de rotación.....	29
Figura 1.9 Hora solar estándar.....	33
Figura 1.10 Posición del sol respecto a superficies horizontales.....	35
Figura 1.11 Tipos de irradiación.....	37
Figura 1.12 Comportamiento de la irradiancia.....	38
Figura 1.13 Bandas para medir brillo solar.....	39
Figura 1.14 Termómetro para temperatura bulbo seco y húmedo.....	42
Figura 1.15 Mapa de radiación solar en El Salvador.....	45
Figura 1.16 Pirheliómetro montado sobre seguidor solar.....	49
Figura 1.17 Piranómetro de radiación solar global.....	51
Figura 1.18 Piranómetro con banda de sombra.....	52
Figura 1.19 Heliógrafo.....	55
Figura 1.20 Tiras de cartón con graduación horaria.....	55
Figura 2.1 Placa Arduino Uno.....	58
Figura 2.2 Microcontrolador ATmega328P.....	60
Figura 2.3 Sketch de Arduino.....	62
Figura 2.4 Arduino ATmega 2560.....	68
Figura 2.5 Pantalla LCD compatible con Arduino.....	71
Figura 2.6 sensor de temperatura y humedad DHT11.....	73
Figura 2.7 Sensor DHT 11.....	74

Figura 2.8 Modulo RTC DS 1307 .....	75
Figura 2.9 Esquemático del módulo RTC.....	76
Figura 2.10 Módulo Tiny RTC conectado a la placa Arduino.....	77
Figura 2.11 Arduino Ethernet Shield. ....	78
Figura 2.12 AD 625 con sus respectivos pines.....	80
Figura 2.13 Diagrama de circuito integrado AD625. ....	80
Figura 2.14 Configuración de ganancia fija del AD 625.....	81
Figura 2.15 Ethernet conectado al Arduino Mega. ....	83
Figura 2.16. Circuito Arduino para implementación del medidor de irradiancia solar.....	84
Figura 2.17. Implementación de circuito de amplificación de señal.....	86
Figura 2.18 Archivo Index.ino con sus diferentes secciones .....	87
Figura 3.1 Sistema de monitoreo de irradiancia solar. ....	98
Figura 3.2 Piranómetros en una superficie plana. ....	102
Figura 3.3 Piranómetro de segunda clase LP02. ....	103
Figura 3.4 Datalogger LI-19.....	103
Figura 3.5 Sistema de medición.....	104
Figura 3.6 Gráfica de irradiancia solar.....	105
Figura 3.7 Gráfica de irradiancia solar.....	105
Figura 3.8 Gráfica de irradiancia solar.....	106
Figura 3.9 Gráfica de irradiancia solar $16.40\mu\text{V.W/m}^2$ .....	106
Figura 3.10 Gráfico con datalogger con constante $19.37\mu\text{V.W/m}^2$ . ....	107
Figura 3.11 Gráfico de irradiancia solar en watts por metros cuadrados.....	109
Figura 3.12 Gráfico de irradiancia solar tomada de LI-19 datalogger.....	110
Figura 3.13 Gráfico de temperatura en grados Celsius.....	110
Figura 3.14 Gráfico de Humedad relativa en %.....	111
Figura 3.15 Comparación de seis medidores con el medidor patrón datalogger y estación meteorológica SMA. ....	112

## INTRODUCCIÓN

La energía solar es un fuente de energía renovable, obtenida a partir de aprovechamiento de la radiación del sol, si se observa con atención se puede notar que casi toda la energía de la tierra, la fuente es el sol, esta energía por supuesto varía de un lugar a otro dependiendo del lugar geográfico y de las épocas del año en cada lugar, por ejemplo, en los tiempos de verano se manifiesta la mayor luz del sol y por su defecto la mayor energía.

El equipo necesario para alcanzar un conocimiento detallado del recurso solar para un estudio es un objetivo prioritario, que lamentablemente es escaso. La variabilidad del recurso solar, tanto espacial como temporal, es un dato importante en el diseño de equipamientos que buscan el aprovechamiento de la energía del sol ya que si hoy en día se hace una comparación de los costos en el precio de sistemas fotovoltaicos es mayor que el precio de la energía consumida, por eso el éxito de la implementación de equipos de medición hace prever un incremento mayor de los proyectos de generación fotovoltaica (FV) y una vez estas plantas se encuentren instaladas, una estabilización y disminución del precio de la energía al consumidor final.

Una magnitud solar que nos permitirá conocer cuanta energía incide sobre un área es la irradiancia que está dada en watts entre metros cuadrados. La Irradiancia se determina a través de un piranómetro, existen diversos tipos de pirómetros y su selección es importante para asegurar la correcta toma de datos. Existen piranómetros que emplean celdas amorfas o cristalinas, como elemento sensor de irradiancia.

El desarrollo de este proyecto se pretende alcanzar la obtención de datos de una manera fácil, comenzando desde la fabricación con dispositivos de hardware libres para obtener datos y poderlos representar en una gráfica, en la cual, el interesado en esta rama de estudio pueda obtenerlos con el fin de dar una propuesta en el procedimiento del recurso natural de energía renovable.

## **OBJETIVOS**

### **OBJETIVO GENERALES:**

Monitoreo de irradiancia solar en los diferentes Campus de la Universidad de El Salvador.

### **OBJETIVOS ESPECÍFICOS.**

- Construir instrumentos de monitoreo de irradiancia solar con hardware libre para facilitar la obtención de datos desde los diferentes campus universitarios.
- Desarrollar e implementar sistemas de monitoreo y amplificación de señales provenientes de piranómetros, para estudiar el comportamiento del recurso solar.
- Recolectar toda la información obtenida de cada estación de monitoreo para ser presentada en una página web.

# 1. Conceptos, Generalidades y antecedentes

Dado que el tema de este trabajo se refiere al Monitoreo la irradiancia solar, se requiere conocer algunos conceptos generales, primeramente se estudiaran conceptos relacionados. En principio el recurso solar, generalidades del sol, geografía solar, tipos radiación solar, movimientos de rotación de la tierra. También se explica a través de ecuaciones como calcular declinación solar y el tiempo solar a través de fórmulas matemáticas. La temperatura y humedad relativa son parámetros que acompañaran a la medición de irradiancia solar.

Para llevar a cabo este trabajo se han construido medidores de bajo costo. Una de las herramientas es el hardware libre Arduino que es una PCB con un microcontrolador programable. El segundo capítulo está dedicado a hardware libre Arduino y a la construcción del medidor de irradiancia solar.

El desarrolla de la investigación se realiza en tercer capítulo donde se describe los instrumentos a utiliza, donde se instaló el equipo con sus respectivas coordenadas también se representan los resultados de mediciones y comparaciones a través de graficas terminando con las conclusiones extraídas de los objetivos planteados.

## 1.1 El recurso solar.

### 1.1.1 El sol.

El sol es la única estrella del sistema solar y la mayor fuente de energía inagotable que se manifiesta en forma de luz y calor, es un cuerpo gaseoso formado principalmente por hidrogeno contiene más del 99% de la materia del sistema solar.

El Sol se formó hace unos 4,650 millones de años y tiene combustible para 5,000 millones más. Después, comenzará a hacerse más y más grande, hasta convertirse en una gigante roja. Finalmente, se hundirá por su propio peso y se convertirá en una enana blanca, que puede tardar un trillón de años en enfriarse.

El Sol gira alrededor del centro de la Vía Láctea, nuestra galaxia. Da una vuelta cada 200 millones de años. En nuestros tiempos se mueve hacia la constelación de Hércules a 19 km/s. En la tabla 1.1 se muestra algunos datos generales del sol.

Datos básicos	El sol
<b>Radio ecuatorial</b>	700,000 km
<b>Periodo de rotación sobre el eje</b>	de 25 a 36 días
<b>Masa comparada con la Tierra</b>	332,830
<b>Temperatura media superficial</b>	6000 ° C
<b>Gravedad superficial en la fotosfera</b>	274 m/s <sup>2</sup>
<b>Vida estimada en años</b>	5,000 millones
<b>La velocidad media de la tierra alrededor del sol</b>	29.5 km/s

Tabla 1.1 Datos básicos del Sol.

#### 1.1.1.1 Composición y estructura del sol.

El Sol posee una forma esférica, y a causa de su lento movimiento de rotación, tiene también un leve achatamiento polar, como en cualquier cuerpo de masa considerable toda la materia que lo constituye es atraída hacia el centro del objeto por su propia fuerza gravitatoria.

En la siguiente tabla 1.2 se muestra la distribución de los elementos que conforman la fotosfera:

Elementos	Porcentajes (%)
<b>Hidrogeno</b>	74.46
<b>Helio</b>	24.85
<b>Oxigeno</b>	0.77
<b>Carbono</b>	0.29
<b>Hierro</b>	0.16
<b>Neón</b>	0.12
<b>Nitrógeno</b>	0.09
<b>Silicio</b>	0.07
<b>Magnesio</b>	0.05
<b>Azufre</b>	0.04

Tabla 1.2 Composición de la fotosfera.<sup>1</sup>

Como se puede observar en la tabla 1.2 el hidrógeno es el elemento que más predomina en la fotosfera solar y en segundo lugar, el helio los demás elementos están presentes aproximadamente el 1%.

El sol se divide en capas concéntricas cada una desempeña una función diferente en la figura 1.1 se puede observar algunas de las capas que componen físicamente el sol.



Figura 1.1 Capas concéntricas del sol.<sup>2</sup>

**Núcleo:** es la zona del Sol donde se produce la fusión nuclear debido a la alta temperatura, es decir, el generador de la energía.

<sup>1</sup><http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/277/A5.pdf?sequence=5>

<sup>2</sup><http://www.astromia.com/solar/estrucsol.htm>

Zona de Radiación: las partículas que transportan la energía (fotones) intentan escapar al exterior en un viaje que puede durar unos 100,000 años debido a que éstos fotones son absorbidos continuamente y remitidos en otra dirección distinta a la que tenían.

Zona Convección: en ésta zona se produce el fenómeno de la convección, es decir, columnas de gas caliente ascienden hasta la superficie, se enfrían y vuelven a descender.

Fotosfera: es una capa delgada, de unos 300 km, que es la parte del Sol que nosotros vemos, la superficie. Desde aquí se irradia luz y calor al espacio. La temperatura es de unos 5,000°C. En la fotosfera aparecen las manchas oscuras y las fáculas que son regiones brillantes alrededor de las manchas, con una temperatura superior a la normal de la fotosfera y que están relacionadas con los campos magnéticos del Sol.<sup>3</sup>

### 1.1.1.2 Fusión nuclear del Sol.

#### Fusión nuclear.

La fusión nuclear es una reacción nuclear en la que dos núcleos de átomos ligeros, en general el hidrógeno y sus isótopos deuterio y tritio, se unen para formar otro núcleo más pesado. Generalmente esta unión va acompañada con la emisión de partículas en el caso de núcleos atómicos de deuterio se emite un neutrón. Esta reacción de fusión nuclear libera o absorbe una gran cantidad de energía en forma de rayos gamma y también de energía cinética de las partículas emitidas. Esta gran cantidad de energía permite a la materia entrar en estado de plasma. En otras palabras se convierte en gas constituido por partículas cargadas de iones libres y cuya dinámica presenta efectos colectivos dominados por las interacciones electromagnéticas de largo alcance entre las mismas.

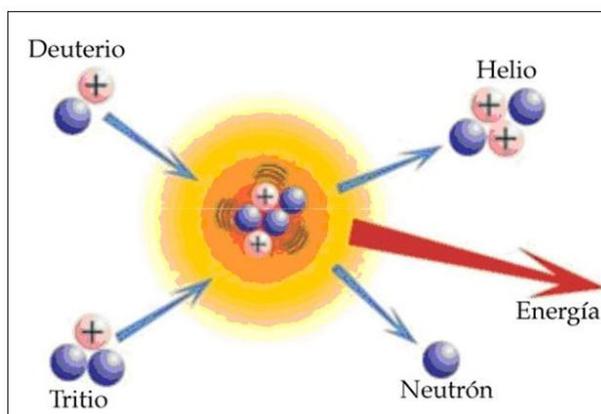


Figura 1.2 Fusión nuclear<sup>4</sup>

#### Fusión nuclear del sol.

La luz y el calor que se percibe del Sol es el resultado de estas reacciones nucleares de fusión: núcleos de hidrógeno chocan entre sí, y se fusionan dando lugar a un núcleo más

<sup>3</sup> <http://www.astromia.com/solar/estrucsol.htm>

<sup>4</sup> <http://slideplayer.es/slide/1834057/>

pesado de helio liberando una enorme cantidad de energía. La energía liberada llega a la Tierra en forma de radiación electromagnética.

Las fuerzas de gravedad en el universo generan las condiciones perfectas para la fusión nuclear.

A las reacciones de fusión nuclear también se les llama reacciones termonucleares debido a las altas temperaturas que experimentan. En el interior del Sol, la temperatura es cercana a los 15 millones de grados Celsius.<sup>5</sup>

Fisión nuclear.

Es la división del núcleo de un átomo. El núcleo se convierte en diversos fragmentos con una masa casi igual a la mitad de la masa original más dos o tres neutrones.

### **1.1.1.3 Energía solar.**

La energía solar se crea en el interior del Sol, donde la temperatura llega a los 15 millones de grados Celsius, con una presión altísima, que provoca reacciones nucleares. Se liberan protones (núcleos de hidrógeno), que se funden en grupos de cuatro para formar partículas alfa (núcleos de helio). Cada partícula alfa pesa menos que los cuatro protones juntos. La diferencia se expulsa hacia la superficie del Sol en forma de energía. Un gramo de materia solar libera tanta energía como la combustión de 2.5 millones de litros de gasolina.

La energía generada en el centro del Sol tarda un millón de años para alcanzar la superficie solar. Cada segundo se convierten 700 millones de toneladas de hidrógeno en cenizas de helio. En el proceso se liberan 5 millones de toneladas de energía pura; por lo cual, el Sol cada vez se vuelve más ligero. El Sol también absorbe materia. Es tan grande y tiene tal fuerza que a menudo atrae a los asteroides y cometas que pasan cerca. Naturalmente, cuando caen al Sol, se desintegran y pasan a formar parte de la estrella.

### **1.1.1.4 La constante solar.**

La constante solar es la cantidad total de energía solar que atraviesa en un minuto una superficie perpendicular a los rayos incidentes con área de  $1 \text{ cm}^2$ , que se encuentra a la distancia media existente entre la Tierra y el Sol como se observa en la figura 1.3 su valor es aproximadamente  $2 \text{ cal/cm}^2 \text{ min}$ , esta cantidad no es constante, ya que parece ser que varía un 0.2 % en un periodo de 30 años. Se sostiene que si ésta varía en 1% podría provocar variación de uno a dos grados Celsius en la temperatura del planeta.

---

<sup>5</sup> <http://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-nuclear/fusion-nuclear>

La radiación solar que se recibe fuera de la atmósfera terrestres expresada en unidades del SI.

$$C = 1,367 \text{ W/m}^2$$

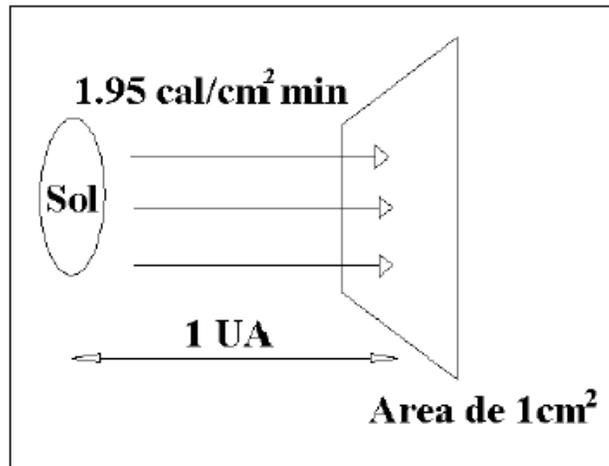


Figura 1.3 Concepto de constante solar.<sup>6</sup>

### 1.1.2 Radiación solar.

La radiación solar es un conjunto de radiaciones electromagnéticas emitidas por el Sol. El Sol se comporta prácticamente como un Cuerpo negro que emite energía siguiendo la ley de Plank a una temperatura de unos 6000 K. La radiación solar se distribuye desde el infrarrojo hasta el ultravioleta. La magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra es la irradiancia, que mide la energía que, por unidad de tiempo y área, alcanza a la Tierra.

El Sol es la estrella más cercana a la Tierra y está catalogada como una estrella enana amarilla. Sus regiones interiores son totalmente inaccesibles a la observación directa y es allí donde ocurren temperaturas de unos 15 millones de grados Celsius necesarios para producir las reacciones nucleares que producen su energía.<sup>7</sup>

La generación de energía proviene de la pérdida de masa del Sol, que se convierte en energía de acuerdo con la famosa ecuación de Einstein,  $E=m \cdot c^2$ , donde "E" es la cantidad de energía liberada cuando desaparece la masa "m", de los átomos de Helio; "c" es la velocidad de la luz en el vacío la cual tiene un valor aproximado de  $3 \times 10^8$  m/s. La radiación que llega a la tierra no es constante varia con los diferentes efectos que produce la radiación sobre la atmosfera terrestre, mucha de esta es absorbida por diferentes

<sup>6</sup> <http://personales.ya.com/casanchi/ast/solar001.gif>.

<sup>7</sup> [http://www.ecured.cu/index.php/Radiaci%C3%B3n\\_solar](http://www.ecured.cu/index.php/Radiaci%C3%B3n_solar)

fenómenos y un 40% de la radiación en la superficie no llega forma luz visible sino como radiación infrarroja.

Las cantidades de radiación son expresadas generalmente en términos de exposición radiante o irradiancia, siendo esta última una medida del flujo de energía recibida por unidad de área en forma instantánea como energía/área-tiempo y cuya unidad es el watt por metro cuadrado ( $\text{W}/\text{m}^2$ ).  $1 \text{ W} = 1 \text{ J}/\text{s}$ .

La exposición radiante es la medida de la radiación solar, en la cual la radiación es integrada en el tiempo como energía/área y cuya unidad es el  $\text{kWh}/\text{m}^2$ .

### 1.1.2.1 Espectro de la radiación solar.

La luz visible, ya sea de origen solar, o generada por un foco incandescente o fluorescente, está formada por un conjunto de radiaciones electromagnéticas que está contenida dentro de un determinado rango de frecuencias, al que se lo denomina espectro visible. La intensidad de la radiación luminosa varía con la frecuencia.

En la siguiente figura 1.4 se representa el espectro de la luz solar con longitud de onda y rangos de frecuencia respectivamente. Las frecuencias más bajas del espectro se llaman radiación infrarroja y las frecuencias más altas se les llama radiación Ultravioleta.

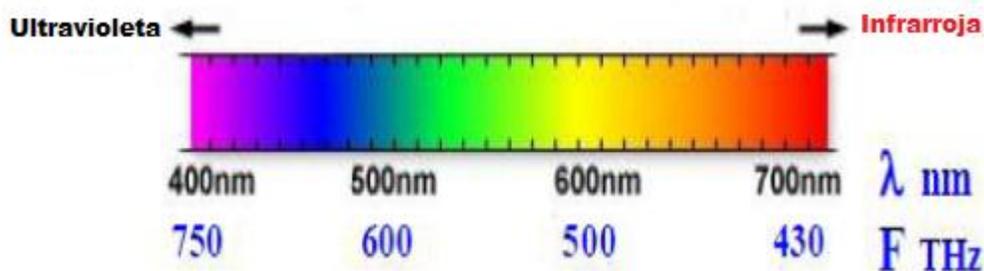


Figura 1.4 Rango de frecuencias y longitud de onda del espectro solar.<sup>8</sup>

La aplicación de la Ley de Plank al Sol con una temperatura superficial de unos  $6000 \text{ }^\circ\text{K}$  nos lleva a que el 99 % de la radiación emitida está entre las longitudes de onda  $0.15 \text{ } \mu\text{m}$  y 4 micras. Como 1 angstrom  $1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m} = 10^{-4} \text{ micras}$  resulta que el Sol emite en un rango de  $1,500 \text{ \AA}$  hasta  $40,000 \text{ \AA}$ . La luz visible se extiende desde  $4,000 \text{ \AA}$  a  $7,400 \text{ \AA}$ . La radiación ultravioleta u ondas cortas irían desde los  $1,500 \text{ \AA}$  a los  $4,000 \text{ \AA}$  y la radiación infrarroja u ondas largas desde las  $0.74 \text{ micras}$  a  $4 \text{ micras}$ .

<sup>8</sup> <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/277/A5.pdf?sequence=5>

### **Radiación ultravioleta.**

La radiación ultravioleta tiene la menor longitud de onda 360 nm, lleva mucha energía e interfiere con los enlaces moleculares. Especialmente las de menos de 300 nm que pueden alterar las moléculas de ADN, muy importantes para la vida. Estas ondas son absorbidas por la parte alta de la atmósfera, especialmente por la capa de ozono. Es importante protegerse de este tipo de radiación ya que por su acción sobre el ADN está asociada con el cáncer de piel.

Sólo las nubes tipo cúmulos de gran desarrollo vertical atenúan éstas radiaciones prácticamente a cero. El resto de las formaciones tales como cirrus, estratos y cúmulos de poco desarrollo vertical no las atenúan, por lo cual es importante la protección aún en días nublados. Es importante tener especial cuidado cuando se desarrollan nubes cúmulos, ya que éstas pueden llegar a actuar como espejos y difusores e incrementar las intensidades de los rayos ultravioleta y por consiguiente el riesgo solar. Algunas nubes tenues pueden tener el efecto de lupa.

### **Luz visible.**

La radiación correspondiente a la zona visible cuya longitud de onda está entre 360 nm (violeta) y 760 nm (rojo), por la energía que lleva, tiene gran influencia en los seres vivos. La luz visible atraviesa con bastante eficacia la atmósfera limpia, pero cuando hay nubes o masas de polvo parte de ella es absorbida o reflejada.

### **Radiación infrarroja.**

La radiación infrarroja de más de 760 nm, es la que corresponde a longitudes de onda más largas y lleva poca energía asociada. Su efecto aumenta la agitación de las moléculas, provocando el aumento de la temperatura. El CO<sub>2</sub>, el vapor de agua y las pequeñas gotas de agua que forman las nubes absorben con mucha intensidad las radiaciones infrarrojas.

La atmósfera se desempeña como un filtro ya que mediante sus diferentes capas distribuyen la energía solar para que a la superficie terrestre sólo llegue una pequeña parte de esa energía.

La parte externa de la atmósfera absorbe parte de las radiaciones reflejando el resto directamente al espacio exterior, mientras que otras pasarán a la Tierra y luego serán irradiadas. Esto produce el denominado balance térmico, cuyo resultado es el ciclo del equilibrio radiante. Ello nos libra de la ultravioleta más peligrosa para la salud. La atmósfera es opaca a toda radiación infrarroja de longitud de onda superior a las 24 micras, ello no afecta a la radiación solar pero sí a la energía emitida por la Tierra que llega hasta las 40 micras y que es absorbida. A este efecto se lo conoce como efecto invernadero.<sup>9</sup>

---

<sup>9</sup> [http://www.ecured.cu/index.php/Radiaci%C3%B3n\\_solar](http://www.ecured.cu/index.php/Radiaci%C3%B3n_solar)

### 1.1.3 Geometría solar.

La geometría solar trata en principio de los recorridos aparentes del sol en el cielo y de su localización en distintas fechas y horas para, de ese modo, predecir su interacción con planos y volúmenes en el espacio, en función a su ubicación relativa. Estos recorridos del sol se representan en gráficos que son herramientas útiles para el diseño ingenieriles y arquitectónico.

#### 1.1.3.1 Distancia de la tierra-sol.

La cantidad de radiación solar que llega a la Tierra es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia al Sol. Por lo cual un valor preciso de la distancia Tierra-Sol se denomina Unidad astronómica (AU). Un AU equivale a  $1.496 \times 10^8$  km. La distancia mínima de la Tierra-Sol es aproximadamente 0.983AU y la distancia máxima es aproximadamente 1.017 AU.

Matemáticamente se puede calcular la distancia Tierra-Sol donde se han creado expresiones matemáticas simples. Spencer (1971) desarrollo la ecuación 1.1 donde  $\rho^2$  es denominado factor de corrección de la distancia Tierra-Sol.

$$\rho^2 = \left(\frac{r}{r_0}\right)^2 = (1.000110 + 0.034221 \cos \Gamma + 0.001280 \sin \Gamma + 0.000719 \cos 2\Gamma + 0.000077 \sin 2\Gamma)^{-1} \quad (1.1)$$

Ecuación (1.2) para calcular el ángulo diario en radianes.

$$\Gamma = 2\pi \frac{(dn-1)}{365} \quad (1.2)$$

dn: Número de días.

Existe otra ecuación (1.3) más simple que fue planteada por Duffie y Beckman (1980)

$$\rho^2 = \left(\frac{r}{r_0}\right)^2 = \left[1 + 0.33 \cos\left(\frac{2\pi dn}{365}\right)\right]^{-1} \quad (1.3)$$

Si se requiere precisión se prefiere la ecuación (1.1) de Spencer.

### 1.1.3.2 Esfera celeste.

La Esfera celeste es una esfera ficticia, de radio arbitrario, que tiene como centro el ojo del observador y sobre la cual se proyectan las posiciones de los astros. Sirve para medir la posición de los astros independientemente de su distancia, en unidades de arco sobre círculos máximos definidos sobre la misma.

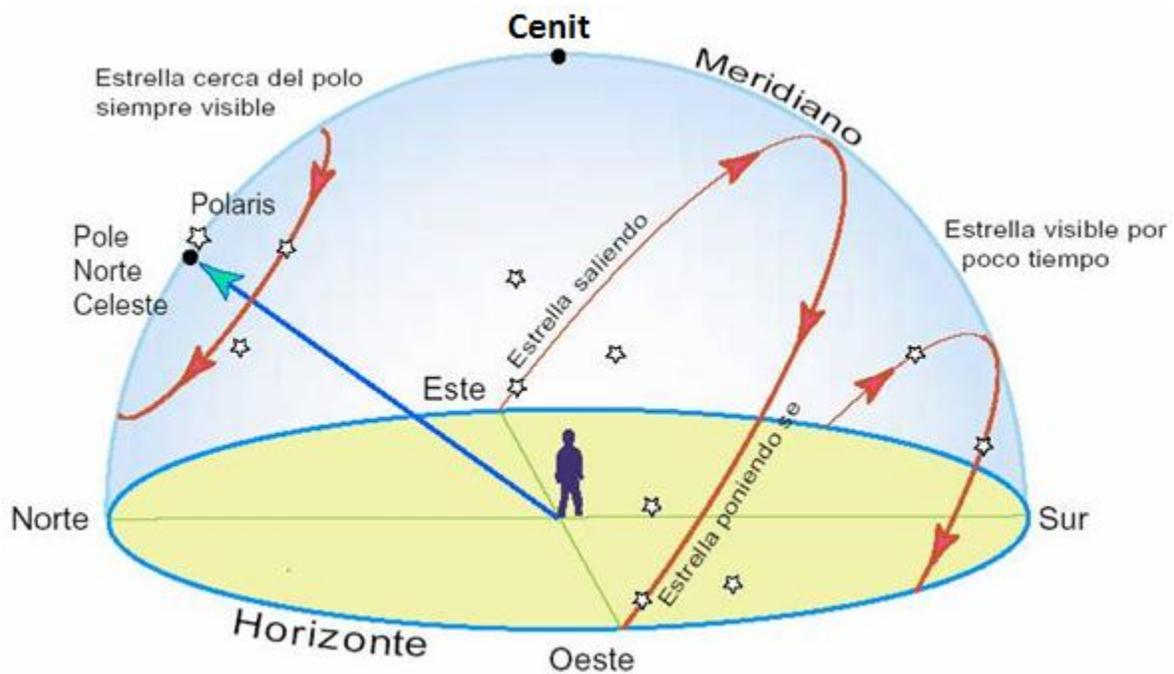


Figura 1.5 Esfera celeste.

### 1.1.3.3 Coordenadas terrestres.

Sobre la superficie de la esfera terrestre se puede describir la localización de un lugar usando dos conceptos conocidos como Latitud y Longitud. Solo es necesario conocer estas dos coordenadas, porque la superficie de la tierra es bidimensional.

Los paralelos son líneas imaginarias horizontales que tienen orientación Este- Oeste. Son perpendiculares al eje terrestre y disminuyen de tamaño al acercarse a los polos. La línea del ecuador se conoce como paralelo  $0^\circ$ , que divide a el planeta en dos mitades iguales: El hemisferio Norte y el hemisferio Sur. Los paralelos están numerados desde  $0^\circ$  en el ecuador hasta  $90^\circ$  en el polo Norte y  $90^\circ$  en el polo Sur.

Los paralelos más importantes son los círculos polares y los trópicos. El círculo polar ártico ( $66^\circ 33' N$ ) está el hemisferio norte y el círculo polar antártico ( $66^\circ 33' S$ ) está en el hemisferio sur.

El trópico de Cáncer ( $23^{\circ} 27' N$ ) se encuentra en el hemisferio Norte y el trópico de Capricornio ( $23^{\circ} 27' S$ ), en el hemisferio Sur. Los paralelos permiten determinar la latitud de un punto, es decir, su posición al Norte o al Sur del paralelo del Ecuador, que corresponde a  $0^{\circ}$ , paralelo elegido como de referencia. Por lo tanto, la latitud de un punto puede definirse como el arco de meridiano, medido en grados, entre el lugar considerado y el Ecuador, o bien, como la distancia entre el paralelo de un lugar y el Ecuador, tomado como origen.

La **Latitud** es la distancia medida en grados que separa un punto del ecuador. Esta latitud debe expresarse en grados hacia el Norte o hacia el Sur en función de dónde esté situado el punto respecto al Ecuador.

Los meridianos son líneas imaginarias verticales (o semicírculos) que van desde el Polo Norte al Polo Sur. Cada meridiano, con su respectivo antimeridiano, forma un círculo.

El meridiano de referencia es el meridiano  $0^{\circ}$ , o de Greenwich; su antimeridiano es el  $180^{\circ}$ . Ambos meridianos forman un círculo que divide a la Tierra en hemisferio occidental y hemisferio oriental. Los meridianos están numerados desde el  $0^{\circ}$  al  $180^{\circ}$ , hacia el este y hacia el oeste, completando  $360^{\circ}$  en total.

Los meridianos nos indican la longitud, que es la distancia medida en grados desde cualquier punto de la tierra al este o al oeste del meridiano  $0^{\circ}$ .

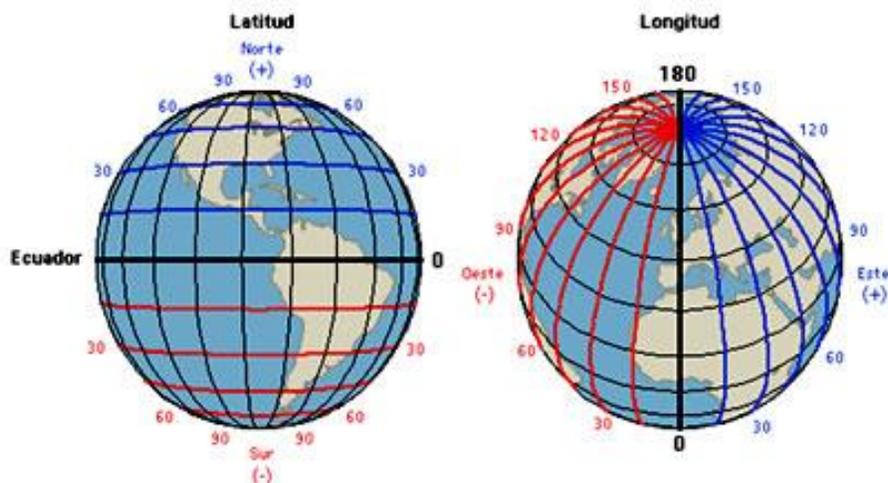


Figura 1.6 Paralelos terrestres y meridianos terrestres.

La **Longitud** es la distancia medida en grados que separa un punto de su meridiano de referencia. Esta longitud debe expresarse como grados hacia el Este ( $0$ - $180^{\circ}$  E) o hacia el

Oeste (0-180° W) en función de dónde esté situado el punto respecto al meridiano, este meridiano llamado Greenwich.<sup>10</sup>

#### **1.1.3.4 Movimientos terrestres.**

La Tierra está en continuo movimiento. Se desplaza, con el resto de planetas y cuerpos del Sistema Solar, girando alrededor del centro de nuestra galaxia, la Vía Láctea. Sin embargo, este movimiento afecta poco la vida cotidiana terrestre.

Más importante, para la humanidad, es el movimiento que efectúa describiendo su órbita alrededor del Sol, ya que determina el año y el cambio de estaciones. Y, aún más, la rotación de la Tierra alrededor de su propio eje, que provoca el día y la noche, que determina los horarios y biorritmos y que, en definitiva, forma parte inexcusable de las vidas de los seres vivos.

#### **1.1.3.5 Movimiento de traslación y la eclíptica.**

Por el movimiento de traslación la Tierra se mueve alrededor del Sol, impulsada por la gravitación, en 365 días, 5 horas y 57 minutos, equivalente a 365,2422 días, que es la duración del año. Nuestro planeta describe una trayectoria elíptica de 930 millones de kilómetros, a una distancia media del Sol de 150 millones de kilómetros. El Sol se encuentra en uno de los focos de la elipse. La distancia media Sol-Tierra es 1 AU. (Unidad Astronómica), que equivale a 149,675,000 km. Como resultado de ese larguísimo camino, la Tierra viaja a una velocidad de 29.5 kilómetros por segundo, recorriendo en una hora 106,000 kilómetros, o 2,544,000 kilómetros al día.<sup>11</sup>

La Eclíptica es la línea que describe el Sol en su recorrido aparente a través del cielo. El plano de Eclíptica es el plano que incluye la órbita de la Tierra alrededor del Sol y por tanto visto desde la Tierra incluye la línea antes mencionada. Este plano se encuentra inclinado unos 23.5° con respecto al plano del Ecuador terrestre en la figura 1.7.

La Eclíptica está dividida convencionalmente en 12 zonas en las que están situadas otras tantas constelaciones que constituyen el Zodíaco, de forma que aproximadamente cada mes el Sol recorre una de estas constelaciones zodiacales.

La Eclíptica intersecta con el ecuador celeste en dos puntos opuestos denominados equinoccios. Cuando el sol aparece por los equinoccios, la duración del día y de la noche es aproximadamente la misma en toda la Tierra (12 horas). Esto se produce alrededor de los días 21 de Marzo y 23 de Septiembre.

El punto de la Eclíptica más al norte respecto del ecuador celeste se denomina en el hemisferio norte solsticio de verano y el punto más al sur recibe la denominación de solsticio de invierno. Esto ocurre alrededor de los días 21 de Junio y 22 de Diciembre

---

<sup>10</sup> <http://www.portaleducativo.net/quinto-basico/687/Paralelos-y-meridianos>

<sup>11</sup> <http://www.astromia.com/tierraluna/movtierra.htm>

La órbita de la Luna está inclinada aproximadamente 5 grados respecto de la Eclíptica. Si durante la luna nueva o luna llena, ésta cruza la Eclíptica, se produce un eclipse, de sol o de luna respectivamente. Las órbitas de la mayor parte de los planetas del Sistema Solar están contenidas en el propio plano de la Eclíptica o muy próximas a ella, excepto Plutón que en 2006 perdió la categoría de planeta.<sup>12</sup>

Desde el equinoccio de primavera hasta el solsticio de verano la duración de la noche es cada vez menor, y hay cada vez más horas de luz. A partir del solsticio de verano las horas de luz se van reduciendo, hasta que en el equinoccio de otoño se igualan las horas de luz y de oscuridad, y en el solsticio de invierno se alcanza el máximo de horas de oscuridad. Los solsticios y los equinoccios son distintos en el hemisferio Norte terrestre y en el Sur, ya que mientras en un hemisferio se da el solsticio de verano, en el otro es el de invierno y al revés, y lo mismo sucede con los equinoccios.<sup>13</sup>



Figura 1.7 Eclíptica y movimientos de traslación solar.<sup>14</sup>

### 1.1.3.6 Movimiento de rotación.

Cada 24 horas (cada 23 h 56 minutos), la Tierra da una vuelta completa alrededor de un eje ideal que pasa por los polos. Gira en dirección Oeste-Este, en sentido directo, produciendo la impresión de que es el cielo el que gira alrededor de nuestro planeta. A este movimiento, denominado rotación, se debe la sucesión de días y noches, siendo de día el tiempo en que nuestro horizonte aparece iluminado por el Sol, y de noche cuando el horizonte permanece oculto a los rayos solares como se muestra en la figura 1.8.

La mitad del globo terrestre quedará iluminada, en dicha mitad es de día mientras que en el lado oscuro es de noche. En su movimiento de rotación, los distintos continentes pasan del día a la noche y de la noche al día.<sup>15</sup>

<sup>12</sup> [www.nreda2.com/enredados-en-la-ciencia/astro/astronomia/122-que-es-la-ecliptica.html](http://www.nreda2.com/enredados-en-la-ciencia/astro/astronomia/122-que-es-la-ecliptica.html)

<sup>13</sup> <http://recursos.cnice.mec.es/biosfera/alumno/1ESO/Astro/contenido12.htm>

<sup>14</sup> <http://www.nreda2.com/images/stories/contenidos/astro/astronomia/ecliptica-equinoccios-solticios.jpg>

<sup>15</sup> <http://www.astromia.com/tierraluna/movtierra.htm>



Figura 1.8 Movimiento de rotación.

### 1.1.3.7 Declinación solar.

Declinación solar es el ángulo entre la línea Sol-Tierra y el plano ecuatorial celeste (proyección del ecuador terrestre). El valor de la declinación solar varía a lo largo del año, de  $23.45^\circ$  (21 de junio), a  $-23.45^\circ$  (21 de diciembre), pasando por cero en los equinoccios de primavera y de otoño. En el caso de las zonas tropicales, cuando la declinación solar coincide con la latitud de una determinada zona tropical, la radiación solar incide perpendicularmente a la superficie terrestre. Durante los días próximos a esta coincidencia entre declinación solar y latitud (zonas tropicales), los Índices de radiación ultravioleta aumentan de manera significativa, particularmente si se presentan condiciones de cielo despejado o parcialmente nublado.<sup>16</sup>

Para la determinación de la declinación solar pueden consultarse las efemérides. También puede determinarse mediante la aplicación de fórmulas y expresiones aproximadas, que dan su valor con diversos grados de precisión reportados por numerosos autores, la más importante de ellas y la más ampliamente citada en la literatura solar corresponde a la de Spencer (1971). Quien presenta la siguiente ecuación (1.4) para calcular  $\delta$  en grados:

$$\delta = (0.006918 - 0.399912 \cos \Gamma + 0.070257 \sin \Gamma - \\ -0.006758 \cos 2\Gamma + 0.000907 \sin 2\Gamma - \\ -0.002697 \cos 3\Gamma + 0.00148 \sin 3\Gamma) \frac{180}{\pi} \quad (1.4)$$

$\delta$ : Declinación solar.

$\Gamma$ : Ángulo diario.

Ecuación (1.5) para calcular el ángulo diario en radianes.

<sup>16</sup> [https://es.wikipedia.org/wiki/Declinaci%C3%B3n\\_solar](https://es.wikipedia.org/wiki/Declinaci%C3%B3n_solar)

$$\Gamma = 2\pi \frac{(dn-1)}{365} \quad (1.5)$$

dn: Número de días

Otra expresión simple y comúnmente usadas para determinar la declinación (en grados), es la ecuación (1.6) de Perrin de Brichambaut (1975).<sup>17</sup>

$$\delta = \sin^{-1} \left\{ 0.4 \sin \left[ \frac{360}{365} (dn - 82) \right] \right\} \quad (1.6)$$

Y la ecuación (1.7) de Cooper (1969) en función del día año, que resulta menos aproximada.

$$\delta = 23.45 \sin \left[ 360 \cdot \frac{284+dn}{365} \right] \quad (1.7)$$

La ecuación de Cooper es bastante precisa pero cuando se requiere bastante precisión es preferible usar la ecuación de Spencer.

Para la ecuación de Spencer existen tablas\* donde se han calculado la declinación en los 365 días del año.

#### 1.1.3.8 Día solar.

En realidad el día solar equivale a algo más que una rotación, porque cuando el punto ha dado la vuelta completa no queda, como debiera, en la misma posición respecto del Sol. La razón de esto es que mientras efectuaba la rotación, la Tierra simultáneamente se trasladaba siguiendo su órbita alrededor del Sol. Cuando el punto de referencia completó su rotación la Tierra ya se trasladó casi 2,500,000 km, de modo que para volver a ver el Sol habrá que girar un poco más.

El día sideral o sidéreo, utilizado habitualmente por los astrónomos, también se basa en la rotación de la Tierra; pero en este caso se toma como referencia una estrella lejana (sideral viene del latín sidus que significa "astro").

Las estrellas están a tal distancia que los movimientos de la Tierra pierden comparativamente toda importancia y en consecuencia basta una rotación completa para que el punto de referencia vuelva a encontrarse exactamente frente a la misma estrella. Entonces, el día sideral es ligeramente más corto que el día solar, pues este último equivale a una rotación y algo más. La diferencia entre ambos es de alrededor de cuatro minutos: el día sideral tiene 23 horas, 56 minutos y 4.09054 segundos de día solar medio. El día solar real no es conveniente para uso cotidiano pues su duración varía.

<sup>17</sup> <http://tdx.cat/bitstream/handle/Calculo10803/6839/10Nvm10de17.pdf?sequence=11>

\* Ver anexo tablas de Spencer

En efecto, la órbita de la Tierra es una elipse, es decir, una especie de óvalo con dos centros o “focos”; en uno de dichos focos está el Sol; en el otro no hay nada. La Tierra se mueve más rápidamente cuando está más cerca del Sol perihelio que cuando su distancia al Sol es máxima. De modo que el ángulo extra para enfocar el Sol es variable. Por eso se utiliza un día promedio.

El día que medimos con nuestro reloj, a diferencia del día natural determinado por la salida y puesta del Sol, tiene una longitud constante. Se denominamos día solar medio, porque es el promedio de las duraciones de todos los días solares del año. En consecuencia, los días solares reales son a veces más cortos y a veces más largos que el día solar medio.

El día solar real, o intervalo entre dos pasos sucesivos del Sol por un mismo meridiano, pasa de un mínimo de 23 horas 59 minutos y 39 segundos en septiembre a 24 horas y 30 segundos en diciembre. Esta variación, igual para todos los puntos de la Tierra, no tiene nada que ver con las estaciones, que son opuestas en los hemisferios norte y sur. **El afelio** de la Tierra o punto en que se encuentra más alejada del Sol, tiene lugar a principios de julio de cada año, y **el perihelio** se encuentra más cerca del sol a principios de enero.<sup>18</sup>

#### 1.1.3.9 Ecuación del tiempo.

El día solar se define como el tiempo transcurrido entre dos pasos consecutivos del Sol por un meridiano y el momento en que esto ocurre, se denomina mediodía solar. Por definición, el día solar tiene 24 horas y el paso por el meridiano ocurre a las 12h solares. Con esta definición, el año terrestre tiene 365.24 días solares, todos iguales de 24 horas. El tiempo marcado por un reloj (y que representa la hora oficial o civil de un lugar) está basado pues en un Sol medio definido como un Sol ficticio que recorre el ecuador celeste a ritmo constante. Este tiempo se denomina tiempo solar medio.

La diferencia entre el tiempo solar verdadero y el tiempo solar medio se denomina **ecuación del tiempo**. A lo largo del año, la diferencia neta resulta ser nula por definición, pero durante el transcurso del año, puede ser tan grande como 16 minutos.

La ecuación del tiempo depende de la excentricidad de la órbita terrestre y de la inclinación de la eclíptica respecto al ecuador celeste. Así, cada planeta del Sistema Solar tiene una ecuación del tiempo diferente. En principio, midiendo la ecuación del tiempo podrían determinarse la excentricidad de la órbita y la inclinación de la misma respecto al ecuador.<sup>19</sup>

Spencer (1971) propuso la siguiente ecuación (1.8) para calcular la ecuación del tiempo (en minutos). Existen otras expresiones para cálculo pero una de la más precisa es la ecuación de Spencer.

---

<sup>18</sup> [http://historiaybiografias.com/dia\\_solar/](http://historiaybiografias.com/dia_solar/)

<sup>19</sup> [http://personales.unican.es/lopezqm/fbe/laspracticasmecanicaFBE\\_pdf/exp\\_aula/4\\_EcuacionDelTiempo.pdf](http://personales.unican.es/lopezqm/fbe/laspracticasmecanicaFBE_pdf/exp_aula/4_EcuacionDelTiempo.pdf)

$$E_t = (0.00075 + 0.001868 \cos \Gamma - 0.032077 \sin \Gamma - 0.014615 \cos 2\Gamma - 0.04089 \sin 2\Gamma)(229.18) \quad (1.8)$$

$\Gamma$ : Angulo diario.

### 1.1.3.10 Tiempo solar verdadero.

**Día solar** es el intervalo de tiempo en que el Sol realiza una revolución completa alrededor de un observador estacionario situado en la Tierra.

Un observador situado en el hemisferio Norte mirando hacia el sur que ponga en hora a mediodía solar (cuando el sol está directamente sobre el meridiano local) un reloj que marcha uniformemente, puede encontrarse con que cuando el reloj indique de nuevo que es mediodía, el sol no está exactamente sobre el meridiano local.

El día solar varía a lo largo del año por las dos razones siguientes:

- La Tierra barre áreas desiguales en el plano de la eclíptica a medida que se mueve en torno al Sol.
- El eje de la Tierra está inclinado respecto al plano de la eclíptica.

Estas variaciones producen desviaciones estacionales de hasta 16 minutos de la media por año y por día se estima aproximadamente 2.63 segundos variación.

**Día solar medio** es el promedio de la duración de los días solares y corresponde al movimiento de un Sol ficticio (el Sol medio) cuyo movimiento aparente discurriese en el plano del ecuador y alrededor del cual la Tierra describiese una órbita con velocidad constante.<sup>20</sup> Los datos de irradiación solar son generalmente registrados en base al tiempo local aparente (LAT) o tiempo solar verdadero. Así mismo, algunos datos meteorológicos a menudo son registrados en base al tiempo de reloj local o tiempo civil o tiempo medio (LMT). Por esta razón es necesario convertir el tiempo civil en tiempo aparente, para realizar esta conversión es necesario conocer el meridiano central de uso horario de la zona a analizar.

Conversión del tiempo medio a tiempo aparente con la siguiente ecuación (1.9).

$$LAT = LMT + \text{Corrección por longitud} + E_t \quad (1.9)$$

Corrección por longitud ecuación (1.10).

$$\text{Corrección por longitud} = 4 * (L_s - L_e) \quad (1.10)$$

---

<sup>20</sup> FA0405 Tema01 Mov Tierra

Ls: Longitud estándar (meridiano estándar o central del huso horario).

Le: longitud local

La número 4 en la ecuación (1.7) representa corrección por longitud en minutos por cada grado, también expresa la diferencia entre los meridianos locales y estándar. Debe hacerse notar que la corrección por longitud es positiva si el meridiano local es al este del meridiano estándar y negativo si está al oeste del meridiano estándar.

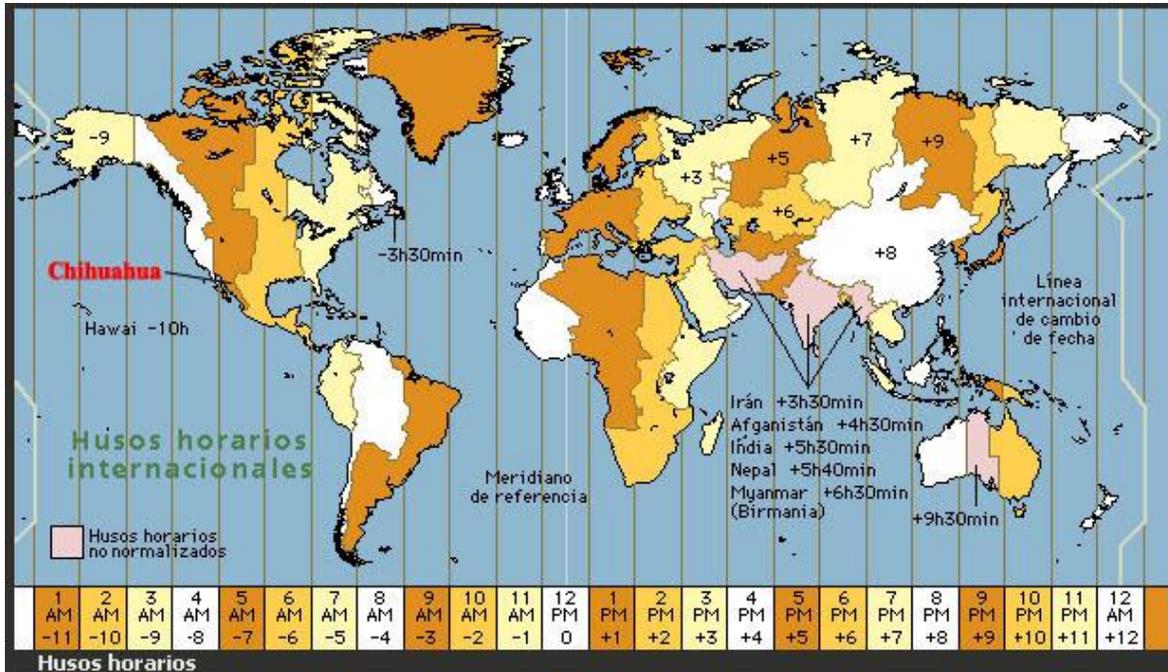


Figura 1.9 Hora solar estándar.<sup>21</sup>

En la figura 1.9 Se refiere a la hora del meridiano de referencia de cada zona. Todos los meridianos estándar son múltiplos de 15° al E o al W de Greenwich.

### 1.1.3.11 Posición del sol respecto a superficies horizontales.

Para calcular la irradiación solar que llega a una superficie horizontal sobre la superficie de la tierra, es necesario escribir las relaciones trigonométricas entre la posición del sol y del cielo y las coordenadas ecuatoriales sobre la tierra. Se puede ubicar un observador en la tierra dibujando una esfera celestrial como en la figura 1.10.

Desde un punto de vista simplemente perceptual, nuestra sola ubicación espacial define un plano horizontal y una superficie esférica con centro "aquí" que se llama el cielo local. La intersección del cielo local con el plano horizontal es el círculo del horizonte, en donde a modo de referencia, se ubican los puntos cardinales.<sup>22</sup>

<sup>21</sup> Departamento de Física Aplicada UCLM

<sup>22</sup> <https://materialidad2013.files.wordpress.com/2013/06/conceptos.pdf>

**El Cenit** es el punto de la esfera celeste situado en la vertical del observador, que corresponde, en vertical a un lugar determinado de la Tierra. Es el punto más elevado sobre la cabeza del observador.

El círculo máximo vertical que es la traza de un plano que pasa por el norte, el cenit y el sur se llama **meridiano local** es donde hace el recorrido el sol en su rotación. El sol sale en un punto del cuadrante este y que se pone en el cuadrante oeste alcanzando su mayor altura a mediodía solar no necesariamente es 12:00 del tiempo medio o tiempo civil. Cuando esto sucede el sol cruza el meridiano local y esto se le llama **culminación**.

El sol varía a lo largo del año modificando el lugar donde nace y se pone la duración y la permanencia sobre el horizonte y la culminación, siendo estos dos últimos mayores en verano que en invierno.

#### **Φ: Latitud**

**α: Elevación solar** es el ángulo entre la dirección del sol y el horizonte ideal y varía de 0 grados (horizonte) a 90 grados (Cenit).

La elevación máxima es cuando el ángulo horario es igual a cero y se puede calcular con la siguiente ecuación (1.11).

$$\alpha_{max} = 90^\circ + \delta - \phi . \quad (1.11)$$

**θ<sub>z</sub>: Ángulo cenital** varía de 0 grados (Cenit) a 90 grados (horizonte)

**Ψ : Acimut** es un ángulo. Se mide entre el Norte geográfico o Norte cardinal de La Tierra y la proyección sobre el horizonte del cuerpo celeste que se esté observando. El ángulo siempre se mide en sentido de las agujas del reloj este ángulo varia 0 grados (sur) a 180 grados (norte), el ángulo es positivo hacia el Este y negativo hacia el Oeste.

**ω: Ángulo horario** Varía de 0° (Sol culminando el meridiano) a un valor dependiente del día del año y la latitud. Signo: positivo antes del mediodía solar, negativo después del mediodía solar

**ω<sub>s</sub>: ángulo horario a la salida del Sol** Valor dependiente del día del año y la latitud

Existen ecuaciones donde se pueden calcular todos estos ángulos que describen la geometría solar.

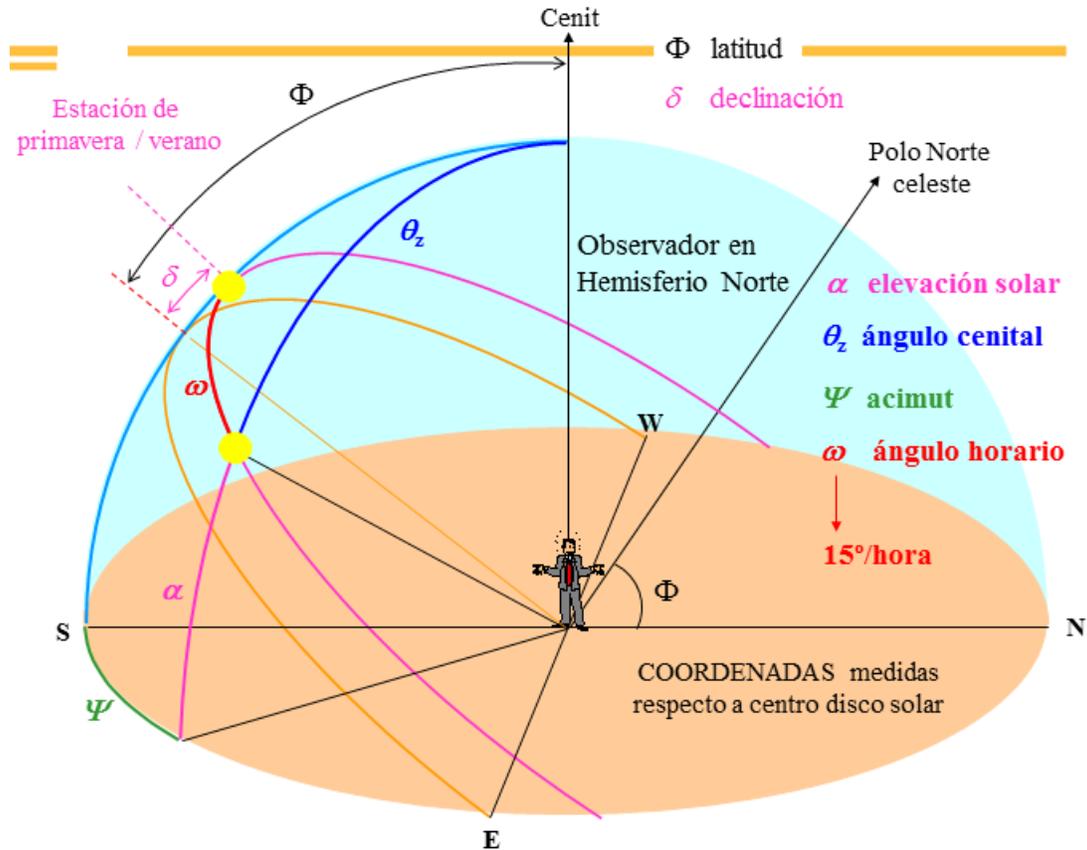


Figura 1.10 Posición del sol respecto a superficies horizontales.<sup>23</sup>

Ecuación (1.12) para calcular ángulo cenital en función de la elevación solar, declinación latitud y ángulo horario.

$$\cos \theta_z = \sin \delta \cdot \sin \phi + \cos \delta \cdot \cos \phi \cdot \cos \omega = \sin \alpha \quad (1.12)$$

Con esta ecuación (1.13) se calcular el ángulo acimutal en función de la elevación solar, declinación y latitud

$$\cos \Psi = \frac{\sin \alpha \cdot \sin \phi - \sin \delta}{\cos \alpha \cdot \cos \phi} \quad (1.13)$$

Con esta ecuación (1.14) se calcula el ángulo horario a la salida del sol en función de la declinación y latitud.

$$\cos \omega_s = \frac{-\sin \delta \cdot \sin \phi}{\cos \delta \cdot \cos \phi} = -\tan \delta \cdot \tan \phi \quad (1.14)$$

<sup>23</sup> Departamento de Física Aplicada UCLM

#### 1.1.4 La irradiación.

La irradiación también conocida como insolación se refiere a la cantidad de energía solar recibida durante un determinado periodo de tiempo.

A la Insolación se le conoce como a la acumulación de energía promedio durante un período de tiempo. Es la misma irradiancia pero considerando un tiempo promedio de permanencia sobre una superficie.

Las unidades que se emplean para este concepto son las unidades de energía por unidades de área.

Unidades de Insolación: Langley ( $\text{cal}/\text{cm}^2$ ),  $\text{MJ}/\text{m}^2$ ,  $\text{Btu}/\text{ft}^2$ ,  $\text{kWh}/\text{m}^2$ .

##### 1.1.4.1 Tipos de Irradiancia.

Existen tres tipos de irradiancia solares las cuales están relacionadas al objeto que recibe radiación entre la posición del objeto en la superficie terrestre.

**Directa:** llega directamente del sol sin haber sufrido cambio alguno en su dirección. Se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan.

**Difusa:** Parte de la radiación que atraviesa la atmósfera es reflejada por las nubes o absorbida por éstas. Esta radiación se denomina difusa, va en todas las direcciones, como consecuencia de las reflexiones y absorciones, no solo de las nubes sino de las partículas de polvo atmosférico, montañas, etc. Este tipo de radiación se caracteriza por no producir sombra alguna respecto a los objetos opacos interpuestos.

**Reflejada:** Es aquella reflejada por la superficie terrestre. La cantidad de radiación depende del coeficiente de reflexión de la superficie. Las superficies verticales son las que más radiación reflejada reciben.

**Global:** Es la radiación total. Es la suma de las tres radiaciones como se muestra en la ecuación (1.15) en la figura 1.11 se muestra los tipos de irradiancia que forman la Global.<sup>24</sup>

$$\mathbf{Irradiancia\ Global = Directa + Difusa + Reflejada} \quad (1.15)$$

---

<sup>24</sup> <http://www.oni.esuelas.edu.ar/2008/CORDOBA/1324/trabajo/radiacionsolar.html>

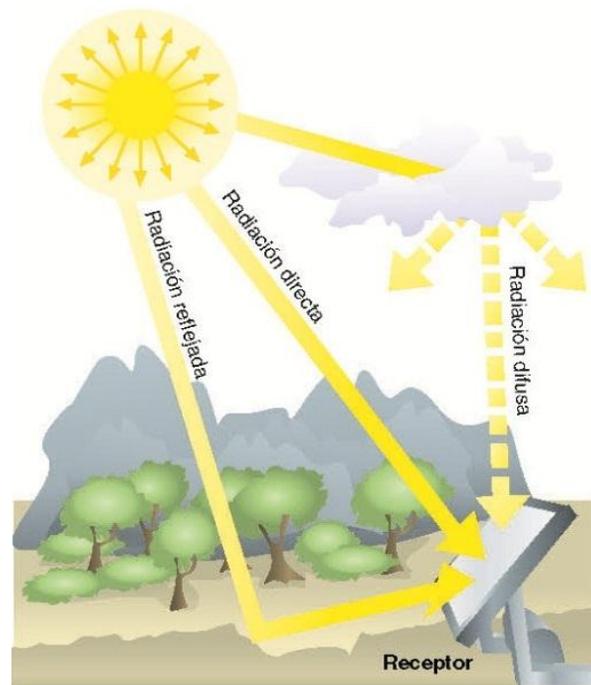


Figura 1.11 Tipos de irradiación.<sup>25</sup>

### 1.1.5 Irradiancia solar

Término que se usa para determinar la cantidad de energía que se capta en un área y tiempo, la cantidad de radiación solar que cae en una superficie terrestre.

**La irradiancia** es la magnitud utilizada para describir la potencia incidente por unidad de superficie de todo tipo de radiación electromagnética. No hay un valor único de irradiancia debido a que la distancia Tierra-Sol no es constante además que la Radiación Solar disminuye o aumenta con la distancia y la trayectoria elíptica Tierra-Sol.

Irradiancia es la Potencia de la radiación incidente sobre una superficie por lo que la Unidad de la Irradiancia es igual a  $\text{kW/m}^2$ . La diferencia con el término "Irradiación" que es la energía por unidad de superficie:  $\text{kWh/m}^2$ .<sup>26</sup>

Comportamiento de la irradiancia en un día normal y un día nublado en la figura 1.12. En un día despejado la radiación directa es la máxima componente que recibe un captador. En un día nublado, la componente máxima corresponde a la difusa.

<sup>25</sup> <http://calculationsolar.com/blog/>

<sup>26</sup> <http://eliseosebastian.tumblr.com/post/53530683135/radiaci%C3%B3n-solar-irradiancia-e-insolaci%C3%B3n>

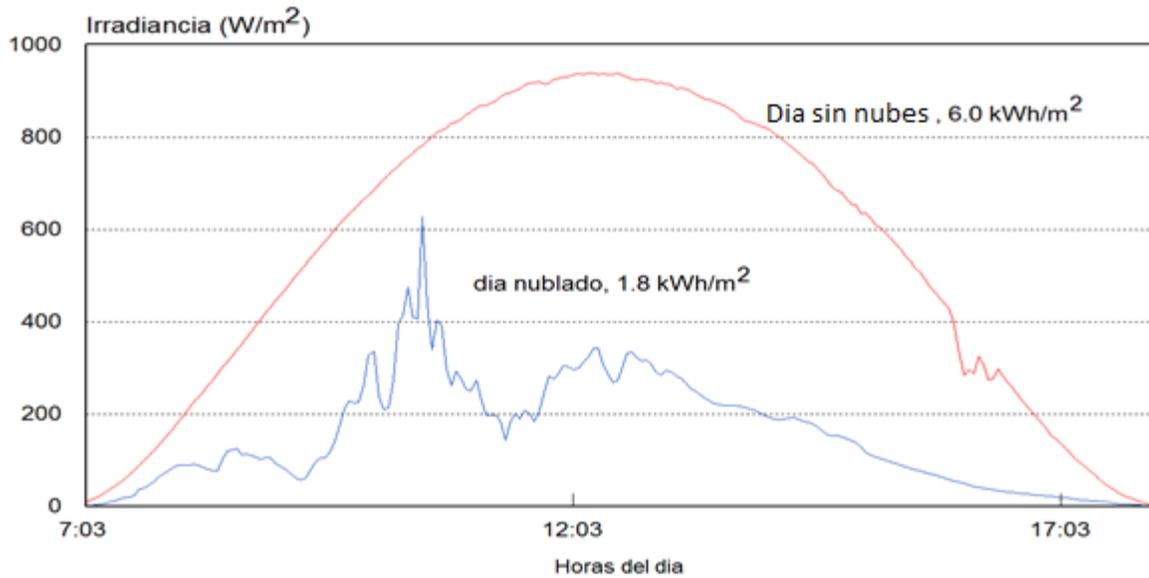


Figura 1.12 Comportamiento de la irradiancia.<sup>27</sup>

### 1.1.6 Hora Solar Pico (HSP).

Para casos de los diversos trabajos, proyectos, ejecuciones de instalación de energía solar, los técnicos e ingenieros vienen utilizando bastante esta expresión de Hora Solar Pico dando a entender la Mayor Insolación en un área o ciudad y en un tiempo o período de tiempo conocido.

Si consideramos que un panel fotovoltaico horizontal puede recibir una irradiancia directa aproximada de  $1000 \text{ W/m}^2$  en condiciones de buen día claro, al nivel del mar, con un sol radiante en el Cenit del panel, por convención se considera llamar esto un **pico de la irradiancia al valor de  $1,000 \text{ W/m}^2$** .

Por lo tanto, a la cantidad de insolación recibida en un panel solar fotovoltaico o cualquier captador solar en un tiempo de una hora se le conoce con el nombre de **hora solar pico** o simplemente hora pico cuyas unidades generalizadas son como sigue, para el cálculo de HSP podemos utilizar la siguiente ecuación 1.16.

$$1 \text{ hora solar pico} = 1000 \text{ Wh/m}^2$$

Esta unidad denominada hora solar pico es muy usada en el campo de la energía solar fotovoltaica y su conocimiento resulta útil en el análisis de sistemas fotovoltaicos, como los instalados especialmente en las zonas rurales.<sup>28</sup>

$$HSP = \frac{\text{Irradiancia Diaria}}{1000 \text{ W/m}^2} \quad (1.16)$$

<sup>27</sup> Cátedra de fotovoltaicos UES

<sup>28</sup> <http://eliseosebastian.tumblr.com/post/53530683135/radiaci%C3%B3n-solar-irradiancia-e-insolaci%C3%B3n>

### 1.1.7 El Brillo solar

El brillo solar se expresa como el número de horas en las cuales el sol brilla en una superficie específica. El total de horas de brillo solar de un lugar es uno de los factores que determinan el clima de esa localidad. Este elemento meteorológico es importante en casi todas las formas de actividad y empresas humanas. Sectores como el agrícola, forestal, turismo, construcción, deportes y energía, dependen y planifican aspectos del cumplimiento de sus programas y actividades futuras sobre la perspectiva de disponer de suficiente horas de brillo solar durante el día.

Este valor cambia con diferentes factores, tales como: las estaciones climáticas presentes en el lugar de estudio, las coordenadas geográficas, variables como la precisión de los aparatos de medición entre otro.

Para el parámetro de luz solar existen tres tipos de bandas: la curva larga, corta y recta en la figura 1.13. Cada una de estas bandas se coloca en el heliógrafo<sup>11</sup> en distintas épocas de año seleccionadas de acuerdo al desplazamiento y orientación del sol. Cada una de las bandas está dividida de manera horaria en el rango de las 6 a las 18 horas.

- Desde comienzos de marzo hasta mediados de abril y desde comienzos de septiembre hasta mediados de octubre (alrededor de cada equinoccio<sup>12</sup>) se utilizan bandas rectas. Son llamadas bandas equinociales y se acoplan a las ranuras centrales del soporte.
- Desde octubre hasta fin de febrero se utilizan bandas curvadas cortas, que se colocan en las ranuras superiores.
- El resto del año, de abril hasta agosto, se usan bandas curvadas medianas, colocadas entre las ranuras inferiores.<sup>29</sup>



Figura 1.13 Bandas para medir brillo solar.

<sup>29</sup> <http://es.slideshare.net/gabygamezramos/instrumentos-para-medir-el-clima-y-la-humedad>

La heliofanía representa la duración del brillo solar u horas de sol, y está ligada al hecho de que el instrumento utilizado para su medición, heliofanógrafo, registra el tiempo en que recibe la radiación solar directa.

## **1.2 Temperatura y humedad relativa.**

### **1.2.1 Temperatura.**

La Temperatura es una magnitud que mide el nivel térmico o el calor que un cuerpo posee. Toda sustancia en determinado estado de agregación (sólido, líquido o gas), está constituida por moléculas que se encuentran en continuo movimiento. La suma de las energías de todas las moléculas del cuerpo se conoce como energía térmica; y la temperatura es la medida de esa energía promedio.

La temperatura se mide con un aparato de precisión llamado termómetro, el cual se basa del volumen de una masa fija de fluido, que suele ser mercurio o alcohol. Estos elementos bajan o suben en una escala graduada cuando la temperatura disminuye o aumenta, respectivamente.

Escalas que sirven para medir temperatura son la escala Celsius, Fahrenheit y Kelvins.

#### **Escala Celsius**

La escala Celsius fue inventada en 1742 por el astrónomo sueco Andrés Celsius. Esta escala divide el rango entre las temperaturas de congelación y de ebullición del agua en 100 partes iguales. Anteriormente se denominaba como grados centígrados, hasta 1960 se estableció como grados Celsius por el Sistema Internacional (SI). Las temperaturas en la escala Celsius son conocidas como grados Celsius (°C).

#### **Escala Fahrenheit**

La escala Fahrenheit fue establecida por el físico holandés-alemán Gabriel Daniel Fahrenheit, en 1724. Aun cuando muchos países están usando ya la escala Celsius, la escala Fahrenheit es ampliamente usada en los Estados Unidos. Esta escala divide la diferencia entre los puntos de fusión y de ebullición del agua en 180 intervalos iguales. Las temperaturas en la escala Fahrenheit son conocidas como grados Fahrenheit (F).

#### **Escala de Kelvin**

La escala de Kelvin lleva el nombre de William Thompson Kelvin, un físico británico que la diseñó en 1848. Prolonga la escala Celsius hasta el cero absoluto, una temperatura hipotética caracterizada por una ausencia completa de energía calórica. Las temperaturas en esta escala son llamadas Kelvin (K).

Ecuaciones de conversión para las diferentes escalas la ecuación 1.17 sirve para convertir grados Celsius a grados Fahrenheit, la ecuación 1.18 convierte de grados Celsius a grados Kelvins y la ecuación (1.19) convierte de grados Kelvin a grados Fahrenheit.

$$^{\circ}F = ^{\circ}C * 1.8 + 32 \quad (1.17)$$

$$K = ^{\circ}C + 273.15 \quad (1.18)$$

$$K = \frac{5}{9}(^{\circ}F - 32) + 273.15 \quad (1.19)$$

### **1.2.2 Temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco.**

Para medir la temperatura se usa el termómetro básico o el más habitual que se conoce con un tubo capilar cerrado que contiene un bulbo con una cierta cantidad de mercurio o alcohol, con lo cual se dilata en el aumento de temperatura y se contrae al disminuir y su lectura se observa en la escala graduada del termómetro.

Al utilizar dos termómetros, uno como bulbo seco y otro como bulbo húmedo podemos obtener lecturas de humedad relativa con la ayuda de procesos matemáticos.

#### **Termómetro bulbo húmedo.**

Los termómetros de bulbo húmedo en que su bulbo está envuelto en un paño húmedo en el cual el termómetro presentara lecturas bajas de enfriamiento también por el incremento de temperatura el agua del paño se evaporara. La temperatura de un bulbo húmedo siempre será inferior a la temperatura del bulbo seco debido que el paño húmedo causara este enfriamiento. Si el aire está saturado de vapor de agua al 100% de humedad relativa, las temperaturas de ambos termómetros de bulbo húmedo y seco serán iguales.

#### **Temperatura bulbo seco.**

La temperatura del bulbo seco es la que se mide con un termómetro normal y el contenido del vapor del aire no afecta la lectura, la temperatura es la del ambiente.

Con lecturas de ambos termómetros se obtiene la humedad relativa y otros parámetros referentes al aire húmedo con la ayuda de una gráfica llamada carta psicrométrica.

Esta carta se usa comúnmente para las aplicaciones del acondicionamiento del aire, esta carta es un diagrama en la cual se mezclan varios parámetros con relación al aire húmedo como los son la temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco, la humedad relativa y absoluta, punto de rocío, entalpía específica o calor total.

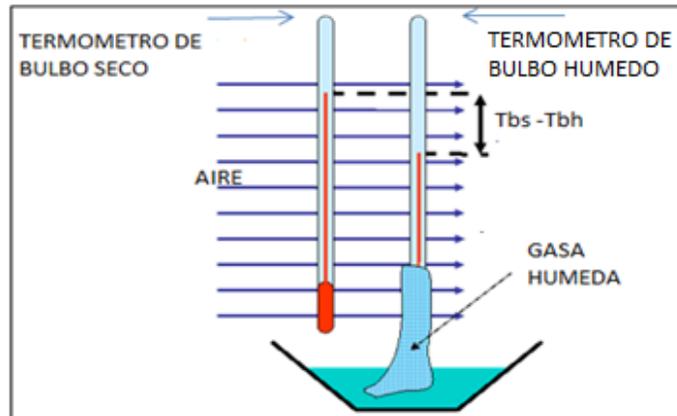


Figura 1.14 Termómetro para temperatura bulbo seco y húmedo.<sup>30</sup>

### 1.2.3 Humedad relativa.

Medir la humedad relativa no es tarea fácil. La forma más sencilla es medir lo que se conoce como temperatura de bulbo seco y temperatura de bulbo húmedo mencionado anteriormente.

La carta psicrométrica es una buena opción para calcular humedad relativa, esta carta es un diagrama en la cual se mezclan varios parámetros con relación al aire húmedo como los son la temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco, la humedad relativa y absoluta, punto de rocío, entalpía específica o calor total, y entre otros pero para este trabajo se requiere solo la humedad relativa y temperatura de bulbo seco y húmedo. Es importante mencionar que los datos de las cartas psicrométrica pueden variar según la altura sobre el nivel del mar, la mayoría de las cartas se encuentran conforme al nivel del mar.<sup>31</sup>

La humedad relativa (HR): es la proporción de vapor de agua real en el aire comparada con la cantidad de vapor de agua necesaria para la saturación a la temperatura correspondiente. Indica qué tan cerca está el aire de la saturación. Se mide en porcentaje entre 0 y 100, donde el 0 % significa aire completamente seco y 100% aire saturado.

Humedad absoluta (HA): es la cantidad de vapor de agua contenida en un  $m^3$  de aire. Puede expresarse en  $g/m^3$ .

Saturación: a una masa de aire con una cierta temperatura se le dice saturada cuando contiene la máxima cantidad de vapor de agua que puede estar presente con una cierta temperatura y una cierta presión. Si se aumenta la cantidad de vapor de agua o se baja la temperatura del aire, el vapor condensa y vuelve al estado líquido.

Para calcular matemáticamente la humedad relativa se necesita conocer los conceptos anteriores humedad absoluta y Saturación como se muestra la ecuación (1.19).

<sup>30</sup> <http://www.torresderefrigeracion.org/>

<sup>31</sup> Anexo, carta psicrométrica.

$$R = \frac{HA}{\text{Cantidad de saturacion}} * 100 \quad (1.19)$$

HA: es la masa de vapor real que tiene el aire (Humedad Relativa).

Cantidad de saturación: Es la masa de vapor que contiene el aire cuando ese aire está saturado de vapor (masa de vapor máxima).

#### **1.2.3.1 El Higrómetro.**

El instrumento para medir humedad relativa es el higrómetro es el instrumento utilizado para medir la humedad relativa (HR) del aire. Los higrómetros a menudo están disponibles en versiones que también miden la temperatura.

#### **El principio de funcionamiento del higrómetro electrónico.**

La humedad hace que el dieléctrico se dilate, distanciando así las placas con la consecuente variación de la geometría del capacitador y la reducción de su capacitancia. Estas variaciones de capacitancia a su vez causan un cambio de frecuencia en los componentes electrónicos del instrumento, que resulta en una modulación de frecuencia la cual es una función de la humedad relativa. La frecuencia se convierte entonces en voltaje, que se convierte en un valor de humedad relativa.

### **1.3 El recurso solar en El Salvador**

#### **1.3.1 Generalidades de El Salvador**

El Salvador está ubicado en América Central con un área territorial de 20,720 km<sup>2</sup> uno de los países más pequeños de Centro América es colindante con las fronteras de Guatemala y Honduras y limitado por el Océano pacifico sus coordenadas terrestres y zona horarias son las siguientes que se muestran en la tabla 1.3.

El Salvador posee un clima tropical, muy caluroso, especialmente en la costa pacífica. Las temperaturas bajan a medida que uno se adentra en el interior del país. Hay dos estaciones fundamentales: la de sequía de noviembre a abril y la temporada de lluvias que abarca de mayo a octubre. Otra característica de los trópicos exteriores son los vientos Alisios que predominan procedentes del sector Noreste. El país presenta un buen desarrollo del sistema de brisas de mar en las planicies costeras, moviéndose hacia los valles y planicies internas después del mediodía. También son típicos los máximos en la actividad lluviosa unas semanas después del paso del sol sobre el cenit. Al mediodía el sol brilla perpendicularmente, no proyecta sombra. Una característica especial del clima de Centroamérica son los vientos nortes que transportan masas de aire fresco hacia la región.

<b>Latitud:</b>	<b>13.8333000 N</b>
<b>Longitud:</b>	<b>88.9167000 W</b>
<b>Zona horaria:</b>	<b>UT-6:00</b>

Tabla 1.3 Latitud, longitud y zona horaria de El Salvador.

### 1.3.2 Antecedentes meteorológicas en El Salvador

El promedio de temperatura media anual para 2015 censada en 24 estaciones en tres zonas con rangos de altura diferentes fue de **24.2 °C**, mayor a la normal **23.8 °C**. En la estación de Acajutla departamento de Sonsonate, se registró el mayor promedio de la temperatura ambiente anual, correspondiente a 29.0 °C, siendo mayor a su promedio normal 27.7 °C. En cambio, en la estación de Las Pilas se presentó el menor promedio de temperatura ambiente, con 16.1 °C, siendo menor a su valor normal, 16.2 °C.

En cuanto a los promedios que resultaron inferiores a su normal climatológica, se contó con los registrados en la estación de Cerrón Grande, que mostró una anomalía negativa de 0.7 °C. En cambio la mayor anomalía positiva se dio en la estación de Chiltiupan con 1.5 °C.

En la mayoría de estaciones, la humedad relativa fue menor que sus normales climatológicas. El menor promedio anual se registró en Cerrón Grande con **63 %** siendo este menor a su normal climatológica 72 % y el mayor promedio anual de humedad se presentó en La Finca Los Naranjos con 89 %, siendo mayor que su normal 82 %.

En términos generales la cantidad de estaciones que presentaron anomalías positivas es menor a las negativas, diferente a los años anteriores 2007-2013. La mayor anomalía anual positiva se registró en Los Naranjos con 6 % y la menor anomalía anual negativa en Cerrón Grande con 9%.

### 1.3.3 Energía solar en El Salvador

Cada año el sol arroja cuatro mil veces más energía que la que consumimos, por lo que su potencial es prácticamente ilimitado.

La intensidad de energía disponible en un punto determinado de la tierra depende, del día del año, de la hora y de la latitud. Además, la cantidad de energía que puede recogerse depende de la orientación del dispositivo receptor.

Actualmente es una de las energías renovables más desarrolladas y usadas en todo el mundo. En la región central del área metropolitana de El Salvador la irradiación solar es alta (5.3 kWh/m<sup>2</sup>/día), en comparación con la de otros países como Alemania o Tokio (3.3 kWh/m<sup>2</sup>/día).<sup>32</sup> A continuación mapa de irradiación solar en el salvador. En la figura 1.15

<sup>32</sup> <http://www.efutura.net/energia-solar-2/>

se muestra el mapa de irradiación solar promedio de un año de El Salvador creado bajo el proyecto SWERA, en la cual se observa que en las planicies costeras de las zonas central, para central y oriental del país, las cantidades son mayores de 5.00 y para San Salvador de 5.20 Kwh/m<sup>2</sup>/día.

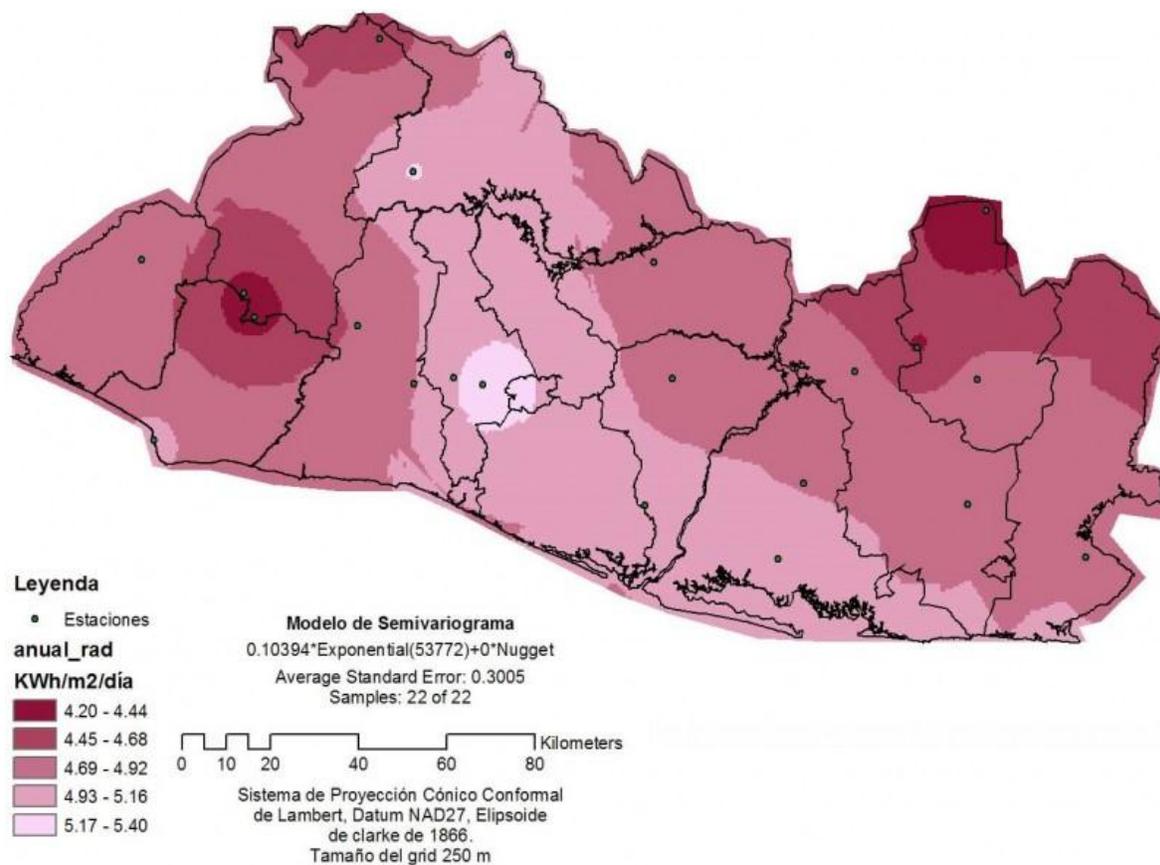


Figura 1.15 Mapa de radiación solar en El Salvador.<sup>33</sup>

En la tabla 1.4 se muestran datos de radiación promedio mensual y anual tomada en 21 diferentes estaciones meteorológicas del país las sus unidades (kWh/m<sup>2</sup>/día). Estos datos son posibles por el Servicio Nacional de Estudios Territoriales (SNET/MARN) con el proyecto SWERA con ayuda del estudio de solarimetría realizados por la Universidad de El Salvador en el año 1986 -1987 financiado por OEA.

<sup>33</sup> proyecto SWERA y el MARN

Departamento	Estación	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep	Oct	Nov	Dic	Anual
<b>Sonsonate</b>	Acajutla	4.81	5.24	5.52	5.41	4.95	4.76	5.18	5.06	4.66	4.57	4.63	4.56	4.95
<b>San Vicente</b>	Sta. Cruz Porrillo	4.75	5.23	5.51	5.36	4.99	4.76	5.21	5.21	4.71	4.60	4.65	4.57	4.96
<b>Usulután</b>	Beneficio la Carrera	4.91	5.35	5.54	5.20	4.82	4.80	5.38	5.42	4.82	4.81	4.77	4.69	5.04
<b>San Miguel</b>	San Miguel	4.65	5.20	5.51	5.37	4.91	4.70	5.16	5.23	4.64	4.60	4.45	4.50	4.91
<b>La Unión</b>	La Unión	4.77	5.18	5.52	5.27	4.85	5.02	5.29	5.00	4.85	4.74	4.53	4.55	4.96
<b>San Miguel</b>	Sesori	4.69	5.23	5.50	5.28	4.77	4.60	5.04	4.88	4.34	4.32	4.42	4.44	4.79
<b>Cabañas</b>	Cerrón Grande	4.76	5.20	5.76	5.57	5.17	4.99	5.44	5.40	4.84	4.81	4.69	4.59	5.10
<b>Morazán</b>	San Francisco Gotera	4.92	5.48	5.74	5.64	5.14	5.07	5.46	5.43	5.01	4.90	4.79	4.71	5.19
<b>Chalatenango</b>	Nueva Concepción	4.78	5.26	5.56	5.47	5.10	5.12	5.38	5.42	4.97	4.96	4.76	4.51	5.11
<b>La Libertad</b>	San Andrés	5.06	5.49	5.75	5.65	5.29	5.04	5.64	5.44	4.81	4.75	4.85	4.83	5.22
<b>San Vicente</b>	Apastepeque	4.60	5.18	5.32	5.11	4.82	4.66	5.12	5.14	4.57	4.46	4.56	4.38	4.83
<b>San Salvador</b>	Estación Matriz	5.03	5.52	6.08	5.77	5.19	5.23	5.89	5.64	4.87	4.75	4.98	4.77	5.31
<b>San Salvador</b>	Observatorio	4.77	5.18	5.47	5.34	4.73	4.71	5.44	5.09	4.63	4.67	4.78	4.60	4.95
<b>Ahuachapán</b>	Ahuachapán	5.6	5.48	5.82	5.69	5.25	5.04	5.56	5.30	4.61	4.79	4.93	4.83	5.24
<b>Usulután</b>	Santiago de María	5.9	5.61	5.92	5.68	5.14	4.81	5.54	5.45	4.71	4.67	4.82	4.88	5.26
<b>La Libertad</b>	Santa Tecla	5.4	5.45	5.76	5.46	4.92	4.61	5.31	5.14	4.55	4.50	4.76	4.80	5.06
<b>San Miguel</b>	Cerro Cacahuatique	4.56	5.20	5.45	4.54	3.71	3.73	4.89	4.67	3.99	3.89	4.18	4.04	4.40
<b>Santa Ana</b>	Finca los Andes	3.81	4.49	4.97	4.77	3.85	3.42	4.30	4.04	3.34	3.19	3.28	3.30	3.90

Tabla 1.4 Radiación promedio (KWh/m<sup>2</sup>/día).<sup>34</sup>

<sup>34</sup> Proyecto SWERA y solarimetría.

## 1.4 Instrumentos de medida de Radiación Solar.

A la hora de evaluar las distintas variables climáticas de un lugar o región es necesario disponer de una buena estación de medida para la correcta toma de datos. Así mismo, el cálculo de la disponibilidad energética solar en un determinado lugar hace indispensable la medida de variables radiactivas. Hay varias medidas que se pueden realizar a la hora de evaluar la meteorología o la disponibilidad energética de un lugar. Pueden ser variables radiométricas, tales como radiación global, térmica, ultravioleta o pueden ser variables que den cuenta de las características meteorológicas de un lugar, como puedan ser la temperatura, velocidad del viento, humedad.

La forma principal de actuación de estos sensores es la conversión de la energía proveniente del sol en otro tipo de energía, principalmente eléctrica, de forma que esta última pueda ser medida de una forma mucho más sencilla. Esta energía dependerá de la inclinación, y en su caso de la orientación, en la que esté situado el sensor, debido a que no sería lo mismo registrar la radiación incidente en una superficie horizontal que en una vertical. En la tabla 1.5 se muestra un resumen de instrumentos meteorológicos para la medida de radiación solar.

Clasificación del instrumento	Parámetro que se desea medir	Uso principal	Ángulo de visión (sr)
<b>Pirheliómetro absoluto</b>	Radiación solar directa	Patrón primario	$5 \times 10^{-3}$
<b>Pirheliómetro</b>	Radiación solar directa	Patrón secundario para calibraciones y Red	$5 \times 10^{-3}$
<b>Pirheliómetro espectral</b>	Radiación solar directa en bandas espectrales anchas	Red	$5 \times 10^{-3}$
<b>Fotómetro solar</b>	Radiación solar directa en bandas espectrales estrechas	Patrón y Red	$1 \times 10^{-3}$
<b>Piranómetro</b>	Radiación global, Radiación difusa y Radiación reflejada	Patrón de trabajo	$2 \times 10^{-12}$
<b>Piranómetro espectral</b>	Radiación solar global en bandas espectrales anchas	Red	$2 \times 10^{-12}$
<b>Pirgeómetro</b>	Radiación de onda larga y Radiación de onda larga descendente.	Red	$2 \times 10^{-12}$
<b>Pirradiómetro</b>	Radiación total	Patrón de trabajo	$2 \times 10^{-12}$
<b>Pirradiómetro diferencial</b>	Radiación total neta	Red	$4 \times 10^{-12}$
<b>Heliógrafo</b>	Brillo solar	Red	$4 \times 10^{-12}$

Tabla 1.5 Instrumentos meteorológicos para la medida de la radiación.<sup>35</sup>

<sup>35</sup> Procedimiento de Mantenimiento y Calibración de Estación Radiométrica

A lo largo del desarrollo se utilizarán magnitudes terminologías propias de los detectores como las que a continuación se detallan y que son imprescindibles para comprender el funcionamiento físico de la instrumentación.

**Rango Dinámico.** Es la mínima y máxima señal que el instrumento es capaz de medir en su zona de respuesta lineal.

**Rango Espectral.** Es el intervalo de longitudes de onda que el instrumento es capaz de detectar.

**Umbral de Detección.** Es la mínima señal que el instrumento es capaz de medir. Un instrumento con un umbral de detección nulo, detectaría toda la señal de su entrada. Pero debido a características ópticas y del detector, no se detecta hasta una señal denominada offset.

**Ruido (o Corriente Oscura).** Es la señal que el instrumento detecta cuando la iluminación a la entrada es nula. El ruido influirá en el umbral de detección del instrumento, y su caracterización y conocimiento es fundamental para la calidad de las medidas.

**Relación Señal–Ruido.** Es la relación entre la media de varias medidas y la desviación estándar de dichas lecturas. Para la determinación de este parámetro, la energía recibida por el instrumento, el tiempo de integración, y la forma de operar, han de ser las mismas.

**Tiempo de Integración.** Es el tiempo en el que el detector está expuesto a la radiación. Su valor es un compromiso entre el requerimiento de una alta relación señal-ruido y el deseo de un tiempo de medida corto.

**Respuesta espectral.** Es la sensibilidad del instrumento en función de la longitud de onda.

#### **1.4.1 Pirheliómetros.**

La medida de la radiación solar directa total se realiza con el pirheliómetro, instrumento de tipo telescópico con una apertura de pequeño diámetro. Las superficies receptoras del pirheliómetro deben mantenerse en todos momentos perpendiculares a la dirección de la radiación solar, por lo que el uso de un sistema de seguimiento adecuado es ineludible como se muestra en la figura 1.14. Las aperturas de este dispositivo están dispuestas de forma que sólo la radiación procedente del disco solar y de una estrecha franja anular en torno al mismo alcanzan el receptor.

La Organización Meteorológica Mundial (OMM) en 1996 califica los distintos tipos de pirheliómetros en pirheliómetro patrón primario, pirheliómetro patrón secundario y pirheliómetro de campo, atendiendo tanto a su precisión como a la precisión del equipo auxiliar. Los factores considerados para evaluar la precisión son: sensibilidad, estabilidad del factor de calibración, error máximo debido a las variaciones de temperatura ambiente,

errores debidos a la respuesta espectral del receptor, no-linealidad de la respuesta, ángulo de apertura, constante de tiempo del sistema y efectos del equipo auxiliar.

Los pirheliómetros empleados como patrones primarios son pirheliómetros absolutos, en el sentido de que el instrumento puede definir la escala de irradiancia total sin recurrir a fuentes o radiadores de referencia. Un pirheliómetro absoluto de cavidad está básicamente constituido por una cavidad y sensores calorimétricos diferenciales autocalibrados eléctricamente. La radiación solar que atraviesa la apertura de precisión se absorbe en un receptor y se determina su valor mediante la sustitución de la radiación solar por el calor aportado por una corriente eléctrica, que se disipa en un bobinado calorífico muy próximo al lugar donde tiene lugar la absorción de la radiación.

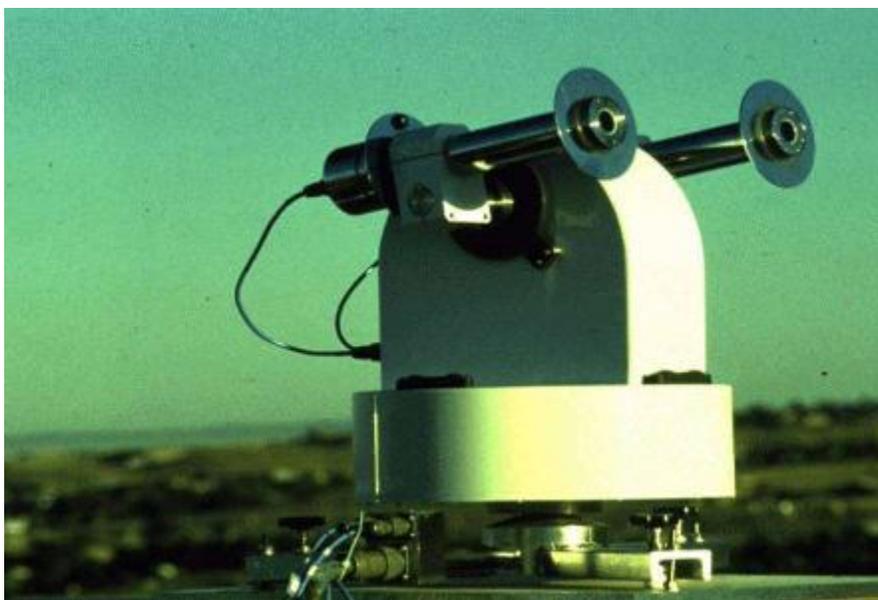


Figura 1.16 Pirheliómetro montado sobre seguidor solar.

En cualquier caso, debe tenerse en cuenta que la medida de la radiación solar directa es una tarea delicada que debe realizarse mediante instrumentos adecuados al uso que se dará a los datos obtenidos y preferentemente, bajo la supervisión de personal experimentado. En la tabla 1.6 siguiente se resumen las características que deben reunir los pirheliómetros operativos no aplicables a un pirheliómetro patrón primario según OMM<sup>36</sup> (1996). Los clasificados como de alta calidad son válidos como patrones de trabajo y para su mantenimiento se requieren instalaciones adecuadas y personal especializado. Los considerados de buena calidad son aceptables para redes de medida.

---

<sup>36</sup> La Organización Meteorológica Mundial (OMM) o en inglés, World Meteorological Organization (WMO), es un organismo especializado de las Naciones Unidas, integrado por 191 Estados y Territorios Miembros. Es el portavoz autorizado del sistema de las Naciones Unidas sobre el estado y el comportamiento de la atmósfera de la Tierra, su interacción con la tierra y los océanos, el tiempo y el clima que genera, y la consiguiente distribución de los recursos hídricos. (<http://public.wmo.int/es>)

Características		Alta calidad	Buena calidad
<b>Tiempo de respuesta</b> (95%)		< 15 s	< 30 s
<b>Desajuste de cero</b> (respuesta a la variación de 5 K·h <sup>-1</sup> en la temperatura ambiente)		± 2 W·m <sup>-2</sup>	± 4 W·m <sup>-2</sup>
<b>Resolución</b> (mínimo cambio detectable en W·m <sup>-2</sup> )		± 0.5	± 1
<b>Estabilidad</b> (porcentaje del fondo de escala, variación anual)		± 0.5	± 1
<b>Respuesta en temperatura</b> (máximo error en % debido a la variación de temperatura ambiente en un intervalo de 5 K)		± 1	± 2
<b>No-Linealidad</b> (desviación en % de la respuesta a 500 W·m <sup>-2</sup> debido a una variación de la irradiancia entre 100 y 1100 W·m <sup>-2</sup> )		± 0.2	± 0.5
<b>Sensibilidad espectral</b> (desviación en % del producto de la absorptancia espectral y la transmitancia espectral de la media correspondiente en el rango de 0.3 a 3 μm)		± 0.5	± 1
<b>Respuesta a la inclinación</b> (desviación en % con respecto a la respuesta a inclinación de 0° debida a la variación de la inclinación desde 0 a 90° a 1000 W·m <sup>-2</sup> de irradiancia)		± 0.2	± 0.5
<b>Incertidumbre alcanzable en irradiación</b> (Nivel de confianza del 95%)			
sobre 1 min	% kJ·m <sup>-2</sup>	± 0.9 ± 0.56	± 1.8 ± 1
sobre 1 hora	% kJ·m <sup>-2</sup>	± 0.7 ± 21	± 1.5 ± 54
sobre 1 día	% kJ·m <sup>-2</sup>	± 0.5 ± 200	± 1 ± 400

Tabla 1.6 Características de Pirheliómetros.<sup>37</sup>

<sup>37</sup> Procedimiento de Mantenimiento y Calibración de Estación Radiométrica

### 1.3.2 Piranómetros.

Es un instrumento para medir la radiación solar a una superficie plana, en otras palabras, es un sensor diseñado para medir la densidad del flujo de radiación solar en un cuerpo de 180°.

La termopila, formada por sectores blancos y negros, es capaz de absorber la radiación solar en un rango entre los 300 y los 5000nm. Y tiene una respuesta casi perfecta al coseno del ángulo de incidencia. La cúpula de cristal limita la respuesta al rango de 300 a 2,800nm. Preservando un campo de visión de 180 grados. Otra función de la cúpula es la de proteger la termopila de la convección. Las bandas negras del sensor (termopila) absorben la radiación solar que se transforma en calor. Este calor fluye atravesando los sensores hacia el cuerpo del piranómetro, proporcionando una señal eléctrica proporcional a la radiación incidente.

La radiación global es la suma de la radiación que procede directamente del disco solar y de la radiación solar dispersada a su paso por la atmósfera radiación difusa. La medida de la radiación global se realiza por medio de piranómetros. En la figura 1.17 se muestra un piranómetro de radiación global.



Figura 1.17 Piranómetro de radiación solar global.

La medida de la radiación difusa, o radiación solar procedente de la dispersión de los rayos solares por los constituyentes atmosféricos, se realiza también con piranómetros, a los que se acopla un elemento banda de sombra, como se muestra en la figura 1.18 cuya función es evitar que la radiación directa alcance el receptor. Debido a la geometría de este elemento parte de la radiación difusa procedente de los alrededores resultará también bloqueada, por lo que es necesario aplicar un factor de corrección a las medidas.

### 1.3.2.1 Tipos de piranómetros.

#### Piranómetro de radiación solar global

Este tipo de piranómetro se encarga de medir directamente la radiación solar que se recibe directamente sobre una superficie horizontal de la tierra.

El principio de funcionamiento de este instrumento es a través de termocuplas, las cuales al calentarse producto de la radiación del sol, emiten una pequeña f.e.m. pequeñas tensiones. Para obtener la potencia en  $W/m^2$ , se realiza el cociente de la tensión entregada por el piranómetro por una constante K del instrumento la cual se presenta en la ecuación 1.20 ya que el voltaje entregado por el instrumento es directamente proporcional a la irradiancia medida.

$$V = K \cdot I \quad (1.20)$$

K: constante del instrumento en  $[V / (Wm^{-2})]$ .

I: Irradiancia solar en  $(W/m^2)$



Figura 1.18 Piranómetro con banda de sombra.

#### Piranómetro radiación solar reflejada.

Instrumento que mide la radiación solar reflejada por la superficie terrestre, tiene el mismo principio de funcionamiento del piranómetro de radiación solar global.

### **Piranómetro térmico.**

Este tipo de piranómetro cuenta con una pila termoeléctrica, dos hemiesferas de cristal y barras de cobre. La pila termoeléctrica está constituida por una serie de termopares colocados horizontalmente, cuyos extremos están soldados con unas barras de cobre verticales solidarias a una placa de latón maciza. El piranómetro térmico se pinta de negro para absorber mayor radiación que al llegar a la pila genera tensión eléctrica.

Para medir la radiación difusa es necesario tapar el sensor de radiación directa mediante una pantalla parasol, midiendo la irradiancia solar difusa.

### **Piranómetro Fotovoltaico.**

La radiación que recibe llega directamente a un fotodiodo que es capaz de diferenciar el espectro solar por la frecuencia de la onda electromagnética, y mediante la lectura de voltaje, expresa el resultado de la medición de la radiación solar.

Dada su naturaleza, en este tipo de piranómetros es posible adosar filtros de ciertas bandas del espectro solar, por medio de algún domo de vidrio impregnado con el filtro deseado. Por otro lado, son más sensibles a pequeñas irregularidades y cambios debido a que no tienen la inercia térmica que sí tienen los térmicos.

#### **1.3.2.2 Clasificación de los piranómetros.**

Los piranómetros se clasifican de la siguiente manera Estándar Secundario, Primera Clase, Segunda Clase y Tercera Clase. La tabla 1.7 siguiente recoge las características requeridas a los piranómetros operacionales según OMM<sup>38</sup> (1996). Los clasificados como de alta calidad son válidos como patrones de trabajo y para su mantenimiento se requieren instalaciones adecuadas y personal especializado. Los considerados de buena calidad son aceptables para redes de medida. Por último, los de calidad moderada son aceptables para redes de media de bajo coste.

#### **1.3.3 Heliógrafo**

Es un instrumento que se utiliza para medir las horas de sol en un período de un día. Consiste en una esfera de cristal la cual juega el papel de lente concentradora de la luz solar que es concentrada y proyectada a una cartulina en su parte inferior como se muestra en la figura 1.17. La cartulina se quemará de acuerdo a la intensidad de la luz.

---

<sup>38</sup> La Organización Meteorológica Mundial (OMM) o en inglés, World Meteorological Organization (WMO).

Características	Alta calidad	Buena calidad	Calidad moderada
<b>Tiempo de respuesta</b> (95%)	< 15 s	< 30 s	< 60 s
<b>Desajuste de cero</b> a) respuesta a la variación de $200 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ en radiación térmica neta b) respuesta a la variación de $5 \text{ K}\cdot\text{h}^{-1}$ en la temperatura ambiente	$\pm 7 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ $\pm 2 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$	$\pm 15 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ $\pm 4 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$	$\pm 30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ $\pm 8 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$
<b>Resolución</b> (mínimo cambio detectable en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	$\pm 1$	$\pm 5$	$\pm 10$
<b>Estabilidad</b> (porcentaje del fondo de escala, variación anual)	$\pm 0.8$	$\pm 1.5$	$\pm 3$
<b>Respuesta direccional a la radiación directa</b> (rango de errores debidos a asumir que la respuesta a la incidencia normal es válida para todas las direcciones cuando se mide, desde cualquier dirección, radiación directa normal de $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	$\pm 10 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$	$\pm 20 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$	$\pm 30 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$
<b>Respuesta en temperatura</b> temperatura ambiente en un intervalo de 50 K)	$\pm 2$	$\pm 4$	$\pm 8$
<b>No-Linealidad</b> (desviación en % de la respuesta a $500 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ debido a una variación de la irradiancia entre $100$ y $1100 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ )	$\pm 0.5$	$\pm 1$	$\pm 3$
<b>Sensibilidad espectral</b> (desviación en % del producto de la absorptancia espectral y la transmitancia espectral de la media correspondiente en el rango de $0.3$ a $3 \mu\text{m}$ )	$\pm 2$	$\pm 5$	$\pm 10$
<b>Respuesta a la inclinación</b> (desviación en % con respecto a la respuesta a inclinación de $0^\circ$ debida a la variación de la inclinación desde $0$ a $90^\circ$ a $1000 \text{ W}\cdot\text{m}^{-2}$ de irradiancia)	$\pm 0.5$	$\pm 2$	$\pm 5$
<b>Incertidumbre alcanzable en irradiación</b> (nivel de confianza del 95%)			
horario %	$\pm 3$	$\pm 8$	$\pm 20$
diario %	$\pm 2$	$\pm 5$	$\pm 10$

Tabla 1.7 Características de piranómetros.<sup>39</sup>

Se emplean en observatorios, institutos para investigaciones meteorológicas y climatológicas, en estaciones climáticas, en la agricultura, viticultura<sup>40</sup>, fruticultura y horticultura.

<sup>39</sup> Procedimiento de Mantenimiento y Calibración de Estación Radiométrica

<sup>40</sup> Viticultura: Disciplina que se ocupa del estudio y la actividad de cultivar uvas.

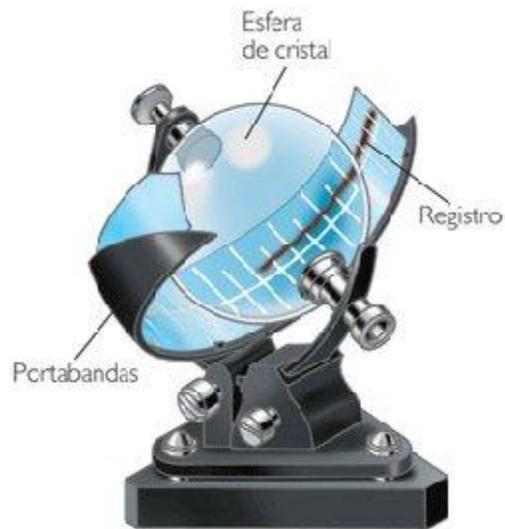


Figura 1.19 Heliógrafo.

### 1.3.3.1 Modo de funcionamiento

Una esfera de vidrio, que actúa de lente colectora, produce marcas de ustiión sobre una tira de cartón que va introducida en las ranuras del portatiras que circunda concéntricamente la esfera de vidrio. Según la intensidad de la irradiación solar, dichas marcas resultan más o menos intensas. Las tiras de cartón que están provistas de graduación horaria, se usan como indicado en la figura 1.18.

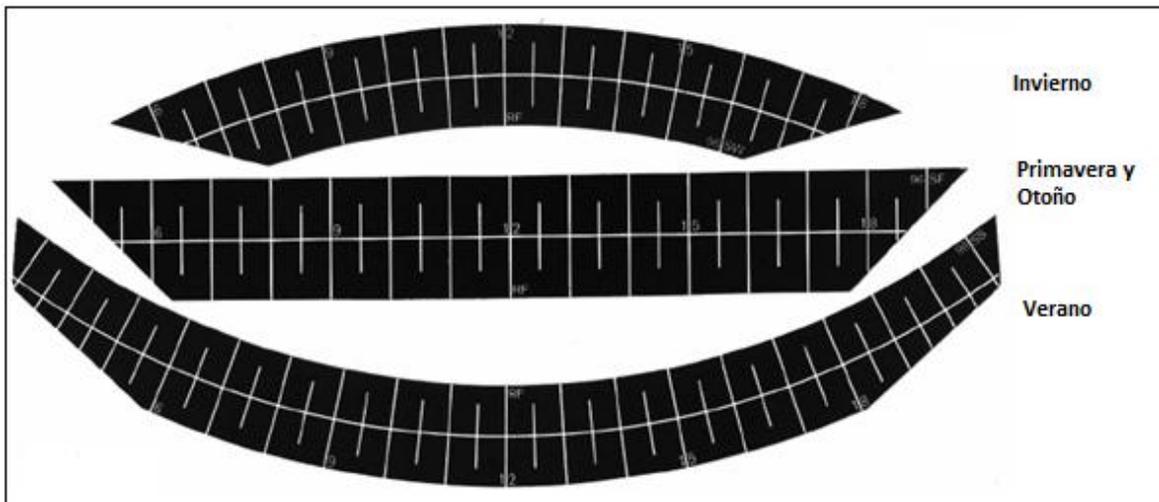


Figura 1.20 Tiras de cartón con graduación horaria.

Las esferas de vidrio, de 96 mm de diámetro, están talladas de vidrio claro, exento de burbujas o estrías, y tienen un índice de refracción determinado y dimensiones invariables según plantilla. El material escogido con cuidado y la precisión de fabricación garantizan la comparabilidad de los registros de varios heliógrafos.

Estos instrumentos de medición descritos en este capítulo son de mucha importancia para monitorear variables meteorológicas para diferentes fines que se mencionan en el desarrollo de este capítulo. La necesidad de medir variables como irradiancia solar, temperatura y humedad relativa es muy grande y los costos bastante elevados por esta razón se busca una solución especialmente para reducir costos. En el siguiente capítulo se estudiara el medidor implementado a bajo costo que mide tres importantes variables Irradiancia solar, temperatura y humedad relativa, donde se presentaran conceptos del hardware y software utilizados en la implementación.

# **2. Implementación de medidor de irradiancia solar con hardware y software libre.**

## 2.1 Hardware libre Arduino.

Arduino es una placa hardware libre que incorpora un microcontrolador reprogramable y una serie de pines-hembra los cuales están unidos internamente a las patillas de E/S del microcontrolador que permiten conectar allí de forma muy sencilla y cómoda diferentes sensores y actuadores.

Cuando se habla de placa hardware se refiere en concreto a una PCB (printed circuit board), o sea, placa de circuito impreso. Las PCBs son superficies fabricadas de un material no conductor (normalmente resinas de fibra de vidrio reforzada, cerámica o plástico sobre las cuales aparecen laminadas pistas de material conductor normalmente cobre. Las PCBs se utilizan para conectar eléctricamente, a través de los caminos conductores, diferentes componentes electrónicos soldados a ella. Una PCB es la forma más compacta y estable de construir un circuito electrónico en contraposición a una breadboard, perfboard o similar pero, al contrario que éstas, una vez fabricada, su diseño es bastante difícil de modificar. Así pues, la placa Arduino no es más que una PCB que implementa un determinado diseño de circuitería interna como se muestra en la figura 2.1.

El diseño hardware de la placa Arduino está inspirado originalmente en el de otra placa de hardware libre preexistente, la placa Wiring. Esta placa surgió en 2003 como proyecto personal de Hernando Barragán, estudiante por aquel entonces del Instituto de Diseño de Ivrea, lugar donde surgió en 2005 precisamente la placa Arduino.

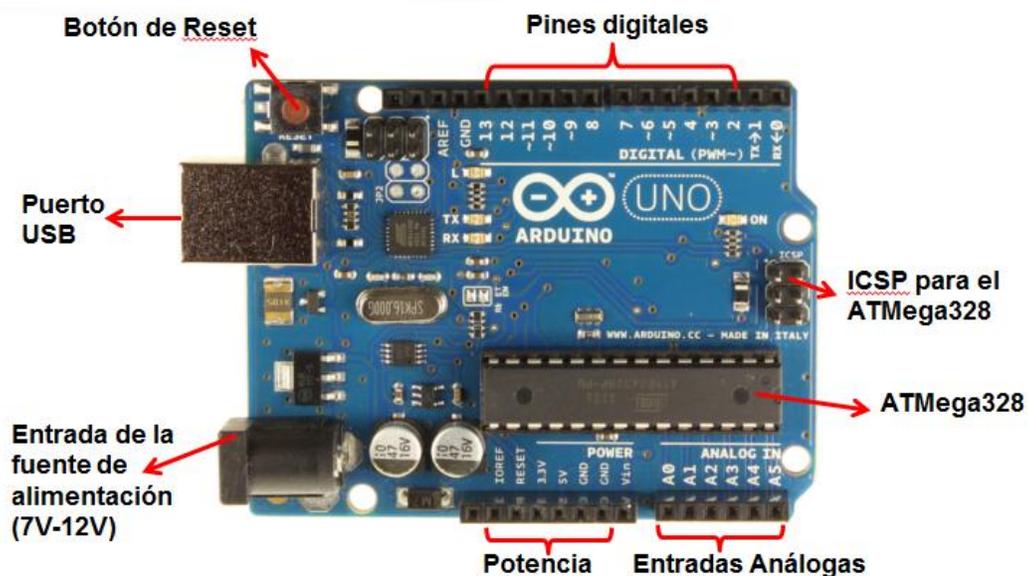


Figura 2.1 Placa Arduino Uno.

Un software gratis, libre y multiplataforma ya que funciona en Linux, MacOS y Windows que se puede instalar en nuestro ordenador y que nos permite escribir, verificar y guardar en la memoria del microcontrolador de la placa Arduino el conjunto de instrucciones que deseamos que este empiece a ejecutar. Es decir permite programarlo.

La manera estándar de conectar nuestro computador con la placa Arduino para poder enviarle y grabarle dichas instrucciones es mediante un simple cable USB, gracias a que la mayoría de placas Arduino incorporan un conector de este tipo.

Los proyectos Arduino pueden ser autónomos o no. En el primer caso, una vez programado su microcontrolador, la placa no necesita estar conectada a ningún computador y puede funcionar autónomamente si dispone de alguna fuente de alimentación. En el segundo caso, la placa debe estar conectada de alguna forma permanente por cable USB, por cable de red Ethernet, etc., a un computador ejecutando algún software específico que permita la comunicación entre éste y la placa y el intercambio de datos entre ambos dispositivos. Este software específico se debe programar generalmente mediante algún lenguaje de programación estándar como Python, C, Java, Php, etc., y será independiente completamente del entorno de desarrollo Arduino, el cual no se necesitará más, una vez que la placa ya haya sido programada y esté en funcionamiento.

Tanto el entorno de desarrollo como el lenguaje de programación Arduino están inspirado en otro entorno y lenguaje libre preexistente Processing, como fue en ese centro Instituto de Diseño de Ivrea donde precisamente se inventó Arduino es natural que ambos entornos y lenguajes guarden bastante similitud. No obstante, hay que aclarar que el lenguaje Processing está construido internamente con código escrito en lenguaje Java, mientras que el lenguaje Arduino se basa internamente en código C/C++.

Con Arduino se pueden realizar multitud de proyectos de rango muy variado, desde robótica hasta domótica, pasando por monitorización de sensores ambientales, sistemas de navegación, telemática, etc. Realmente, las posibilidades de esta plataforma para el desarrollo de productos electrónicos son prácticamente infinitas y tan solo están limitadas por la imaginación. Los modelos de Arduino se categorizan en 5 diferentes productos. Placas, escudos, kits, accesorios e impresoras 3d. El que más se menciona es el Arduino Mega 2560 ya que ofrece mayores capacidades ventajas que el Arduino uno y el Arduino mega 320 aunque no tan superiores basadas en soluciones ARM.

### **2.1.1 Características técnicas del Arduino Uno.**

El microcontrolador que lleva la placa Arduino UNO es el modelo **ATmega328P** de la marca Atmel figura 2.2. La “P” del final significa que este chip incorpora la tecnología Picopower propietaria de Atmel, la cual permite un consumo eléctrico sensiblemente menor comparándolo con el modelo equivalente sin “Picopower”, el Atmega328 (sin la “P”). De todas formas, aunque el ATmega328P pueda trabajar a un voltaje menor y consumir menos corriente que el Atmega328, ambos modelos son funcionalmente idénticos.

El ATmega328P tiene una arquitectura de tipo AVR, arquitectura desarrollada por Atmel y en cierta medida “competencia” de otras arquitecturas como por ejemplo la PIC del fabricante Microchip. Más concretamente, el ATmega328P pertenece a la subfamilia de microcontroladores megaAVR.

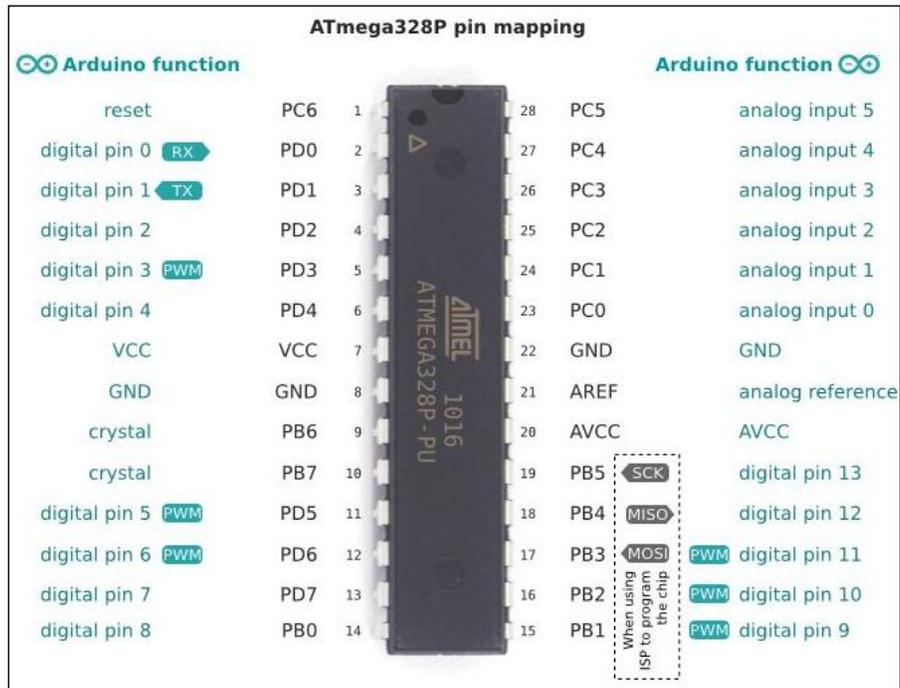


Figura 2.2 Microcontrolador ATmega328P.

El voltaje de funcionamiento de la placa Arduino incluyendo el microcontrolador y el resto de componentes es de 5 V. Se puede obtener esta alimentación eléctrica de varias maneras.

Conectando la placa Arduino a una fuente externa, tal como un adaptador AC/DC o una pila. Para el primer caso, la placa dispone de un zócalo donde se puede enchufar una clavija de 2.1 milímetros de tipo “jack”. El adaptador ha de ser de polaridad “con el positivo en el centro”. Esto quiere decir que la parte externa del cilindro metálico que forma la clavija de 5.5/2.1 mm del adaptador ha de ser el borne negativo y el hueco interior del cilindro ha de ser el borne positivo.

Para el segundo, los cables salientes de los bornes de la pila se pueden conectar a los pines-hembra marcados como “Vin” y “Gnd” positivo y negativo respectivamente en la zona de la placa marcada con la etiqueta “POWER” como se observa en la figura 2.1. En ambos casos, la placa está preparada en teoría para recibir una alimentación de 6 a 20 voltios, aunque, realmente, el rango recomendado de voltaje de entrada teniendo en cuenta el deseo de obtener una cierta estabilidad y seguridad eléctrica en nuestros circuitos es menor, de 7 a 12 voltios. En cualquier caso, este voltaje de entrada ofrecido por la fuente externa siempre es rebajado a los 5 V de trabajo mediante un circuito regulador de tensión que ya viene incorporado dentro de la placa.

Conectando la placa Arduino a nuestro computador mediante un cable USB. Para ello, la placa dispone de un conector USB hembra de tipo B. La alimentación recibida de esta manera está regulada permanentemente a los 5 V de trabajo y ofrece un máximo de hasta 500 mA de corriente por lo tanto, la potencia consumida por la placa es en ese caso de

unos 2.5 W. Si en algún momento por el conector USB pasa más intensidad de la deseable, la placa Arduino está protegida mediante un polifusible reseteable que automáticamente rompe la conexión hasta que las condiciones eléctricas vuelven a la normalidad.

Si se utiliza una pila como alimentación externa, una ideal sería la de 9 V está dentro del rango recomendado de 7 a 12 voltios, y si se utiliza un adaptador AC/DC, se recomienda el uso de uno con las siguientes características.

La intensidad de corriente ofrecida ha de ser de 250 mA (o más). Si se conecta a la placa Arduino muchos componentes o unos pocos pero consumidores de mucha energía (como por ejemplo una matriz de LEDs, una tarjeta SD o un motor) el adaptador debería suministrar al menos 500 mA o incluso 1 A. De esta manera se asegura de que se tiene suficiente corriente para que cada componente pueda funcionar de forma fiable.

### **2.1.2 Software Arduino.**

Un programa es un conjunto concreto de instrucciones, ordenadas y agrupadas de forma adecuada que pretende obtener un resultado determinado. Cuando se dice que un microcontrolador es programable, estamos diciendo que permite grabar en su memoria de forma permanente hasta que regrabemos de nuevo si es necesario el programa que deseemos que dicho microcontrolador ejecute.

Las siglas IDE vienen de Integrated Development Environment, lo que traducido al español significa Entorno de Desarrollo Integrado. Esto es simplemente una forma de llamar al conjunto de herramientas software que permite a los programadores poder desarrollar sus propios programas con comodidad. En el caso de Arduino, necesitamos un IDE que permita escribir y editar el programa que permita comprobar que no se haya cometido ningún error y que además permita, cuando ya estemos seguros de que el sketch es correcto, grabarlo en la memoria del microcontrolador de la placa Arduino para que este se convierta a partir de entonces en el ejecutor autónomo de dicho programa.

Para instalar el IDE de Arduino en Windows, deberemos ir a su página web oficial de descargas <http://arduino.cc/en/Main/Software>. Allí aparecerá, bajo el apartado "Downloads", un enlace para descargar la versión del IDE para Windows, en un archivo comprimido en formato zip y estará listo para instalar. Luego de instalarlo se abrirá fácilmente con hacer click en el acceso directo del archivo ejecutable y obtendremos un nuevo sketch para escribir instrucciones para el microprocesador del Arduino en lenguaje en lenguaje C/C++, en la figura 2.3 se muestra la interface gráfica del el software Arduino para comenzar un nuevo sketch.

#### **2.1.2.1 Herramientas del software Arduino.**

Podemos observar en la figura 2.3 que la ventana del IDE se divide en cinco grandes áreas. De arriba abajo son la barra de menús, la barra de botones, el editor de código propiamente dicho, la barra y la consola de mensajes, y la barra de estado.

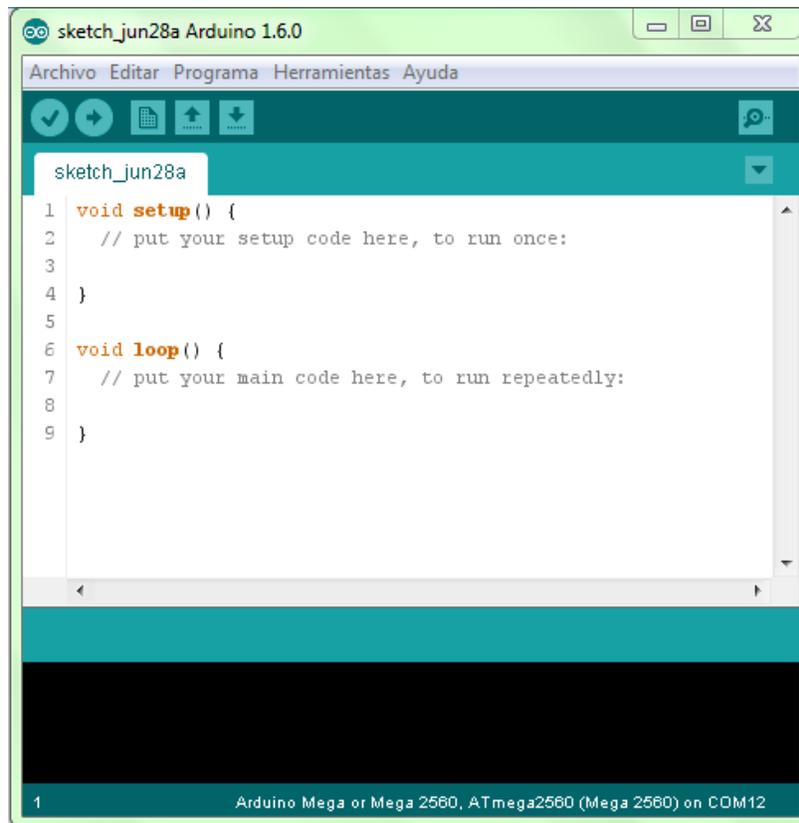


Figura 2.3 Sketch de Arduino.

La barra de botones la utilizaremos muy frecuentemente que esta, compuesta por los siguientes elementos.

- **Botón verificar** 

Este botón realiza dos cosas, comprueba que no haya ningún error en el código de nuestro sketch, y si el código es correcto, entonces lo compila.

- **Botón subir** 

Su función es invocar internamente al comando “avrdude” para cargar en la memoria del microcontrolador de la placa Arduino el sketch recientemente verificado y compilado.

- **Botón nuevo** 

Crea un nuevo sketch vacío.

- **Botón abrir** 

Presenta un menú con todos los sketches disponibles para abrir.

- **Botón guardar** 

Guarda el código de nuestro sketch en un fichero, el cual tendrá la extensión “.ino”.

- **Botón monitor serie** 

Este botón posibilita la visualización de datos procedentes de la tarjeta usando el cable USB.

Estos son los botones más importantes de la interface Arduino existen otras herramientas que son de importancia como la barra de menú que ofrece cinco entradas principales. Archivo, Editar, Programa, Herramienta y Ayuda.

### 2.1.3 Programación Arduino.

#### 2.1.3.1 Estructura del Lenguaje de programación de Arduino.

Un programa diseñado para ejecutarse sobre un Arduino siempre se compone de tres secciones. La sección de declaraciones de variables globales, ubicada directamente al principio del sketch como se muestra en la figura 2.3 en la sección anterior.

La sección llamada **void setup()**: delimitada por llaves de apertura y cierre. Se ejecutan una única vez, en el momento de encender o resetear la placa Arduino.

La sección llamada **void loop()**: delimitada por llaves de apertura y cierre. Se ejecutan justo después de las de la sección “void setup()” infinitas veces hasta que la placa se apague o se resetee. Es decir, el contenido de void loop() se ejecuta desde la 1ª instrucción hasta la última, para seguidamente volver a ejecutarse desde la 1ª instrucción hasta la última, para seguidamente ejecutarse desde la 1ª instrucción hasta la última, y así una y otra vez.

A continuación de una forma resumida presentamos sintaxis de gran importancia en lenguaje C/C++ que los permite realizar nuevos sketch.

#### Estructuras de Control

- if
- if...else
- for
- switch case
- while
- do... while
- break
- continue
- return

## Sintaxis

- ; Punto y coma
- {} Paréntesis de corchetes
- // Comentario simple de línea
- /\* \*/ Comentario multilínea

## Operadores Aritméticos

- **plus** Adición
- - Sustracción
- \* Multiplicación
- / División
- % Módulo

## Operadores de comparación

- == Igual a
- != Distinto a
- < Menor que
- > Mayor que
- <= Menor o igual que
- >= Mayor o igual que

## Operadores Booleanos

- && and
- || or
- ! not

## Operadores Compuestos

- ++ incremento
- -- decremento
- += adición compuesta
- -= sustracción compuesta
- \*= multiplicación compuesta
- /= división compuesta

### 2.1.3.2 Variables

Una variable es un elemento de nuestro sketch que actúa como un pequeño cajoncito identificado por un nombre elegido por nosotros, que guarda un determinado contenido, como lectura de sensores desde un pin análogo. Y ese contenido se podrá modificar en cualquier momento de la ejecución del sketch.

## Constantes

Las Constantes son valores particulares con significado especial.

- HIGH | LOW
- INPUT | OUTPUT
- true | false
- Integer Constants

## Tipos de Datos

Las variables pueden tener varios tipos de datos, los cuales se describen a continuación.

- boolean
- char
- byte
- int
- unsigned int
- long
- unsigned long
- float
- double
- string
- array

### 2.1.3.3 Funciones y Referencia

#### Entrada/Salida Digital

- pinMode(pin, modo)
- donde modo=INPUT o modo=OUTPUT
- digitalWrite(pin, valor)
- int digitalRead(pin)

#### Entrada/Salida Analógica

- int analogRead(pin)
- analogWrite(pin, value) – PWM

#### Entrada/Salida Avanzado

- shiftOut(dataPin, clockPin, bitOrder, valor)
- unsigned long pulseIn(pin, valor)

## Tiempo

- unsigned long millis()
- delay(ms)
- delayMicroseconds(us)

## Matemáticas

- min(x, y)
- max(x, y)
- abs(x)
- constrain(x, a, b)

## Números al azar

- randomSeed(seed)
- long random(max)
- 
- long random(min, max)

## Comunicación Serial

Se utiliza para la comunicación entre la placa Arduino y un computador u otro dispositivo. Esta comunicación sucede a través de la conexión serial de la placa Arduino o USB y sobre los pines digitales 0 (RX) ó 1 (TX). Luego, si usas estas funciones, no puedes tampoco usar estos pines como entrada o salida digital.

- Serial.begin(velocidad)
- int Serial.available()
- int Serial.read()
- Serial.flush()
- Serial.print(data)
- Serial.println(data)

## Referencia

- ASCII chart

### 2.1.4 Librerías Arduino

Las librerías sirven para proporcionar funcionalidad extra en nuestros sketches ofreciendo la posibilidad de manipular datos en diferentes formatos, de gestionar protocolos de comunicación diversos, de interactuar con hardware variado.

En la tabla 2.1 se hará un breve resumen de las librerías oficiales que se instalan por defecto junto con el IDE oficial de Arduino.

Librerías	Función
<b>Librería LiquidCrystal</b>	Permite controlar pantallas de cristal líquido (LCDs) basadas en el chip HD44780 de Hitachi.
<b>Librería EEPROM</b>	Permite leer y escribir datos en la memoria EEPROM del microcontrolador.
<b>Librería SD</b>	Permite leer y escribir datos en una tarjeta SD o micro SD acoplada a un zócalo de algún shield como por ejemplo el Arduino Ethernet Shield o módulo específico.
<b>Librería Ethernet</b>	Permite conectar el Arduino Ethernet Shield o bien la placa Arduino Ethernet a una red Ethernet (TCP/IP).
<b>Librería Firmata</b>	Permite comunicar la placa con programas ejecutados en un computador mediante una conexión de tipo serie.
<b>Librería SPI</b>	Permite comunicar mediante el protocolo SPI la placa Arduino (que actúa siempre como maestro) con dispositivos externos (que actuarían como esclavos).
<b>Librería Wire</b>	Permite comunicar mediante el protocolo I <sup>2</sup> C (también llamado TWI) la placa Arduino con dispositivos externos. La comunicación se establece a través de los pines SDA (pines analógicos).
<b>Librería SoftwareSerial</b>	Lo que permite es que este tipo de comunicación se pueda establecer con dispositivos conectados a pines diferentes del 0 y del 1. Simula un chip TTL-UART.
<b>Librerías Servo y Stepper</b>	La librería Servo Facilita al programador de la placa Arduino el control de servomotores. La librería Stepper, por su parte, sirve para controlar motores tipo paso a paso.

Tabla 2.1 Librerías Arduino.

## 2.2 Diseño e implementación de medidor de irradiancia solar.

En esta sección estará detallado cada accesorio y elemento que se utilizara para elaborar el medidor de irradiancia solar.

La base del medidor se encuentra en uno de los modelos de Arduino ATmega2560 a continuación describiremos las características de este microcontrolador que es un elemento de los importantes.

### 2.2.1 Características Arduino mega 2560.

El Arduino Mega está basado en el microcontrolador ATmega2560. Tiene 54 pines de entradas/salidas digitales 14 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 conéctalo a tu PC por medio de un cable USB o con una fuente de alimentación externa como se observa en la figura 2.3. El Arduino Mega es compatible con la mayoría de los shields diseñados para Arduino Duemilanove, diecimila o UNO.

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.<sup>41</sup>

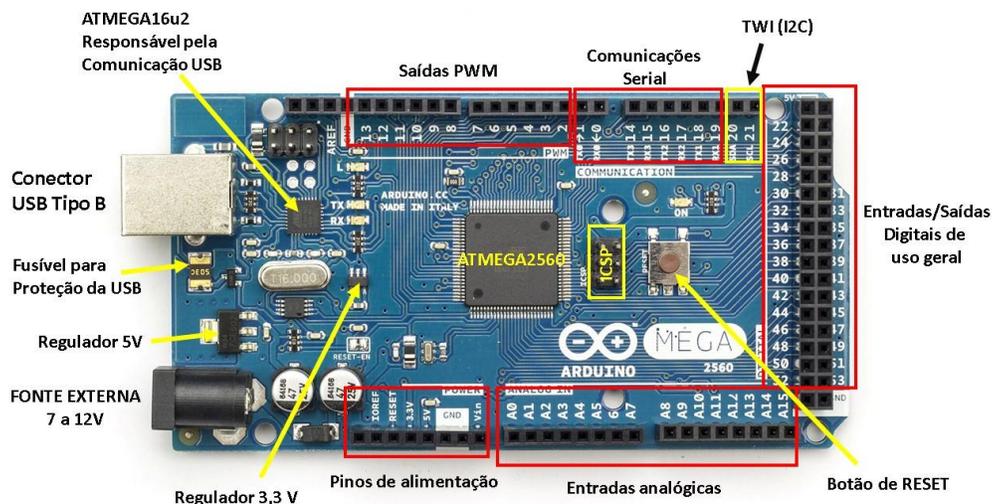


Figura 2.4 Arduino ATmega 2560.

Dentro de la web oficial de Arduino podemos descargar los ficheros del diseño esquemático de la placa en PDF, los ficheros del diseño de la PCB en el formato propio del programa EAGLE y una imagen ilustrativa del mapeado de los pines del microcontrolador

<sup>41</sup> <http://arduino.cl/arduino-mega-2560/>

con relación a los pines de la placa. También nos podemos descargar la documentación oficial del microcontrolador ATmega2560.

En la tabla 2.2 se muestran especificaciones técnicas del Arduino ATmega 2560.

Microcontrolador	ATmega2560
<b>Operating Voltage</b>	5V
<b>Input Voltage (recommended)</b>	7-12V
<b>Input Voltage (limit)</b>	6-20V
<b>Digital I/O Pins</b>	54 (of which 15 provide PWM output)
<b>Analog Input Pins</b>	16
<b>DC Current per I/O Pin</b>	20 Ma
<b>DC Current for 3.3V Pin</b>	50 Ma
<b>Flash Memory</b>	256 KB of which 8 KB used by bootloader
<b>SRAM</b>	8 KB
<b>EEPROM</b>	4 KB
<b>Clock Speed</b>	16 MHz
<b>Length</b>	101.52 mm
<b>Width</b>	53.3 mm
<b>Weight</b>	37 g

Tabla 2.2 Especificaciones técnicas Arduino ATmega 2560.

## Energía

El Mega Arduino puede ser alimentado a través de la conexión USB o con una fuente de alimentación externa. La fuente de alimentación se selecciona automáticamente. Potencia (no USB) externo puede venir con un adaptador de CA a CC (pared-verruga) o la batería. El adaptador se puede conectar al conectar un enchufe de 2.1mm centro-positivo en el conector de alimentación de la placa. Los cables desde una batería se pueden insertar en los cabezales de pin GND y Vin del conector de alimentación.

El tablero puede funcionar con un suministro externo de 6 a 20 voltios. Si se suministra con menos de 7V, sin embargo, el pin de 5V puede suministrar menos de cinco voltios y la junta puede ser inestable. Si se utiliza más de 12 V, el regulador de voltaje se puede sobrecalentar y dañar la placa. El rango recomendado es de 7 a 12 voltios.

Los pines de alimentación son como sigue:

- **VIN.** El voltaje de entrada a la placa Arduino cuando se trata de utilizar una fuente de alimentación externa (en oposición a 5 voltios de la conexión USB u otra fuente de alimentación regulada). Usted puede suministrar tensión a través de este pin, o, si el suministro de tensión a través de la toma de alimentación, acceso a él a través de este pin.

- **5V.** Este pin como salida una 5V regulada del regulador en el tablero. El tablero puede ser alimentado ya sea desde la toma de alimentación de CC (7 - 12 V), el conector USB (5V), o por el pin VIN del tablero (7-12V). El suministro de tensión a través de los pines de 5V o 3.3V no pasa por el regulador, y puede dañar su tablero. No aconsejamos ella.
- **3V3.** Un suministro de 3.3 voltios generada por el regulador de a bordo. Sorteo de corriente máxima es de 50 mA.
- **GND.** Pines de tierra.
- **Instrucción IOREF.** Este pin de la placa Arduino proporciona la referencia de tensión con la que opera el micro controlador. Un escudo configurado puede leer el voltaje pin instrucción IOREF y seleccione la fuente de alimentación adecuada o habilitar traductores de voltaje en las salidas para trabajar con el 5V o 3.3V.

### **Entrada y Salida.**

Cada uno de los 54 pines digitales en el Mega se puede utilizar como una entrada o salida, utilizando pinMode () , digitalWrite () , y digitalRead () funciones. Funcionan a 5 voltios. Cada pin puede proporcionar o recibir un máximo de 40 mA y tiene una resistencia de pull-up (desconectado por defecto) de 20 a 50 kohm. Además, algunos pines tienen funciones especializadas:

- **Serial:** 0 (RX) y 1 (TX); Serie 1: 19 (RX) y 18 (TX); Serial 2: 17 (RX) y 16 (TX); Serial 3: 15 (RX) y 14 (TX) Se utiliza para recibir (RX) y transmitir datos en serie (TX) TTL.. Pines 0 y 1 están también conectados a los pines correspondientes de los USB-to-TTL chips SerialATmega16U2.
- **Interrupciones externas:** 2 (interrumpir 0), 3 (alarma 1), 18 (interrumpe 5), 19 (interrupción 4), 20 (interrumpir 3), y 21 (2) de interrupción Estos pines pueden configurarse para activar una interrupción en un valor bajo, un flanco ascendente o descendente, o un cambio en el valor. Ver el attachInterrupt () función para más detalles.
- **PWM:** 2 a 13 y 44 a 46. Proporcionar salida PWM de 8 bits con el analogWrite () función.
- **SPI:** 50 (MISO), 51 (MOSI), 52 (SCK), 53 (SS) Estos pines admite la comunicación SPI utilizando la librería SPI . Los pines SPI también se desglosan en la cabecera ICSP, que es físicamente compatible con el Uno, Duemilanove y Diecimila.
- **LED:** Hay un LED incorporado conectado al pin digital 13. Cuando el pasador es de alto valor, el LED está encendido, cuando el pasador es bajo, es apagado.

- **TWI:** 20 (SDA) y 21 (SCL) Apoyar la comunicación TWI utilizando el. librería Wire. Tenga en cuenta que estos pines no están en la misma ubicación que los pines TWI en el Duemilanove o Diecimila.

## 2.2.2 Elementos y accesorios para el diseño de medidor de irradiancia solar compatibles con Arduino.

### 2.2.2.1 Pantallas LCD.

Las pantallas de cristal líquido (en inglés “Liquid Crystal Displays” –LCDs– ) ofrecen una manera muy rápida y vistosa de mostrar mensajes. Las primeras sirven para mostrar texto ASCII y se comercializan en diferentes tamaños (16x2, 20x4) donde el primer número indica la cantidad de caracteres que caben en una fila, y el segundo número es el número de filas que caben en la pantalla.

Cada modelo de LCD es diferente, por lo que es imprescindible consultar su datasheet concreto para poder distinguir los diferentes pines de conexión que ofrece y sus características generales. Por ejemplo Un pin para recibir la alimentación normalmente con los 5 V que proporciona la placa Arduino pero hay modelos que funcionan 3.3 V en la figura 2.5 se muestra una pantalla LCD con sus respectivos pines.

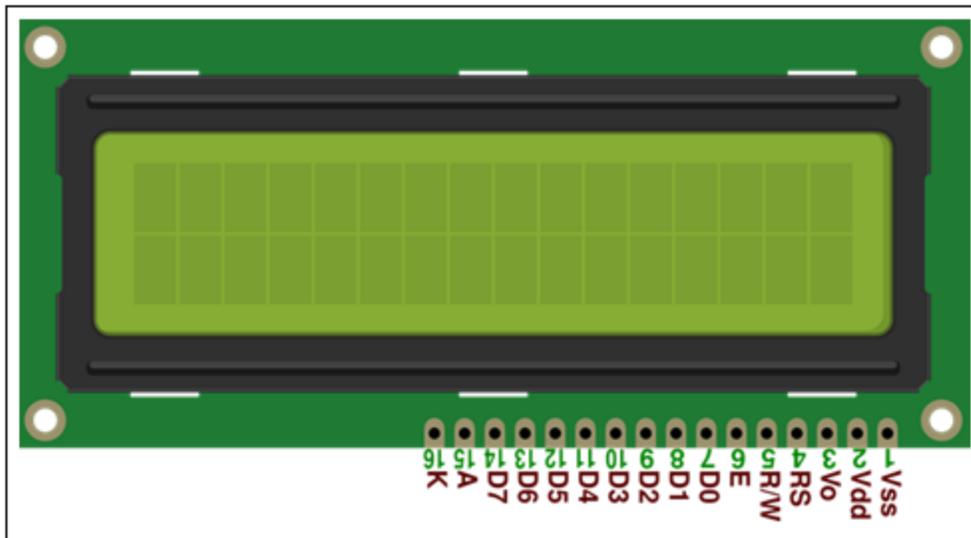


Figura 2.5 Pantalla LCD compatible con Arduino.

Para poder utilizar la pantallas LCD compatibles con la librería oficial LiquidCrystal es declarar una variable global de tipo “LiquidCrystal”, la cual representará dentro de nuestro sketch al objeto LCD que queremos controlar. La declaración se ha de realizar usando la siguiente sintaxis suponiendo que llamamos **lcd** a dicha variable-objeto. **LiquidCrystal lcd(rs, rw, enable, d0, d1, d2, d3, d4, d5, d6, d7)**; donde todos los parámetros especificados entre paréntesis en realidad son valores numéricos que representan.

rs : nº del pin de la placa Arduino conectado al pin "RS" de la LCD.

rw: nº del pin de la placa Arduino conectado al pin "RW" de la LCD. Opcional.

enable: nº del pin de la placa Arduino conectado al pin "ENABLE" de la LCD.

d0... hasta d7: números de los pines de la placa Arduino conectados a los pines de datos correspondientes de la LCD. Los parámetros d0, d1, d2 y d3 son opcionales: si se omiten, la LCD será controlada usando solo cuatro líneas (d4, d5, d6, d7) en vez de 8.

Una posible declaración para una LCD de 4 bits sin uso del pin "rw" podría ser: **LiquidCrystal lcd(8, 9, 3, 2, 6, 7)** ; Lo primero que debemos hacer es establecer el tamaño de la pantalla para poder trabajar con ella. Esto se hace mediante la siguiente función.

**lcd.begin()**: especifica las dimensiones columnas y filas de la pantalla. Tiene dos parámetros el primero es el número de columnas que tiene la pantalla y el segundo es el número de filas. Esta función ha de ser ejecutada antes de poder empezar a imprimir ningún carácter en ella.

Por ejemplo: `lcd.begin(16, 2)`; significa que tiene dieciséis columnas y dos filas.

**lcd.setCursor()**: posiciona el cursor en la columna y fila especificadas como parámetros para escribir a partir de allí el próximo texto. Su primer parámetro es la columna en la que se quiere situar el cursor (la primera es la número 0) y su segundo parámetro es la fila (la primera es la número 0 también). No tiene valor de retorno.

Por ejemplo: `lcd.setCursor(0,0)`;

**lcd.print()**: escribe un dato (de cualquier tipo) en la pantalla. Como primer parámetro tiene ese dato, que puede ser tanto un carácter de tipo "char" como una cadena de caracteres, pero también puede ser numérico entero ("int", "long", etc.).

Por ejemplo: `lcd.print("Inicializando")`

### 2.2.2.2 Sensor de temperatura y humedad DHT 11

Este sensor se caracteriza por tener la señal digital calibrada por lo que asegura una alta calidad y una fiabilidad a lo largo del tiempo, ya que contiene un microcontrolador de 8 bits integrado. Está constituido por dos sensores resistivos NTC y humedad. Tiene una excelente calidad y una respuesta rápida en las medidas. Sus características técnicas más destacables son se puede alimentar con un voltaje de entre 3 V y 5 V y 2.5 mA como máximo, puede medir la humedad entre el rango 20% a 95% aproximadamente y la temperatura entre el rango 0°C y 50°C.

El sensor tiene cuatro pines; mirándolo de frente son el de alimentación (nº 1, el de más a la izquierda), el de salida digital de datos (nº 2), uno no conectado a nada y que se puede ignorar (nº 3) y el de tierra (nº 4, el de más a la derecha) figura 2.6. Así pues, para que nuestra placa Arduino pueda leer los datos que emite este chip, deberemos conectar su pin nº 1 al pin-hembra de 5 V de la placa (por ejemplo), su pin nº 4 a un pin “GND” y su pin nº 2 a una pin-hembra de entrada digital. Además, es recomendable conectar una resistencia (“pull-up”) de 4.7 kΩ entre el pin nº 1 y nº 2 es montado en una placa y solo queda con tres pines hembras, pin uno con 5V, pin dos entrada digital y pin tres GND como se muestra en la figura 2.7.

Cada sensor DHT11 está estrictamente calibrado en laboratorio, presentando una extrema precisión en la calibración. Los coeficientes de calibración se almacenan como programas en la memoria OTP, que son empleados por el proceso de detección de señal interna del sensor.



Figura 2.6 sensor de temperatura y humedad DHT11.

El protocolo de comunicación es a través de un único hilo (protocolo 1-wire), por lo tanto hace que la integración de este sensor en nuestros proyectos sea rápida y sencilla. Además presenta un tamaño reducido, un bajo consumo y la capacidad de transmitir la señal hasta 20 metros de distancia.<sup>42</sup>

<sup>42</sup> <https://tallerarduino.com/2012/12/24/sensor-dht11-humedad-y-temperatura-con-arduino/>

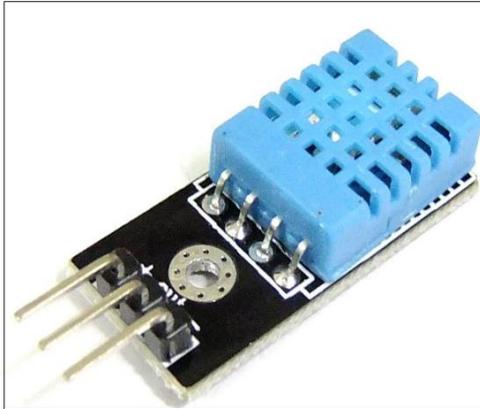


Figura 2.7 Sensor DHT 11.

La librería que se utiliza con este sensor es DHT la sintaxis que se utiliza es la siguiente.  
`#include <DHT.h>`

Para inicializar el sensor DHT se hace de la siguiente manera: `DHT dht(22,DHT11);` donde el veintidos es el un pin digital del Arduino donde está recibiendo la señal del DHT11, y es siguiente elemento identifica el tipo de sensor.

### **Principio de funcionamiento del DTH 11.**

El DTH 11 utiliza un sensor capacitivo de humedad y termistor para medir el aire circundante. La humedad hace que el dieléctrico se dilate, distanciando así las placas con la consecuente variación de la geometría del capacitador y la reducción de su capacitancia. Estas variaciones de capacitancia a su vez causan un cambio de frecuencia en los componentes electrónicos del instrumento, que resulta en una modulación de frecuencia la cual es una función de la humedad relativa. La frecuencia se convierte entonces en voltaje, que se convierte en un valor de humedad relativa. Y por el lado del termistor cambia su resistencia a la presencia de temperatura y son capaces de hacer un cambio de resistencia de 100 ohm por cada grado Celsius su cambio es bastante rápido.

Por este principio de funcionamiento no se pueden considerar el DTH 11 como bulbo seco o bulbo húmedo porque no se basa psicrometría sino se basa en componentes electrónicos convirtiéndose en un sensor digital.

### **2.2.2.3 Módulo RTC DS1307 reloj externo para Arduino.**

El módulo RTC DS1307 un circuito integrado capaz de almacenar y llevar la cuenta de la fecha y hora, además disponemos de unos cuantos bytes de datos de usuario en su memoria RAM no volátil (NVRAM). El Arduino posee un CPU bastante poderoso, y sin embargo aun así es incapaz de mantener la hora correctamente a largo plazo, debido a los microsegundos que se atrasan o adelantan al dividir la frecuencia del reloj principal para dar con el segundo exacto.

Este es un reloj de tiempo real con batería de respaldo (RTC) que permite su proyecto microcontrolador para realizar un seguimiento del tiempo, aún si no se reprograma, o si se pierde la fuente de poder. Perfecto para el registro de datos, la creación de reloj, de marcado de tiempo, temporizadores y alarmas, etc. El DS1307 es la RTC más popular, y funciona mejor con los chips basados en 5V como el Arduino. Se caracteriza por tener un bajo consumo de energía y también normalmente su propia fuente de alimentación auxiliar. Normalmente al recurrir a este tipo de circuitos integrados obtenemos una mejor precisión del tiempo, en la figura 2.8 se puede apreciar ambas caras del RTC en su respectiva PCB.

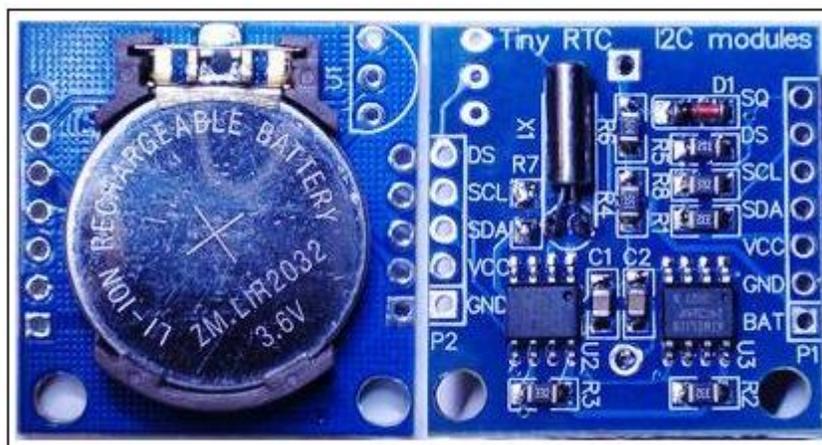


Figura 2.8 Modulo RTC DS 1307

**Bus I2C o TWI** Es el protocolo de comunicación físico mediante el cual se comunican el Arduino y el módulo RTC DS1307. El bus cuenta con dos líneas, de datos y de reloj, ambas del tipo colector abierto (o drenador abierto). Por lo que se requieren resistencias pull-up (Rpu en el esquemático) para generar un estado lógico alto como se muestra en la figura 2.9 el esquemático de un módulo RTC.<sup>43</sup>

<sup>43</sup> <http://www.geekfactory.mx/tutoriales/tutoriales-arduino/ds1307-en-tinyrtc-con-arduino/>

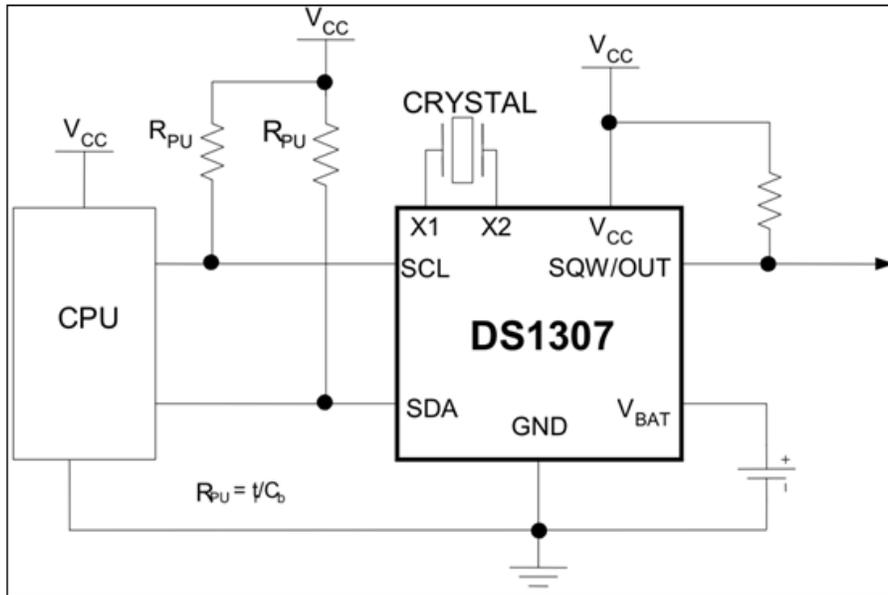


Figura 2.9 Esquemático del módulo RTC.

Los Decimales son codificados en binario es un estándar de datos en el cual los dígitos decimales se representan mediante secuencias de 4 bits. Esto es así porque con 4 bits se pueden representar todos los dígitos decimales del 0 al 9. En un byte en memoria se pueden almacenar números decimales del 0 al 99. En el DS1307 los datos de fecha y hora están codificados en BCD y veremos más adelante la forma de convertir de BCD a binario.

Para el funcionamiento del módulo RTC DS1307 requiere un cristal de  $2^{15} = 32,768$  Hz. Esto quiere decir que la frecuencia es divisible binariamente para generar un segundo exacto. También requiere dos fuentes de alimentación una alimentación de 5 volts que opera mientras el circuito esta encendido y funcionando y otra fuente de poder que proviene de una batería de litio tipo reloj que mantiene funcionando el reloj/calendario mientras la alimentación principal NO está disponible. Y ofrece un pin de salida que puede ser configurado para que el RTC entregue una onda cuadrada con una frecuencia configurable, también almacenan la fecha y la hora en formato BCD.

El modulo requiere las siguientes conexiones con la tarjeta Arduino como se muestra la figura 2.10. Nótese que el pin “DS” del módulo TinyRTC no se utiliza, corresponde al sensor de temperatura 1-wire que no se encuentra instalado de fábrica. Solamente son indispensables las líneas SDA, SCL y la alimentación de 5 volts.

La librería que se utiliza para este módulo es RTCLib de JeeLab, permite obtener y establecer el tiempo de un DS1307 originalmente escrito JeeLab la sintaxis para declarar esta librería es de la siguiente manera `#include "RTCLib.h"`. Para inicializar el módulo como una variable más dentro de un conjunto de instrucciones se hace de la siguiente manera `RTC_DS1307 RTC;`

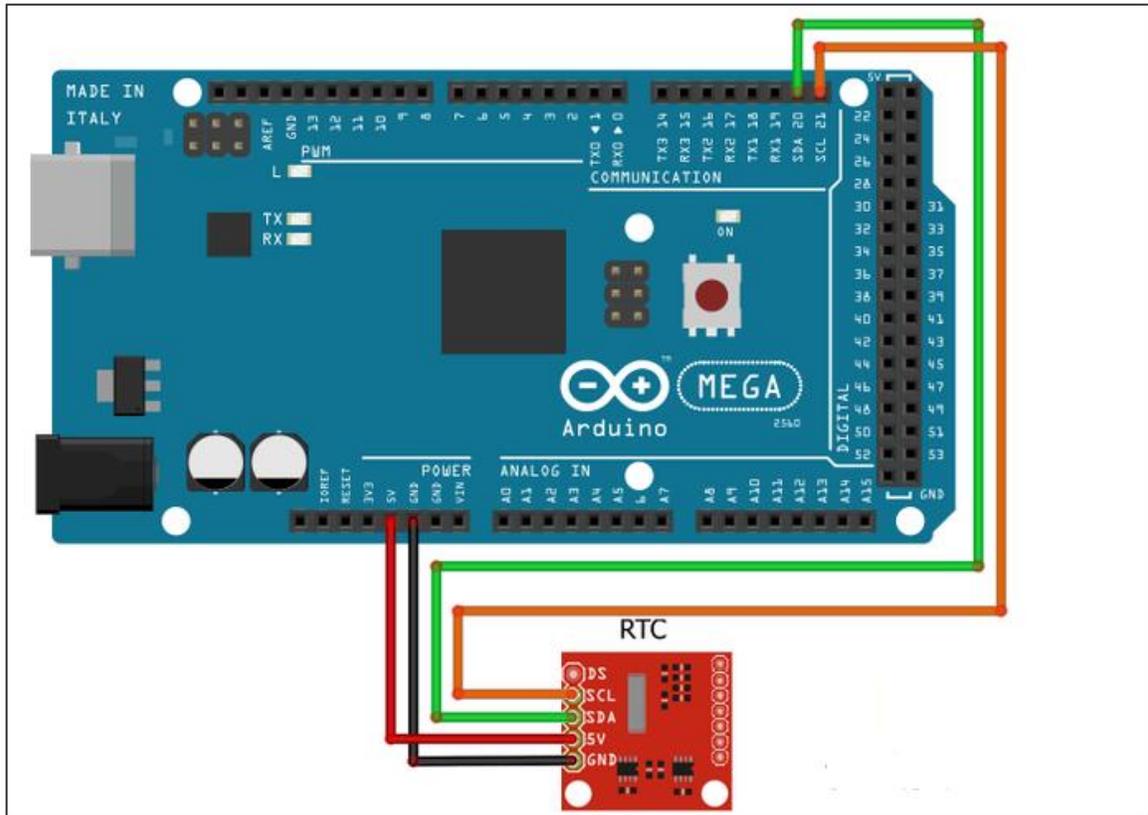


Figura 2.10 Módulo Tiny RTC conectado a la placa Arduino.

#### 2.2.2.4 Arduino Ethernet Shield

Un shield es una placa de circuito impreso que se coloca en la parte superior de una placa Arduino y se conecta a ella mediante el acoplamiento de sus pines sin necesidad de ningún cable. Su función es actuar como placas supletorias, ampliando las capacidades y complementando la funcionalidad de la placa Arduino base de una forma más compacta y estable.

Dependiendo del modelo, incluso se pueden apilar varios shields uno encima de otro. Esto dependerá de si el shield inferior ofrece pines-hembra para poder acoplarlos a los pines sobresalientes del dorso del shield superior.

Este shield está pensado para los que le quieren añadir a la placa Arduino la capacidad de conectarse a una red cableada TCP/IP. Aporta la misma funcionalidad que la placa Arduino Ethernet pero en forma de shield complementario acoplado a la placa Arduino figura 2.4. De hecho, este shield tiene el mismo chip controlador W5100 que la placa Arduino Ethernet, y se configura con la misma librería de programación: la librería “Ethernet”, la cual ya viene por defecto en el lenguaje Arduino.

Una vez conectado este shield sobre la placa Arduino gracias a la ristra de pines que encaja perfectamente arriba y abajo, para nuestros circuitos utilizaremos a partir de entonces las entradas y salidas ofrecidas por los pines-hembra del shield Ethernet. Estas entradas y salidas tienen exactamente la misma disposición y funcionalidad que las de la placa Arduino. Incluso si fuera necesario, se podría conectar sin problemas un segundo shield en la parte superior del shield Ethernet para seguir sumando funcionalidad.

El procedimiento de cargar nuestros programas en el microcontrolador de la placa Arduino acoplada al shield Ethernet no varía respecto al realizado normalmente con una placa Arduino independiente.



Figura 2.11 Arduino Ethernet Shield.

Primero debemos conectar la placa Arduino a nuestro computador mediante el cable USB, y una vez cargado el programa, como siempre, podremos seguir alimentando la placa vía USB o bien desconectarla del computador y enchufarla a una fuente de alimentación externa. A partir de entonces, al conector RJ-45 del shield le podremos conectar un cable de red de tipo estándar si deseamos comunicar el shield a un switch o un router o de tipo cruzado si deseamos comunicar el shield directamente a un computador.

Este shield requiere 5 V para funcionar. Este voltaje lo aporta la placa Arduino mediante el encaje del pin de alimentación correspondiente entre placa y shield. La comunicación entre el chip W5100 y la placa UNO se establece mediante los pines 10, 11, 12 y 13 vía SPI por lo que estos pines no se pueden utilizar para otro propósito. Esto implica que realmente al usar este shield tenemos 4 entradas/salidas digitales menos.

El shield se le debe asignar una dirección MAC y una dirección IP fija mediante la `Ethernet.begin()` función. Una dirección MAC es un identificador único global para un dispositivo en particular. Los shields de Ethernet actuales vienen con una etiqueta que indica la dirección MAC que se debe utilizar con ellos. Para shields mayores sin una dirección MAC dedicada, inventando al azar debería funcionar, pero no utilice la misma para varias tarjetas. Las direcciones IP válidas dependen de la configuración de su red. Es posible utilizar DHCP para asignar dinámicamente una dirección IP para el escudo. Opcionalmente, también se puede especificar una puerta de enlace de red y subred.

La última revisión de la Ethernet Shield incluye una ranura para tarjetas micro-SD, la cual se podrá utilizar mediante la librería de programación "SD", que viene por defecto en el lenguaje Arduino. Al igual que ocurre con el chip W5100, para poder comunicarse con la tarjeta micro SD la placa Arduino UNO utiliza el protocolo SPI, pero para ello esta vez emplea como pin SS el número 4 en vez del 10. Es decir, emplea los pines 4, 11, 12 y 13.

### **2.2.3 Amplificadores de instrumentación.**

Para el diseño de este medidor se hace la necesidad de amplificar la señal que proviene de un piranómetro, sensor para medir radiación solar a una superficie plana (180°) este instrumento proporciona en su salida niveles de voltaje muy bajos que se hace difícil para el Arduino censar esos niveles de voltaje. Para amplificar esta señal utilizamos un amplificador de instrumentación que describiremos a continuación.

El amplificador de instrumentación es un amplificador diferencial tensión-tensión cuya ganancia puede establecerse de forma muy precisa y que ha sido optimizado para que opere de acuerdo a su propia especificación aún en un entorno hostil. Estos circuitos integrados surgen ante la necesidad de medir tensiones de un nivel muy bajo en presencia de señales indeseadas, ante estas exigencias de medida que imponen los sensores, algunos requisitos principales para los amplificadores de instrumentación son los siguientes la ganancia debe ser seleccionable, estable y lineal, La entrada diferencial debe ser con CMRR alto, con una impedancia de entrada alta, con impedancia de salida baja y el error debe ser despreciable debido a corrientes y voltajes de offset.

#### **2.2.3.1 Amplificador de instrumentación AD 625.**

El AD625 es un amplificador de instrumentación de precisión está diseñado específicamente para cumplir con dos grandes áreas de aplicación. Los circuitos que requieren ganancias no estándar es decir, las ganancias no son fácilmente alcanzables con otros dispositivos. Los circuitos que requieren un amplificador de ganancia programable software precisión bajo costo para el ruido bajo y alto CMRR.

El AD625 es el Amplificador de la instrumentación solución más rentable disponible, un adicional de tres resistencias permitir al usuario establecer cualquier ganancia de 1 a 10,000. El error contribución de la AD625 es menos de 0.05% error de ganancia y bajo 5 ppm/° C Ganancia tc; rendimiento limitaciones son principalmente determinado por las resistencias externas. Rechazo de modo común es independiente de la resistencia de realimentación. También esta está disponible en tres grados de exactitud (A, B, C) para industrial (-40 °C a + 85 °C) Rango de temperatura, dos grados (J,K) para el anuncio publicitario (0 °C a + 70 °C) Rango de temperatura, y uno (S) de grado nominal sobre el (-55 °C a + 125 °C) de temperatura amplio alcance. En la figura 12 y 13 se muestra un AD 625 con sus respectivos pines y su diagrama interno.

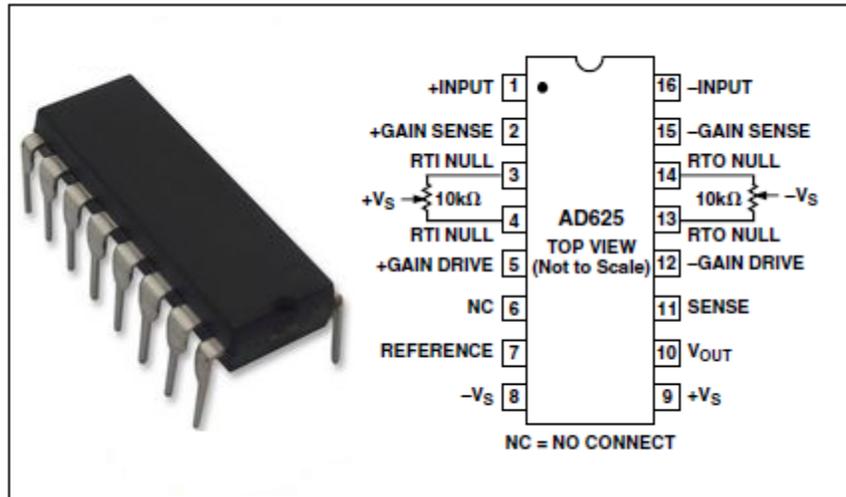


Figura 2.12 AD 625 con sus respectivos pines.

### Características del AD 625:

- Programadas por el usuario las ganancias de 1 a 10,000.
- Bajo error de ganancia: 0.02% Max.
- Baja ganancia tc: 5 ppm/c Max.
- Bajo no linealidad: 0.001% Max.
- Baja tensión offset: 25 V.
- Bajo nivel de ruido 4 nv/y esporádica; Hz (a 1 kHz) RTI.
- Producto ganancia-ancho: 25 MHz.
- Derivaciones de cerámica o de plástico paquete dip.
- 20-Terminal paquete LCC.
- Estándar militar dibujo disponibles.
- MII-piezas estándar disponibles.
- Bajo costo.

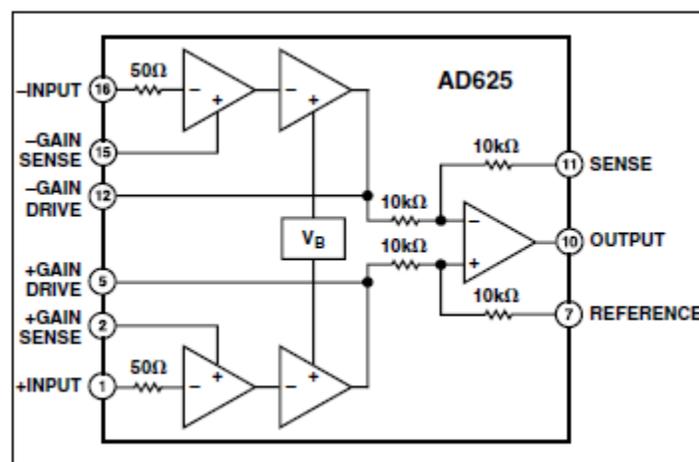


Figura 2.13 Diagrama de circuito integrado AD625.

### 2.2.3 amplificación de señal con el AD 625.

La ganancia del amplificador instrumentación AD 625 es bastante exacta comprobada experimentalmente, este circuito integrado de precisión puede amplificar señales muy pequeñas de voltaje y transformarlas a señales más grandes, que puedan ser leídas por el Arduino es uno de los motivos que se escogió este amplificador para realizar este medidor de irradiancia solar.

La señal que se amplifica es la del piranómetro sensor de irradiancia solar este sensor con la presencia del sol emite pequeñas variaciones de voltaje imposible la lectura para los micro controladores.

La ecuación 2.1 se usa para el cálculo de los componentes que se utilizará el circuito de amplificación de señal que es la que se detalla en la figura 2.14 es la siguiente.

$$G = \frac{2R_F}{R_G} + 1 \quad \text{Ecuación (2.1)}$$

$$G = \frac{2(22K)}{220} + 1$$

$$G = 201$$

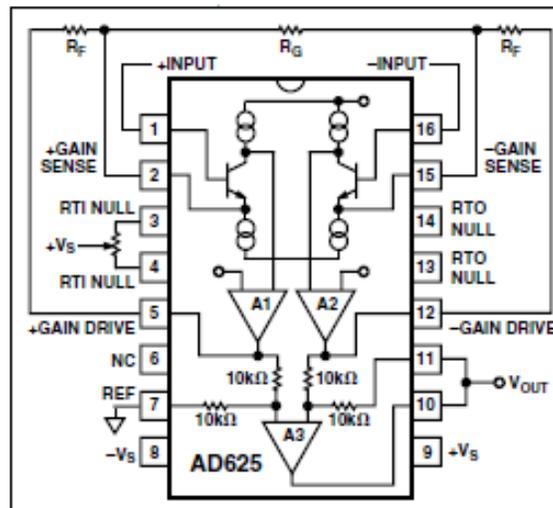


Figura 2.14 Configuración de ganancia fija del AD 625.

Se realizó una comparación de medición con el circuito armado de la figura 2.14 y teóricamente los resultados fueron los siguientes utilizando una ganancia aproximada de 200 esto debido a que se escogió valores de resistencia para  $R_G$  de  $220\Omega$ , al despejar la ecuación 2.1 obtenemos un valor de  $R_F$  de  $22k\Omega$ . En la tabla 2.3 se muestra valores obtenidos teóricamente asumiendo que los valores de resistencia son exactos y también se muestran datos experimentales introduciendo en el pin 1 y 16 amplificador AD 625 con valores de resistencia aproximados a los valores de diseño.

Los datos de voltaje de entrada fueron obtenidos con un piranómetro con una constante 13u [V / (Wm<sup>-2</sup>)] para realizar estas pruebas de la tabla 2.3.

<b>Vi</b>	<b>Vo teórico</b>	<b>Vo experimental</b>
0.00831	1.67	1.66
0.00839	1.69	1.68
0.00825	1.66	1.65
0.00826	1.66	1.65
0.00916	1.84	1.83
0.00929	1.87	1.86
0.00936	1.88	1.87
0.00937	1.88	1.87
0.00802	1.61	1.60
0.0097	1.95	1.94
0.00978	1.97	1.96
0.00879	1.77	1.76
0.01	2.01	2.00
0.00946	1.90	1.89
0.00541	1.09	1.08
0.00479	0.96	0.96
0.00727	1.46	1.45
0.00837	1.68	1.67
0.00804	1.62	1.61
0.00994	2.00	1.99
0.00981	1.97	1.96
0.00948	1.91	1.90
0.0084	1.69	1.68
0.00897	1.80	1.79

Tabla 2.3 Voltaje de comparacion de AD 625.

Calculo de V de salida teórico.

$$V_o = 0.00831 * 201$$

$$V_o = 1.67 \text{ V}$$

Con la ecuación 2.1 se diseña el circuito de la figura 2.14 con los valores de resistencia mencionados y se puede demostrar que los voltajes de salida teóricos y experimentales se aproximan entre ambos.

## 2.2.4 Implementación de circuitos para el medidor de irradiancia solar.

En esta sección explicaremos cada uno de los circuitos utilizados en el diseño del medidor de irradiancia solar. Cada circuito tiene una función diferente desde convertir voltaje de AC/DC hasta amplificar voltaje.

### 2.2.4.1 Circuito Arduino.

En la figura 2.15 se muestra el circuito más importante del medidor de irradiancia solar, en esta sección el Arduino se conecta a diferentes accesorios como reloj RTC DS1307, pantalla LCD, sensores como el DHT 11 y diferentes circuitos complementos como la del amplificador de señal AD625. Prácticamente aquí se implementan todas funciones que caracterizan el medidor de irradiancia solar.

En la figura anterior no se mostró El Child Ethernet que se conectó de la siguiente manera como se muestra en la figura 2.16 sobre esta conexión se diseñó una PCB armar el circuito de la 2.15 como prácticamente los pines del Arduino mega se reflejan en el Child Ethernet en la misma posición.

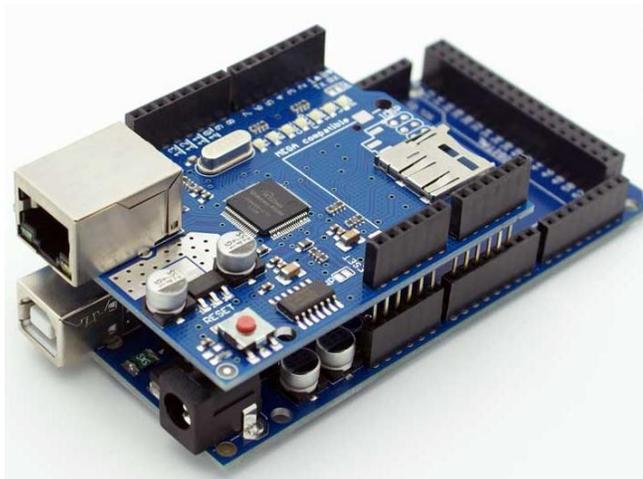


Figura 2.15 Ethernet conectado al Arduino Mega.

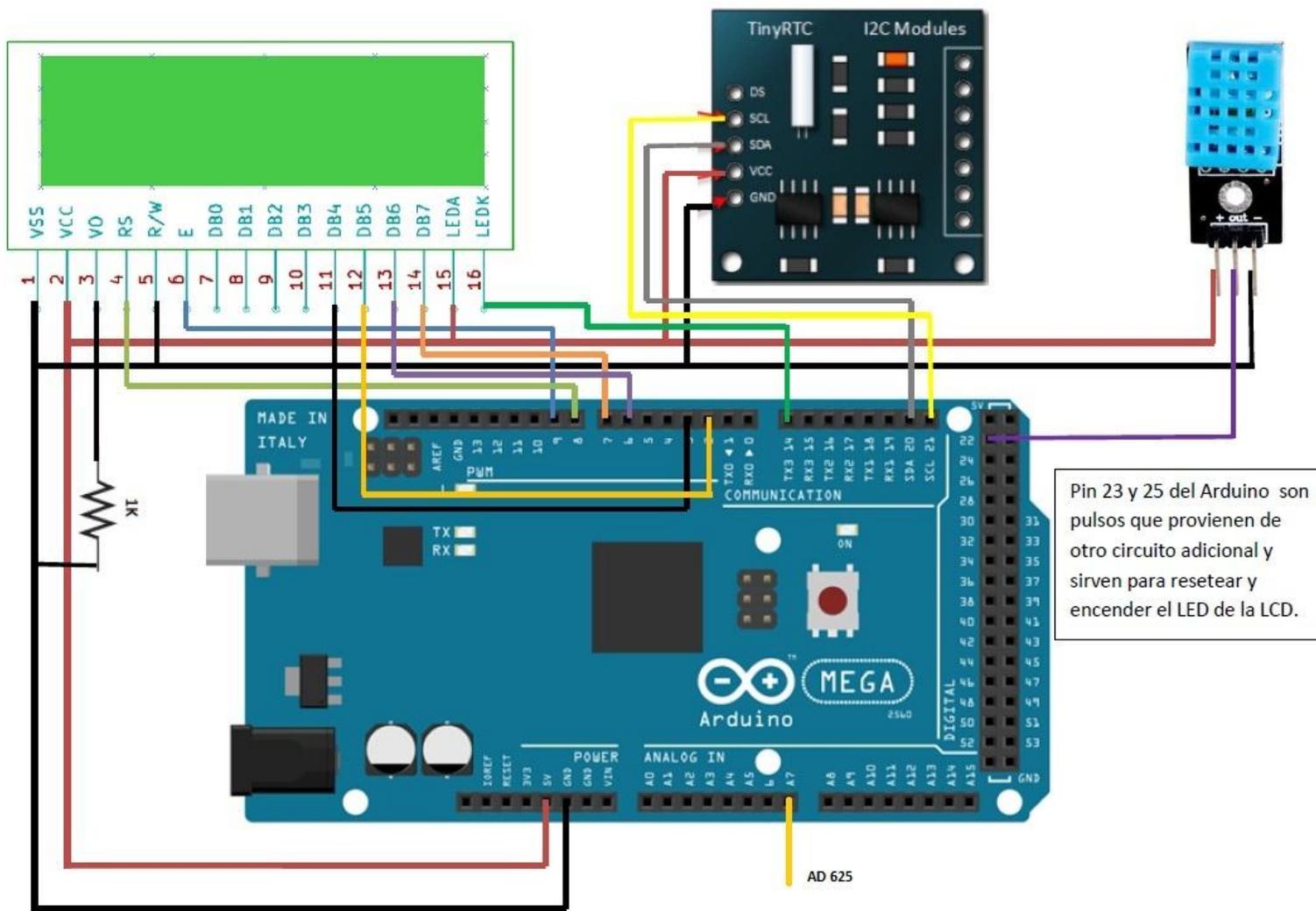


Figura 2.16. Circuito Arduino para implementación del medidor de irradiancia solar.

La pantalla LCD se conecta de la siguiente manera a los pines digitales del Arduino mega como se muestran en la tabla 2.4.

LCD	PINES ARDUINO
1	GND
2	VCC 5V
3	A GND a con una R de 1K
4	8
5	GND
6	9
11	3
12	2
13	6
14	7
15	VCC 5V
16	14

Tabla 2.4 Conexión de la LCD al Arduino.

El RTC DS1307, El sensor de temperatura y humedad DTH 11 y los pulsos que se utiliza para resetear el dispositivo y encender el LED de la LCD están conectados de la siguiente manera como se muestra en la tabla 2.5.

DTH 11	PULSOS	RTC DS 1307	PINES ARDUINO
		SDA	SDA 20
		SCL	SCL 21
S			22
	X		23
	X		25

Tabla 2.5 Conexión DTH11, pulsos y RTC DS 1307 a los pines del Arduino.

#### 2.2.4.2 circuitos de amplificación de señal.

En este circuito implementado amplificamos la señal de voltaje que proviene de un sensor de llamado piranómetro que sirve para medir el potencial solar, este sensor emite pequeñas variaciones de voltaje que el dispositivo Arduino es no las puede leer y es por esa razón que se implementó el siguiente circuito utilizando un amplificador de instrumentación AD 625.

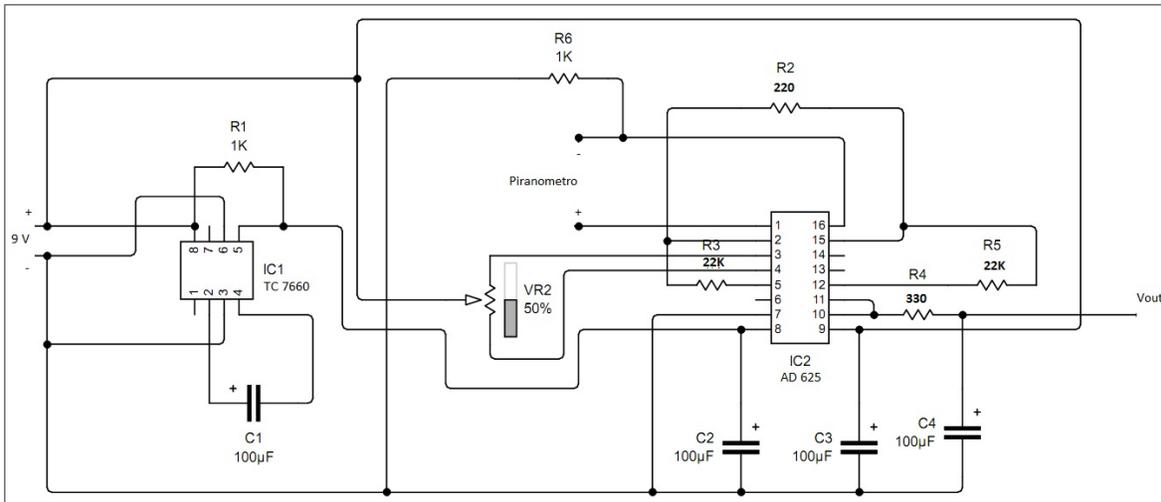


Figura 2.17. Implementación de circuito de amplificación de señal.

En el circuito de la figura 2.17 se implementó la amplificación de señal se utilizaron dos circuitos integrados TC 7660 y AD 625, el TC 7660 es una fuente de voltaje negativa de -9 V en la salida, sirve para alimentar el amplificador de instrumentación ya que el AD 625 utiliza alimentación de voltaje bipolar positiva y negativa, la salida TC 7660 es el pin 5 donde se obtienen el voltaje negativo de -9 V que alimenta el AD 625 en el pin 8. El potenciómetro se utiliza para calibrar la ganancia del amplificador de instrumentación. También se modificó el circuito en la salida del AD 625 con el circuito que se muestra en la figura 2.14. Se agregó un filtro pasa bajas a la salida y los capacitores de desacoplo para estabilizar el voltaje en los 8 y 9 del AD 625.

Elementos que se utilizaron en el circuito de amplificación se muestran en la siguiente tabla.

COMPONENTES PARA EL CIRCUITO AD 625
• 1 AD625
• 2 capacitores cerámicos de 0.1uF
• 2 resistencias de 22KΩ
• 1 resistencia de 220Ω y una de 330Ω
• 1 potenciómetro de 100kΩ
• 1 base para circuito integrado de 16 pines.
• 1 capacitor electrolítico de 1uF

Tabla 2.6 Tabla que muestra los componentes a utilizar.

## 2.2.5 Código Arduino implementado en el medidor de irradiancia solar.

La plataforma hardware Arduino es un microcontrolador que requiere de una programación para realizar una acción específica, la programación se basa en C/C++ y uno de los principales requisitos para programar conocer el lenguaje de programación y conocer tema de la aplicación que deseamos. En este código Arduino que implementamos se aplicaron conocimientos de fotovoltaicos y meteorología para que realizara funciones de medición de temperatura, humedad y irradiancia solar.

Este código Arduino se realizó en secciones pequeñas de códigos cada sección realiza una función importante desde declarar variables hasta realizar acciones complejas, pero al final es un solo código separado por archivos diferentes con diferente nombre, el fin de realizarlo de esta manera es para que sea más fácil entenderlo, y que el mantenimiento y depuración que deba dársele sea más fácil de aplicar. Existe un archivo llamado Index.ino donde se carga todas las secciones del código como se muestran en la figura 2.18. A continuación describiremos cada sección del código Arduino.

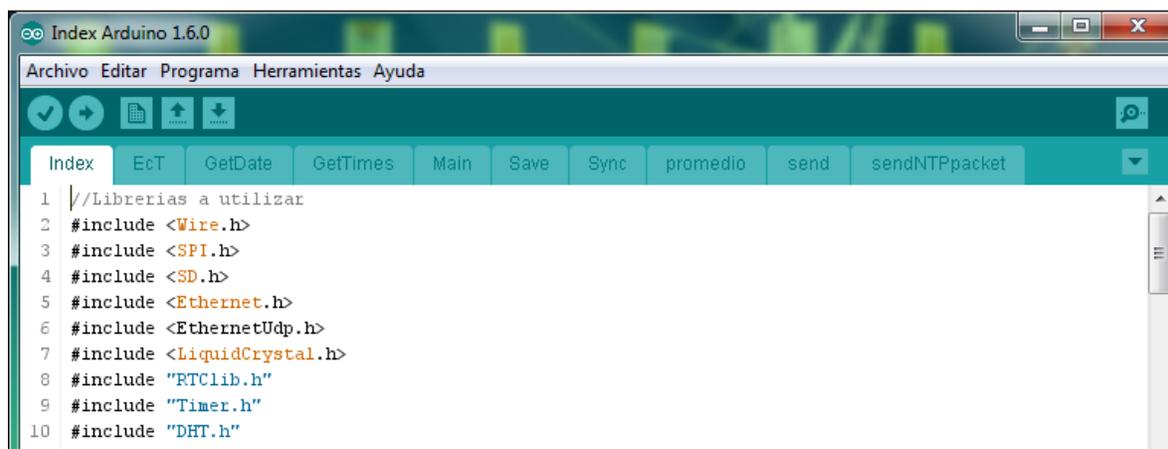


Figura 2.18 Archivo Index.ino con sus diferentes secciones

### Archivo Index.ino

El archivo llamado Index.ino es el segmento inicial del código este se encarga de llamar a todas las librerías propias de Arduino a utilizar en esta aplicación, también se encarga de definir todas las variables a utilizar en el código en cada una de las secciones también se realiza la declaración de la IP a donde se enviaran datos obtenidos a un servidor web.

```
//Librerias a utilizar
#include <Wire.h>
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
#include <Ethernet.h>
#include <EthernetUdp.h>
#include <LiquidCrystal.h>
#include "RTClib.h"
#include "Timer.h"
```

```

#include "DHT.h"
//definicion de variables
LiquidCrystal lcd(8, 9, 3, 2, 6, 7);
RTC_DS1307 RTC;
DHT dht(22,DHT11);
short unsigned int dias[]={31,28,31,30,31,30,31,31,30,31,30,31};
//-----

//Datos servidor N RTP
byte mac[]={0x90,0xA2,0xDA,0x0E,0x10,0x57};
unsigned int localPort = 8888; //Local port to listen for
UDP Packets
IPAddress timeServer(132, 163, 4, 101);
const int NTP_PACKET_SIZE= 48; //NTP Time stamp is in the
firth 48 bytes of the message
byte packetBuffer[ NTP_PACKET_SIZE]; //Buffer to hold incomming
and outgoing packets
EthernetUDP Udp; //UDP Instance to let us
send and recieve packets
const long timeZoneOffset = -21600L;
//-----

float tensionArduino;
float tensionBateria;
//datos servidor web
IPAddress ip(10,152,174,34); //direccion ip a la que se
conectará el arduino en caso de no establecer comunicacion con ubidots
EthernetClient client; //inicializacion
char server[] = "192.168.1.31"; // Servidor local
char server_b[] = "things.ubidots.com"; //direccion del servidor
al cual se conectará // name address for pachube API
char ch,timestamp[15]="1388534400";
unsigned long lastConnectionTime = 10; // last time you connected
to the server, in milliseconds
boolean lastConnected = false; // state of the connection
last time through the main loop
const unsigned long postingInterval = 0; //delay between updates to
ubidots.com
//variables auxiliares
boolean flagsd=false, flagerror=false;
void(* resetFunc) (void) = 0; //funcion para reiniciar arduino
float ET=0;
File myfile,tmpfile;
Timer k;
unsigned long Ti;
unsigned long To;
unsigned long dT;
String LST;
String date;
float t,h,ira;
float Tp=0, Hp=0, Ip;
int Ci=0, disp=0;
boolean taken=false, syn=false, reseted=true, light=false;
//Inicializacion de las variables y objetos a utilizar
//-----

void setup() {
  Serial.begin(9600); //monitor serial

```

```

if(SD.begin(4) == 0) //Tarjeta SD
    Serial.println("SD failed");
else
    Serial.println("SD ok");
if (Ethernet.begin(mac) == 0) //Modulo Ethernet
    Serial.println("Failed to configure Ethernet using DHCP");
else
    Serial.println("Network OK");
Udp.begin(localPort); //Protocolos UDP
RTC.begin(); //Reloj
Wire.begin();
dht.begin(); //sensor de temperatura
EcT(); //Calculo de la
ecuacion del tiempo
if(SD.exists("tmp.txt")){
    SD.remove("tmp.txt"); //archivo temporal de datos no
embiados
}
//Variables internas
h = dht.readHumidity();
t = dht.readTemperature();
//Pines a utilizar
pinMode(23, INPUT);
pinMode(14, OUTPUT);
pinMode(25, INPUT);
pinMode(30, OUTPUT);
digitalWrite(14, HIGH);
digitalWrite(30, HIGH);
//Inicializacion de la pantalla
lcd.begin(16, 2);
lcd.setCursor(0,0);
lcd.print("Inicializando");
//Llamado a la funcion main cada 0.1s
k.every(500,Main);
}
//-----
void loop() {
    k.update();
}

```

## Ect.in

Como últimos segmentos están la funcione EcT, que se encarga de calcular el valor de la ecuación del tiempo en base a la ecuación de Spencer, y luego añadir este resultado al valor del tiempo obtenido por el servidor NTP. Esto con el objetivo que el sistema almacene los datos con hora solar en lugar de hora local.

```

void EcT(void) {
    Sync();
    DateTime time = RTC.now();
    int di=0;
    for(int Ci=0;Ci<time.month();Ci++){
        di+=dias[Ci];
    }
}

```

```

    }
    //utilizando funcion de Spencer.
    ET=(9.93*sin((198+1.971*di)*(3.1416/180)))+(7.37*sin((175+0.986*di)*(3.
1416/180)));
    ET*=60;
    Serial.println(ET);
    Sync();
}

```

### GetDate.ino

```

void GetDate(DateTime time){
    if(time.day()<10)
        date="0"+String(time.day())+"/";
    else
        date=String(time.day())+"/";
    if(time.month()<10)
        date+="0"+String(time.month())+"/";
    else
        date+=String(time.month())+"/";
    date+=String(time.year());
}

```

### GetTime.ino

```

String GetTimes(DateTime time){
    String tm;
    short int k=0;
    if(time.hour()>12)
        k=12;
    if(time.hour()<10)
        tm="0"+String(time.hour()-k)+":";
    else
        tm=String(time.hour()-k)+":";
    if(time.minute()<10)
        tm+="0"+String(time.minute())+":";
    else
        tm+=String(time.minute())+":";
    if(time.second()<10)
        tm+="0"+String(time.second());
    else
        tm+=String(time.second());
    if(time.hour()<=12)
        tm+=" am";
    else
        tm+=" pm";

    return tm;
}

```

### Main.ino

En esta parte se encuentra también el llamado a la función principal del programa, llamada "Main", esta función es ejecutada cada 0.1s, esta función se encarga de llamar a

las funciones restantes, las funciones “Save” y “Sync”, ejecutadas cada 6 segundos y 5 minutos respectivamente. Además, en este fragmento de código se encuentra el control para los botones, y la función de protección contra descarga de la batería.

```

void Main(void) {
  //Toma de una muestra una ves cada 6 segundos
  DateTime time = RTC.now();
  if(time.second()%6 == 0 && !taken ){
    Save(RTC.now());
    taken=true;
  }else{
    if((time.second()%6)!=0)
      taken=false;
  }
  //sincronisacion, una ves cada 5 minutos
  if(time.minute()%5==0 && time.second()==8 && !syn){
    Sync();
    syn=true;
  }else{
    if(time.minute()%5!=0 && time.second()!=8)
      syn=false;
  }
  if(time.hour()==0 && millis()> 10e6 ){
    resetFunc();
  }
  //Luz display
  if(digitalRead(23)==0){
    Serial.println("activo");
    digitalWrite(14,LOW);
    light=true;
  }
  if(light==true){
    disp++;
    if(disp==200){
      Serial.println("NO");
      digitalWrite(14,HIGH);
      light=false;
      disp=0;
    }
  }
  //Boton reinicio
  if(digitalRead(25)==0){
    resetFunc();
  }

  //relay control bateria
  if(analogRead(A15) < 300){
    digitalWrite(30,LOW);
  } }

```

### Save.ino

Función “Save”: Se encarga de tomar los datos de los tres sensores, almacenando los valores en una variable temporal, muestra los datos en el display y almacena los datos en la memoria SD en **un** archivo de texto plano (.txt). Una vez se han almacenado 50 datos, se llama a la función “promedio”.

```

void Save(DateTime time){
  myfile=SD.open("prueba01.txt",FILE_WRITE);
  if(myfile){
    GetDate(time);
    LST=GetTimes(time);
    //-----
    //lectura del sensor de humedad y temperatura y de la irradiancia
    ira=map(analogRead(A7),0,1023,0,255); // mejorando sensibilidad
    Serial.print("VALOR ANALOGICO: ");
    Serial.println(ira);
    ira*=5.0/255.0; // aqui tambien
    ira/=(201*0.995604805);
    ira/=0.00001540;
    h = dht.readHumidity();
    t = dht.readTemperature();
    Tp+=t;Hp+=h;Ip+=ira;Ci++;
    // despues de 50 datos obtener el promedio
    if(Ci==50){
      Ci=0;
      promedio();
      Tp=0;Hp=0;
    }
    //-----
    //Impresion de la fecha y datos en archivo de texto y en el display
    Serial.println(date+", "+LST+", "+String(h)+"% , "+String(t)+"C,
"+String(ira));
    myfile.println(date+", "+LST+", "+String(h)+"%, "+String(t)+"C,
"+String(ira));
    myfile.close();
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(String(ira)+" w/m2");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(String(h)+"% "+String(t)+"C");
  }
}

```

## Promedio.ino

Función “promedio”: Toma las variables temporales creadas por la función “Save”, y las divide entre 50, obteniendo así el promedio de todas las capturas, luego se llama a la función “Send”.

```

void promedio(void){
  Tp/=50;
  Hp/=50;
  Ip/=50;
  Serial.println("Promedio ultimo minuto: "+String(t)+" "+String(h)+"
"+String(ira));
  if (Send(t,h,ira)){
    Serial.print("HAY ETHERNET....");
    Serial.println(("DATO ENVIADO"));
  }else{

```

```

    Serial.print("NO HAY ETHERNET....");
    Serial.println(("DATO ALMACENADO"));
  }
}

```

## Save.ino

Función "Save": Se encarga de tomar los datos de los tres sensores, almacenando los valores en una variable temporal, muestra los datos en el display y almacena los datos en la memoria SD en un archivo de texto plano (.txt). Una vez se han almacenado 50 datos, se llama a la función "promedio".

```

void Save(DateTime time){
  myfile=SD.open("prueba01.txt",FILE_WRITE);
  if(myfile){
    GetDate(time);
    LST=GetTimes(time);
    //-----
    //lectura del sensor de humedad y temperatura y de la irradiancia
    ira=map(analogRead(A7),0,1023,0,255); // aqui modifique
    Serial.print("VALOR ANALOGICO: ");
    Serial.println(ira);
    ira*=5.0/255.0; // aqui tambien
    ira/=(201*0.995604805);
    ira/=0.000013;
    h = dht.readHumidity();
    t = dht.readTemperature();
    Tp+=t;Hp+=h;Ip+=ira;Ci++;
    // despues de 50 datos obtener el promedio
    if(Ci==50){
      Ci=0;
      promedio();
      Tp=0;Hp=0;
    }
    //-----
    //Impresion de la fecha y datos en archivo de texto y en el display
    Serial.println(date+", "+LST+", "+String(h)+"% , "+String(t)+"C,
"+String(ira));
    myfile.println(date+", "+LST+", "+String(h)+"%, "+String(t)+"C,
"+String(ira));
    myfile.close();
    lcd.clear();
    lcd.setCursor(0,0);
    lcd.print(String(ira)+" w/m2");
    lcd.setCursor(0,1);
    lcd.print(String(h)+"% "+String(t)+"C");
  }
}

```

## Send.ino

Función "Send": Recibe los datos promedio de la función "promedio", y los envía al servidor montado en una máquina virtual, si existe conexión a internet, los datos son enviados inmediatamente, en caso de no existir conexión a internet, se crea un archivo temporal con todos los datos que no han podido ser enviados, y cuando se restablezca la conexión, estos datos serán enviados al servidor.

```
boolean Send(float dT, float dH, float dG) {
  client.stop();
  boolean flagtime=false;
  int le=0, cont=0, cont2=0;
  //verifica coneccion con internet
  if (client.connect(server, 80)) {
    Serial.println("CONECTANDO...");
    //verifica la existencia de un archivo temporal de datos que no
    han podido ser enviados anterioremente
    if(SD.exists("tmp.txt")){
      //Si existe, se deben de reenviar estos datos
      resend();
    }else{
      //si no, se envia el dato actual
      String ap="[{"variable\": \"5793b73f7625421ebf71145f\", \"value\": \"
+String(dT)+\"}, {"variable\":
\"5793b6a576254217e708251e\", \"value\": \"+String(dH)+\"}, {"variable\":
\"5793b78976254222ed97127\", \"value\": \" +String(dG)+\"}]\";
      sends(ap);
    }
    return true;
  }else {
    Serial.println(("CONEXION FALLIDA"));
    client.stop();
    //si la conexion ainternet no existe, se guarda los datos en el
    archivo temporal
    tmpsave(dT, dH, dG);
    return false;
  }
}
//Funcion para enviar el dato a internet
void sends(String aa){

  String id_key = "57c87dad2976e7e161ede3a28658cf5c";
  String data = "json_str=" + aa + "&id_key=" + id_key;

  Serial.println(data);

  //int len=aa.length();

  int len = data.length();
  Serial.println("***** Enviando *****");
  client.println("POST /prueba/add.php HTTP/1.1");
  client.println("Host: 192.168.1.31"); // SERVER ADDRESS HERE TOO
  client.println("Content-Type: application/x-www-form-urlencoded");
```

```

        client.print("Content-Length: ");
        client.println(len);
        client.println();
        client.print(data);
        client.println();

        client.stop();

}
//Funcion que prepara el dato para reenviarlo si no se habia podido envi
ar antes
void resend(void) {
    tmpfile=SD.open("tmp.txt",FILE_READ);
    char tmpT[3][10],ch;
    int i=0,j=0;
    while(tmpfile.available(>0) {
        ch=tmpfile.read();
        if(ch==',' ) i++;
        if(ch=='\n') {
            i=0;
            j=0;
            String a="[{"variable\": \"5793b73f7625421ebf71145f\", \"value\": "
+String(tmpT[0])+"}, {"variable\":
\"5793b6a576254217e708251e\", \"value\": "+String(tmpT[1])+"}, {"variable\"
: \"5793b78976254222ed97127\", \"value\": " +String(tmpT[2])+"}]";
            sends(a);
        }
        if(ch!=','&&ch!='\n'){
            tmpT[i][j]=ch;
            j++;
        }
    }
    tmpfile.close();
    SD.remove("tmp.txt");
}
//Funcion que almacena el dato que no se pudo eniar en un archivo tempora
l.
void tmpsave(float ddT,float ddH,float ddG) {
    tmpfile=SD.open("tmp.txt",FILE_WRITE);
    tmpfile.println(String(ddT)+","+String(ddH)+","+String(ddG));
    tmpfile.close();
}

```

## SendNTPpacket.ino

```

unsigned long sendNTPpacket(IPAddress& address){
    memset(packetBuffer, 0, NTP_PACKET_SIZE);
    packetBuffer[0] = 0b11100011; // LI, Version, Mode
    packetBuffer[1] = 0; // Stratum, or type of clock
    packetBuffer[2] = 6; // Polling Interval

```

```

packetBuffer[3] = 0xEC; // Peer Clock Precision
packetBuffer[12] = 49;
packetBuffer[13] = 0x4E;
packetBuffer[14] = 49;
packetBuffer[15] = 52;

Udp.beginPacket(address, 123); //NTP requests are to port 123
Udp.write(packetBuffer,NTP_PACKET_SIZE);
Udp.endPacket();
}

```

## Sync.ino

Función “Sync”: se encarga de sincronizar el reloj interno, haciendo uso de un servidor NTP externo con dirección IP 132.163.4.101, utilizando el protocolo UDP de la capa de transporte del modelo TCP/IP con numero de puerto 123.

Para hacer uso de estos protocolos se utilizan las librerías “Ethernet UDP.h”. Este proceso es algo complejo de entender, y está fuera de los objetos de estudio de este proyecto, por lo que no se explicara con detalle.

```

void Sync(void) {
  //envio de la solicitud del paquete NTP
  sendNTPpacket(timeServer);
  //en espera
  delay(1000);
  Serial.println("Sincronizando reloj");
  //resepcio y decodificacion del paquete NTP
  if (Udp.parsePacket()) {
    Udp.read(packetBuffer,NTP_PACKET_SIZE);
    unsigned long highWord = word(packetBuffer[40], packetBuffer[41]);
    unsigned long lowWord = word(packetBuffer[42], packetBuffer[43]);
    unsigned long secsSince1900 = highWord << 16 | lowWord;
    const unsigned long seventyYears = 2208988800UL;
    unsigned long epoch = secsSince1900 - seventyYears-21600UL;
    //Ajuste de la hora para saber la hora solar
    RTC.adjust(epoch+int(ET)+197);
  }
}

```

# **3. Desarrollo de mediciones y manipulación de datos.**

### 3.1. Descripción del sistema de medición de irradiancia solar.

Este sistema está diseñado para ejercer como una pequeña estación meteorológica con tres variables a medir irradiancia solar, temperatura, humedad relativa. Con el fin de utilizarlo en aplicaciones fotovoltaicas y poder realizar diagnósticos del potencial solar en las diferentes zonas del país.

El dispositivo puede conectarse a un sitio web, donde se pueden descargar los datos medidos en un periodo de tiempo determinado. Tomando en cuenta que es de fácil instalación y que los datos de cada uno son almacenados en un servidor donde los datos obtenidos son representados en gráficas para una mejor interpretación de usuario en la figura 3.1 se muestra esquemáticamente como funciona este sistema de monitoreo.

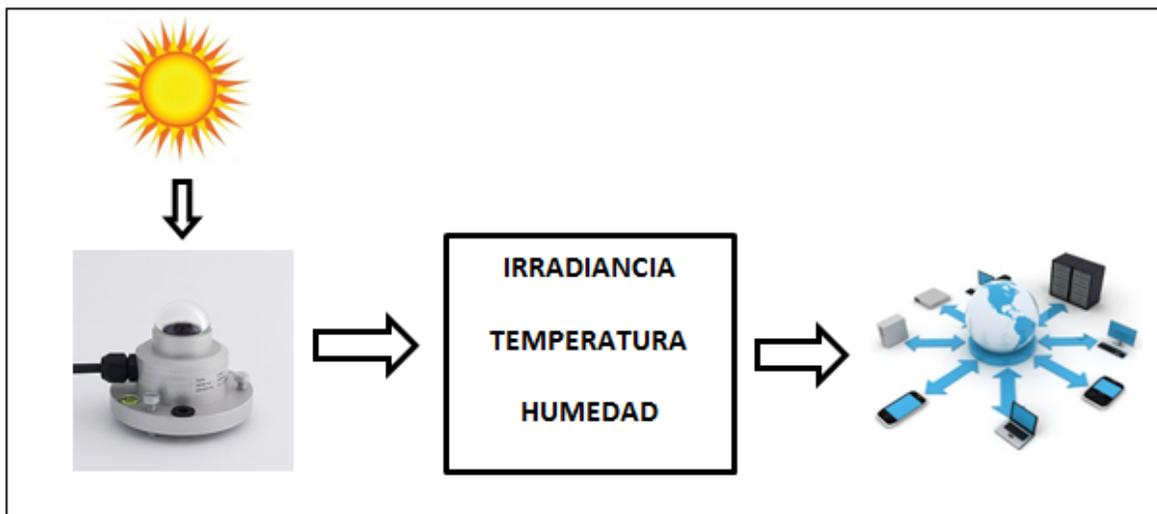


Figura 3.1 Sistema de monitoreo de irradiancia solar.

El sol es la fuente de energía que necesitamos medir para lograr esto se utilizó un piranómetro la cual es un transductor que a través de la presencia de luz solar emite pequeñas variaciones de voltaje que son procesador por el medidor implementado que una de sus características es mandar todas estas mediciones a la Web y todos los datos recolectados guardarlos en servidor Web.

### 3.1.1 Comparación de datos obtenidos de irradiancia solar.

En sección realizaremos comparaciones que demuestran la precisión de medidor de irradiancia implementado. Para esta prueba utilizamos un piranómetro que está compuesto por un transductor obteniendo una señal de voltaje y corriente directamente proporcional a la irradiancia medida para esto se hace la necesidad de tener una constaten propia del piranómetro para poder cuantificar la irradiancia, para este prueba seleccionamos un piranómetro de segunda clase (calidad moderada) con una constante de 19.27u [V / (Wm<sup>-2</sup>)] con la siguiente ecuación (3.1) podemos calcular experimentalmente la irradiancia.

$$V = K * I \quad (3.1)$$

V: voltaje del piranómetro.

K: Constante del piranómetro [V / (Wm<sup>-2</sup>)].

I: Irradiancia.

Para realizar estas pruebas se realizan un conjunto de mediciones utilizando un piranómetro, voltímetro y el medidor implementado.

Despejando la ecuación (3.1)

$$I = \frac{V}{K}$$
$$I = \frac{0.0124V}{0.00001927 \text{ V} / (\text{Wm}^{-2})}$$
$$I = 643.48 \text{ W/m}^2$$

De esta forma se calcula la irradiancia brindada por el piranómetro tomando lecturas con un voltímetro luego sustituyendo en la ecuación (3.1) el voltaje bridado por el piranómetro y constante del piranómetro, con este cálculo ya se puede hacer la comparación con el medidor implementado como se muestra en la tabla 3.1 aquí ya se puede ver la diferencia entre la medición que está brindando el medidor implementado y los datos calculados con el piranómetro.

En la tabla 3.1 se muestra un conjunto de mediciones para realizar una comparación de datos obtenidos de un piranómetro con los datos aportados por el medidor implementado.

Voltaje de piranómetro (mV)	Irradiancia (W/m <sup>2</sup> )	Irradiancia calculada (W/m <sup>2</sup> )
12.4	655	643.48
12.5	660	648.67
10.9	564	565.64
10.6	554	550.08
11.3	620	586.40
11.8	630	612.35
11.7	611	607.16
11.2	589	581.21
12.3	650	638.29
12.6	666	653.86
12.4	655	643.48
12.3	645	638.29
12.6	681	653.87
18.2	966	944.47
18.2	962	944.47
18.1	950	939.28
18.2	961	944.47
18.0	950	934.09
17.8	945	923.71
5.70	284	295.79
5.60	279	290.60
5.50	269	285.42
5.40	264	280.23
5.30	263	275.04
5.20	250	269.85
3.50	203	181.63
4.40	218	228.33

Tabla 3.1 Comparación de la lectura del medidor con datos obtenidos de un piranómetro

### 3.1.2 Calculo del error de las tres variables de medición del sistema.

#### Irradiancia solar.

Con las mediciones realizadas anteriormente ya podemos estimar el porcentaje de error del dispositivo implementado. Con la siguiente ecuación 3.2 podemos estimar error

$$e = \frac{|f_m - f_r|}{f_r} * 100 \quad (3.2)$$

fr: Valor obtenido.

fm: Valor medido.

$$e = \frac{|923.71 - 945|}{945} * 100$$

$$e = 2.25 \%$$

Con este cálculo demostramos el porcentaje de error que existe entre dato medidos y datos obtenidos con el medidor implementado el error es aproximadamente el 2.25% en cada medición que se realiza.

### **Temperatura.**

Sustituyendo en la ecuación 3.2 con valores de temperatura grados Celsius obtenemos.

$$e = \frac{|27 - 25|}{25} * 100$$

$$e = 8 \%$$

El valor medido fue tomado a las 11:00 AM y se obtuvo un porcentaje bastante aceptable.

### **Humedad.**

Sustituyendo en la ecuación 3.2 con valores de humedad en % obtenemos.

$$e = \frac{|65 - 70|}{70} * 100$$

$$e = 7.14\%$$

El valor medido fue tomado a las 11:00 AM y se obtuvo un porcentaje bastante aceptable.

Los datos fueron comparados con la estación meteorológica instalada en la escuela de ingeniería eléctrica.<sup>44</sup> Estos son medidores digitales de alta precisión.

### **3.1.3 Desarrollo sistemático de mediciones de irradiancia.**

La medición de irradiancia que se hará en los diferentes Campus de la Universidad de El Salvador (UES), los equipo de medición que se han acoplado a los diferente Pirómetros que funcionan a través de una transductor que con la presencia de luz solar emiten pequeñas variaciones de voltajes mostrando las lecturas en los instrumentos realizados con Arduino y así obtener el potencia solar en  $W/m^2$ . La adquisición de datos comienza con los sensores que son los piranómetros se han ubicado en la Escuela de Ingeniería Eléctrica, estos se instalaron provisional mente en una superficie plana con las siguientes

---

<sup>44</sup> clima.fia.ues.edu.sv

coordenadas 13°43'14.5"N 89°12'00.6"O a una posición nivelada a cero grados para obtener buenos resultados como se muestra en la figura 3.2.



Figura 3.2 Piranómetros en una superficie plana.

### 3.1.3.1 Equipo y sensores utilizados.

#### Piranómetro LP02

LP02 es un sensor de radiación solar figura 3.3. Cumpliendo con las especificaciones de segunda clase de la norma ISO 9060 y la Guía de la OMM, el piranómetro LP02 es ampliamente utilizado en aplicaciones meteorológicas y para el monitoreo del desempeño del sistema fotovoltaico.

LP02 mide la radiación solar recibida por una superficie plana desde un ángulo de visión de 180 grado. Esta cantidad, expresada en  $W/m^2$ , se denomina irradiancia solar. El piranómetro LP02 se puede emplear al aire libre bajo el sol, así como en interiores con simuladores solares basados en lámparas. Su orientación depende de la aplicación y puede ser horizontal, inclinada (para el plano de radiación de la matriz) o invertida (para la radiación reflejada).



Figura 3.3 Piranómetro de segunda clase LP02.

### Piranómetro LP02-Datalogger LI-19

Piranómetro con unidad de lectura manual y registrador de datos. La combinación LP02-LI19 es adecuada para mediciones móviles y registro de datos a corto plazo figura3.4.

LI19 muestra la radiación medida y almacena los datos medidos. Una vez programado con la sensibilidad de LP02, la pantalla mostrará el valor real de la radiación solar en  $W/m^2$ . Programación LI19 se realiza a través de su interfaz de usuario de PC.

El sistema se suministra en una caja de transporte práctica, para facilitar el transporte y la protección durante campañas de medición de campo. También se incluyen el software necesario, baterías de tipo AA y un cable USB. Las baterías nuevas permiten más de 50 días de funcionamiento. LI19 también se puede utilizar con otros piranómetros y sensores de flujo de calor.



Figura 3.4 Datalogger LI-19

### **Estación meteorológica SMA.**

La estación meteorológica de SMA no sólo mide la temperatura del aire, la presión atmosférica y la humedad relativa con gran precisión, también determina la radiación global. Diferentes sistemas ahora pueden ser comparados entre sí usando el piranómetro instalado horizontalmente para medir la luz incidente. Esto hace posible determinar los parámetros clave requeridos para una configuración óptima, tal como el ángulo de inclinación del módulo. Todos los valores medidos están disponibles para análisis a través de la Sunny WebBox o del Sunny Portal.

#### **3.1.3.2 Mediciones sistemáticas.**

En la siguiente figura 3.5 es el equipo de medición Implementado ya operando para su respectiva comparación con el datalogger. Los medidores ya están en red y operando con piranómetros.

Se realizó un conjunto de mediciones para comparar resultados con el medidor implementado y con un DATALOGGER LI-19 que es un equipo de medición de irradiancia solar como se muestra en figura 3.4.



Figura 3.5 Sistema de medición

Se realizaron un conjunto de mediciones para comparar con tres sistemas de medición implementados

1. Sitio web privado.
2. Sitio web público.
3. Datalogger.

### Medición en el sitio web privado.

En la gráfica 3.5 se muestra la gráfica de irradiancia solar tomada en un día sol que fue obtenida a través del sitio Web privado del sistema de monitoreo.



Figura 3.6 Gráfica de irradiancia solar.

Los resultados fueron obtenidos utilizando un piranómetro de constante  $19.27 \mu\text{V} \cdot \text{W}/\text{m}^2$  estos datos fueron obtenidos del sitio Web privado diseñado para este sistema.

Gráfico del medidor con piranómetro de constante  $15.42 \mu\text{V} \cdot \text{W}/\text{m}^2$ .

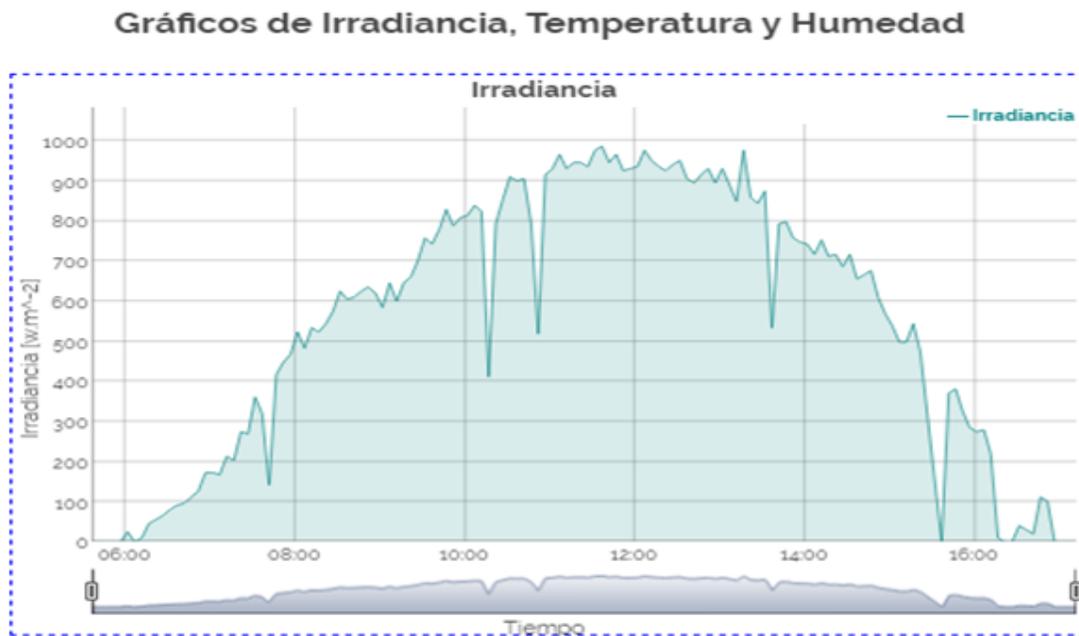


Figura 3.7 Gráfica de irradiancia solar

**Sitio Web público.**

Gráfico del medidor con piranómetro de constante  $19.08\text{uV.W/m}^2$ .



Figura 3.8 Gráfica de irradiancia solar.

Gráfico del medidor con piranómetro de constante  $16.40\text{uV.W/m}^2$ .

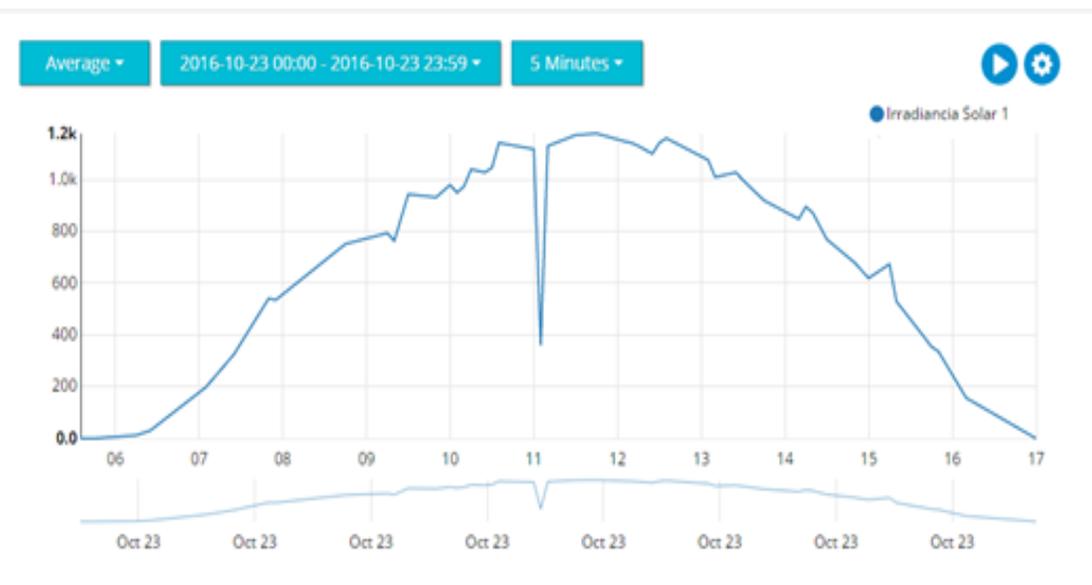


Figura 3.9 Gráfica de irradiancia solar  $16.40\text{uV.W/m}^2$ .

Las gráficas 3.7 y 3.8 son extraídas del sitio publico ubidots donde se obtienen beneficios como una base de datos, gráficos y lo más importante que es gratuito. Con estos datos se refleja una comparación con la página web privada.

### Datalogger.

En la siguiente grafica se muestra la recolección de datos de irradiancia por medio de un equipo de medición profesional DATALLOGGER con lo cual se hace una comparación con los medidores implementados colocados en un mismo punto y sus características son favorables la constante de este piranómetro patrón es de  $19.37\mu V.W/m^2$ .

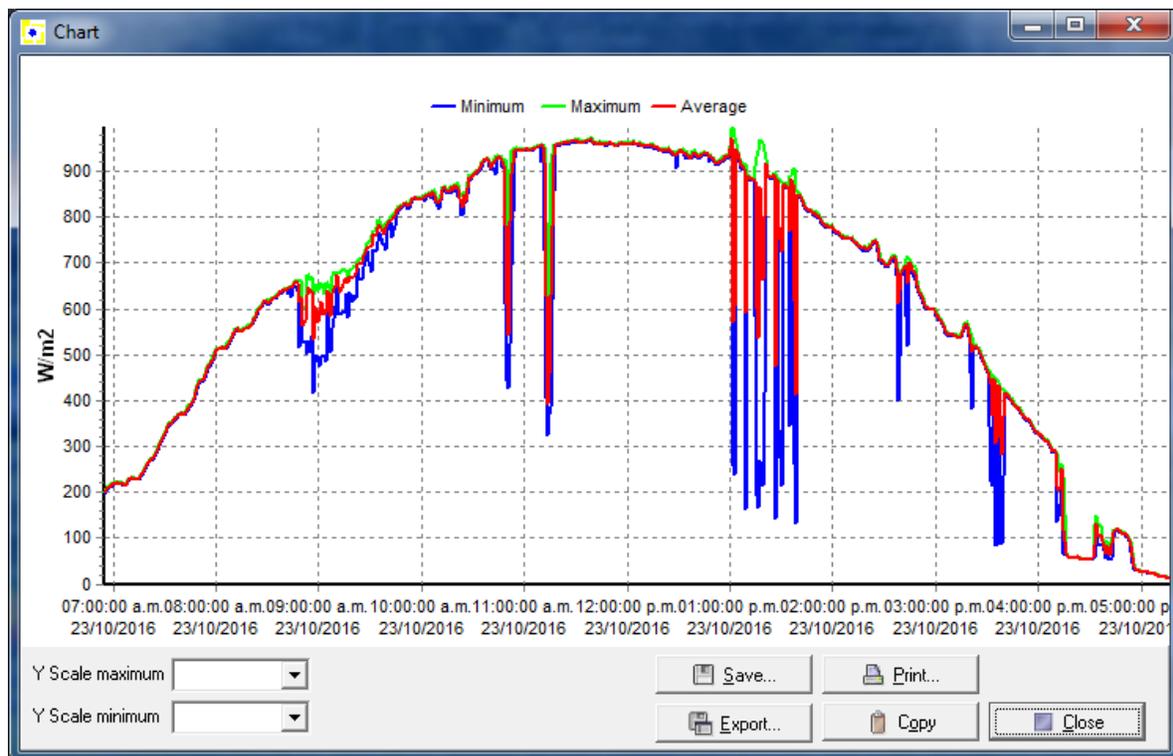


Figura 3.10 Gráfico con datalogger con constante  $19.37\mu V.W/m^2$ .

#### 3.1.4. Validación del tiempo de medición.

Existen normas ISO y certificaciones brindadas por la OMM para validar instrumentos de medición meteorológicos para este medidor de irradiancia implementado con Arduino e instrumentación de precisión no existen normas que validen el instrumento.

Para validar el instrumento se utilizó una referencia como patrón, el datalogger LI-19 que consta de un piranómetro LP2 y una unidad de medición portátil con un software para descargar datos por un puerto USB y ser manipulados en una computadora.

El LI-19 puede ser programado el intervalo de medición para que pueda ser guardado en memoria el tiempo de operación del equipo es de 50 días aproximadamente sin interrupción.

Los 50 días de operación sin interrupción se debe a que las baterías pueden soportar con la carga del equipo esa cantidad aproximadamente de días.

Para validar el tiempo de medición del equipo de irradiancia solar implementado se tomó como referencia los 50 días de operación de datalogger haciendo el siguiente análisis.

Proporcionando a los 50 días de operación de LI-19 un error 30% a la carga de las baterías o alguna operación logística con el equipo.

$$50 \text{ dias} * 0.3 = 15 \text{ dias}$$

Otro parámetro es la memoria de almacenamiento su capacidad es de 3000 muestras, es otra referencia para validar el instrumento de medición.

Tomando 12 muestras en 1 hora obtenemos 288 muestras en un día.

$$10 \text{ dias} * 288 \text{ muestras} = 2880 \text{ muestras}$$

El promedio en días de los dos análisis carga de baterías y almacenamiento se aproxima al primer análisis.

El tiempo valido de medición para el instrumento implementado con hardware libre Arduino es de 15 días tomando como referencia el instrumento patrón de referencia datalogger LI-19.

### **3.1.5. Vida útil del instrumento.**

La vida útil del instrumento implementado solo depende de medidas de seguridad. Una buena alimentación voltaje cumpliendo especificaciones, que no posea un cortocircuito la alimentación de voltaje, y que posea una protección contra el agua.

El dispositivo implementado solo posee una desventaja con la memoria flash del Arduino, ya que existe un ciclo limitante.

Por ejemplo, si al día se borra y se graba unas 10 veces por día en la memoria flash del Arduino se puede hacer el siguiente análisis.

Ciclo limitante del Arduino: 30000 ciclos aproximadamente.

$$\frac{30000 \text{ ciclos}}{10 \text{ ciclos / dia}} = 3000 \text{ dias}$$

$$\frac{3000 \text{ dias}}{365 \text{ dias / años}} = 8.2 \text{ años}$$

Este análisis es hipotético ya que el Arduino solo en el diseño se manipula la memoria flash en el proceso programación. De lo contrario tendremos por largos años funcionando

el medidor de irradiancia solar solamente cumpliendo con las medidas de seguridad mencionadas.

### 3.1.6. Resultados obtenidos de mediciones.

A continuación se muestra los resultados obtenidos gráficamente con el sistema de monitoreo.

#### Sistema 1.

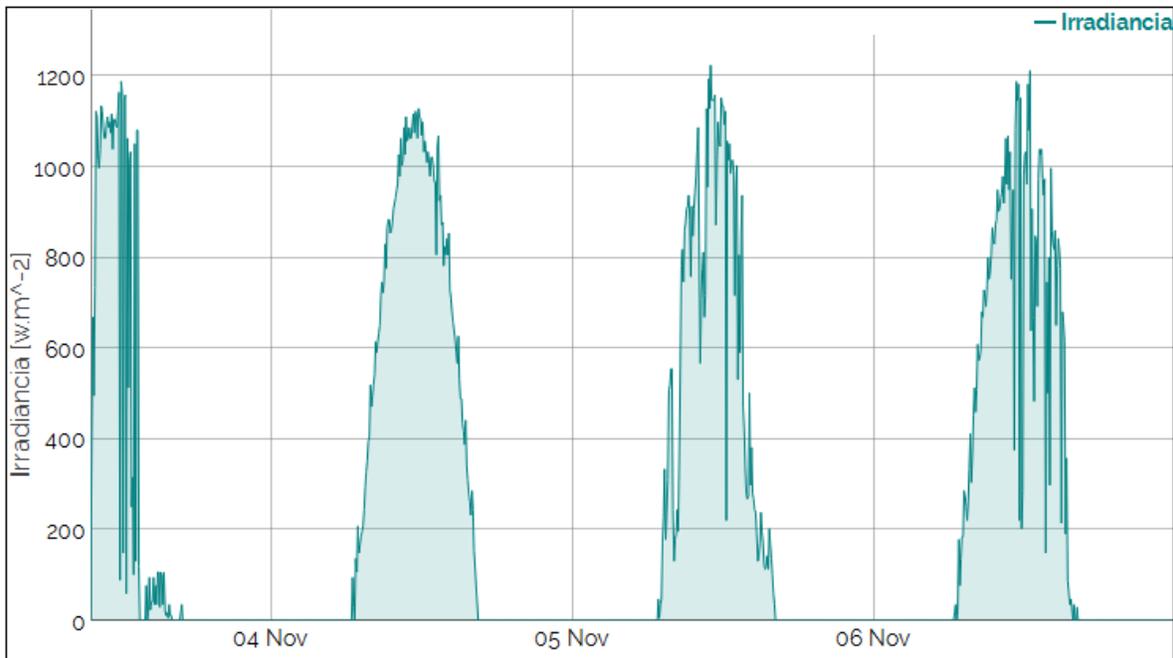


Figura 3.11 Gráfico de irradiancia solar en watts por metros cuadrados.

En la figura 3.11 se muestra la el comportamiento de una semana de medición de irradiancia solar (irradiancia vrs tiempo), con el sistema de monitoreo implementado en la Universidad de El Salvador ubicada en la escuela de ingeniería eléctrica con las siguientes coordenadas  $13^{\circ}43'14.5''\text{N}$   $89^{\circ}12'00.6''\text{O}$ . En esa fecha que se tomaron mediciones el promedio de irradiancia superaba levemente los  $1000 \text{ W/m}^2$ .

En la figura 3.12 se muestra la gráfica tomadas con el piranómetro que contiene un datalogger LI-19 comparando con la figura 3.11 que son datos extraídos de la página web y que pertenecen al medidor implementado, los datos son aproximadamente iguales al medidor patrón.

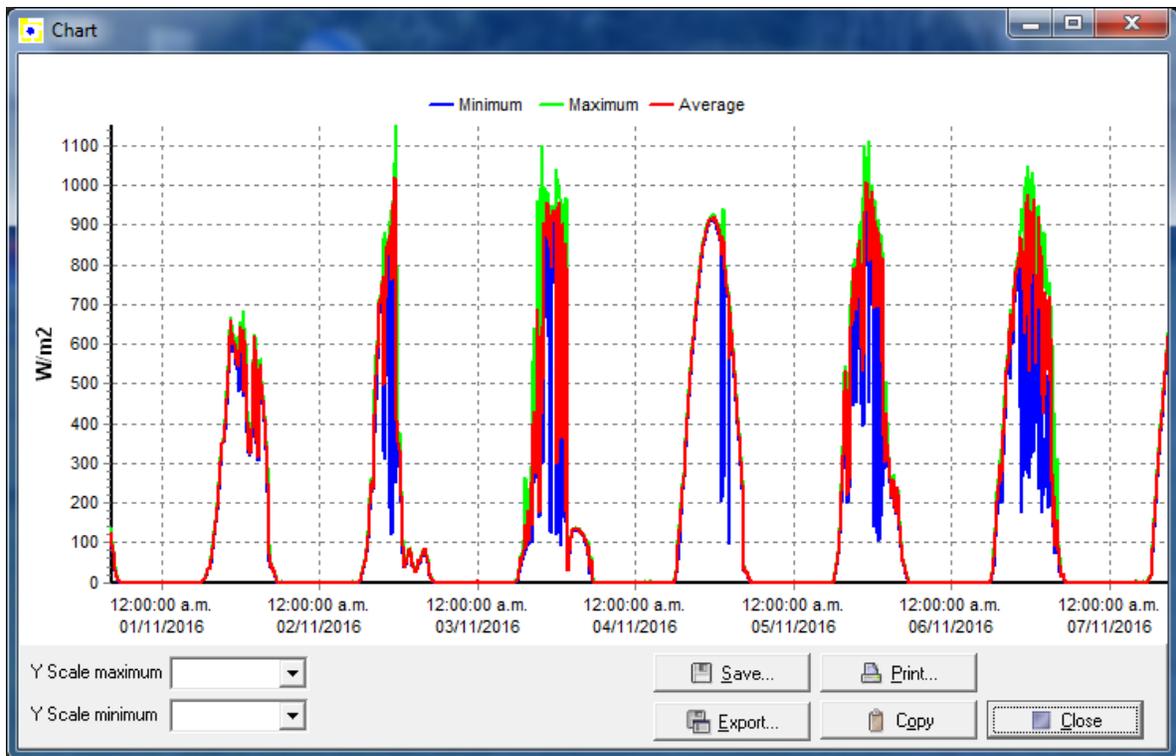


Figura 3.12 Gráfico de irradiancia solar tomada de LI-19 datalogger.



Figura 3.13 Gráfico de temperatura en grados Celsius.

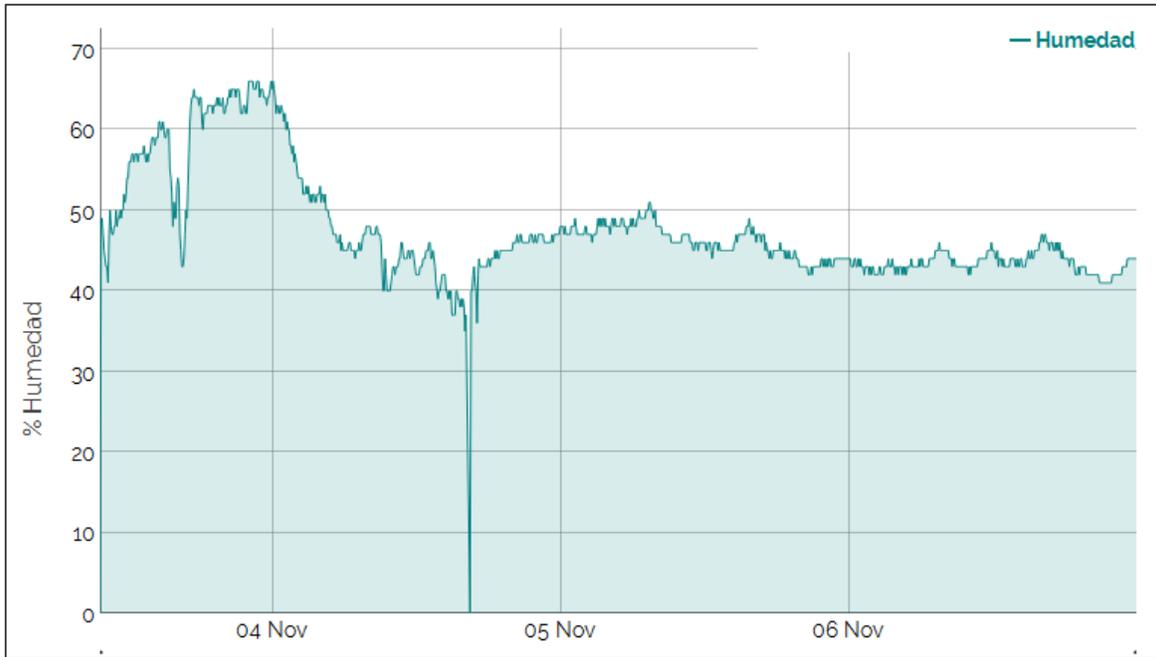


Figura 3.14 Gráfico de Humedad relativa en %.

La figura 3.13 muestra datos de temperatura en grados Celsius versus tiempo, y la figura 3.14 muestra datos de humedad en porcentajes versus tiempo, tomados en la escuela de ingeniería eléctrica de la Universidad de El Salvador. Estas figuras son capturas de la página web diseñada especialmente para los medidores implementados.<sup>45</sup>

<sup>45</sup> Anexos se muestran gráficos de 5 medidores de irradiancia

### 3.1.7 Comparación de seis medidores con el medidor patrón datalogger.

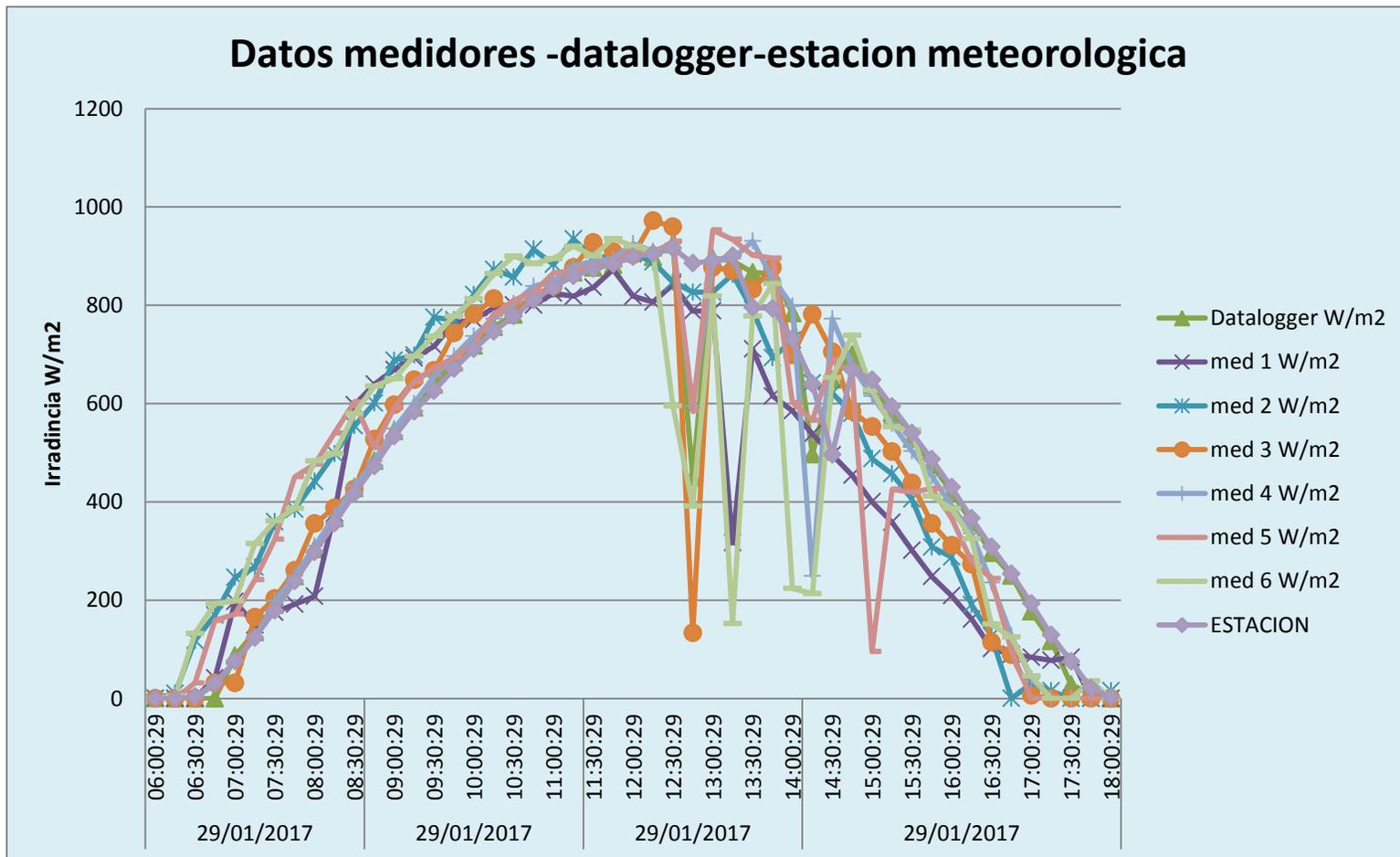


Figura 3.15 Comparación de seis medidores con el medidor patrón datalogger y estación meteorológica SMA.

En la figura 3.14 se muestra una comparación de cuatro medidores implementados contra un medidor patrón LI-19 datalogger estandarizado con normas ISO 9060 y estación meteorológica SMA.

### 3.1.8. Presupuesto del instrumento de medición de irradiancia solar.

ITEM	EQUIPO DESCRIPCION	CANTIDAD	U	PRECIO
1	Piranómetros: Segunda Clase, Clasificación por la Organización Internacional de Normalización.	1	U	\$ 1,526.00
2	KIT conteniendo: ARDUINO UNO con cable USB, Pantalla LCD 16x02, Sensor RHT03 temperatura y humedad, Módulo Ethernet Escudo para arduino, Módulo RTC DS1307 para Arduino, Chip TC7660 DIP-8 CONVERTIDOR DC-DC.	1	U	\$ 83.62
3	Amplificador de instrumentación SP AMP, AD625 o equivalente	1	U	\$ 30.00
4	Kit para fuente de poder	1	U	\$ 45.00
5	Caja para equipo de medicion	1	U	\$ 15.00
6	TOTAL			\$ 1,699.62

Tabla 3.2 Presupuesto del instrumento de medición de irradiancia implementado.

## CONCLUSIONES

- El costo de la implementación de medidores de irradiancia, temperatura y humedad relativa es de \$1699.62 que al compararlo con un medidor del mismo tipo existente en el mercado cuyo costo es de \$3336.25. La diferencia en el costo es de un cincuenta por ciento comparándolos respectivamente.
- Las lecturas obtenidas del medidor implementado, al compararse con el patrón datalogger LI-19, nos permite concluir que los valores obtenidos son satisfactorios con variaciones de dos por ciento en irradiancia y comparando las demás variables temperatura y humedad se obtuvieron variaciones ocho por ciento y siete por ciento respectivamente.
- El piranómetro huksel de segunda clase modelo LP02 clasificados por la OMM y certificado con norma ISO 9060. Lo que garantiza que las mediciones de irradiancia obtenidas en este trabajo con los medidores, son una buena referencia como la de cualquier estación meteorológica y esta información puede utilizarse para la construcción de mapas de irradiación solar, u otros usos que requieren equipos de moderada precisión.
- El amplificador de instrumentación AD 625 resulto una excelente alternativa para la amplificación de pequeños niveles de voltaje a la salida de los piranómetros dado a su bajo error en ganancia y a su bajo nivel de ruido
- Al comparar la curvas de irradiancia, temperatura y humedad relativa se constata los buenos resultados que se obtienen con los equipos construidos siendo sus variaciones bastante pequeñas y aceptables.
- Todos los datos se muestran en una página web privada en donde pueden ser descargados y manipulados para diferentes fines, los datos son almacenados en un servidor. En caso de falla de la red de internet estos datos serán almacenados en un micro SD. Después de al menos un año de monitoreo la información obtenida podrá emplearse dentro entre otros para mejorar el conocimiento de la irradiancia solar en el país, la construcción de mapas de irradiancia actualizados y para presidir con una mayor exactitud la producción de energía obtenida a través de paneles solares. Como estas herramientas se instalaran en los diferentes Campus de Universidad de El Salvador serán un aporte muy importante para los interesados en este tema.

## BIBLIOGRAFÍA

### Libros.

Artero, O. T. (2016). Arduino curso practico de formacion. En O. T. Artero, *Arduino curso practico de formacion* (pág. 582). Mexico: Alfaomega.

### Sitios web.

*Ecuacion del tiempo*. (8 de Marzo de 2016). Recuperado el 8 de Marzo de 2016, de Ecuacion del tiempo:  
[http://personales.unican.es/lopezqm/fbe/laspracticasmecanicaFBE\\_pdf/exp\\_aula/4\\_EcuacionDelTiempo.pdf](http://personales.unican.es/lopezqm/fbe/laspracticasmecanicaFBE_pdf/exp_aula/4_EcuacionDelTiempo.pdf)

*Energia Nuclear*. (2 de Febrero de 2016). Recuperado el 2 de Febrero de 2016, de Energia Nuclear:  
<https://energia-nuclear.net/que-es-la-energia-nuclear/fusion-nuclear>

Artero, O. T. (2016). Arduino curso practico de formacion. En O. T. Artero, *Arduino curso practico de formacion* (pág. 582). Mexico: Alfaomega.

Conceptos. (9 de Abril de 2016). *Conceptos de geometria solar*. Recuperado el 9 de Abril de 2016, de Conceptos de geometria solar:  
<https://materialidad2013.files.wordpress.com/2013/06/conceptos.pdf>

Ecured. (5 de Febrero de 2016). *Radiacion Solar*. Recuperado el 5 de Febrero de 2016, de Radiacion Solar: [http://www.ecured.cu/index.php/Radiaci%C3%B3n\\_solar](http://www.ecured.cu/index.php/Radiaci%C3%B3n_solar)

Educativa, A. (20 de Enero de 2016). *Estructura y compocision del Sol*. Obtenido de Estructura y compocision del Sol: <http://www.astromia.com/solar/estrucsol.htm>

educativo, P. (21 de Febrero de 2016). *Paralelos y meridianos*. Recuperado el 21 de Febrero de 2016, de Paralelos y meridianos : <http://www.portaleducativo.net/quinto-basico/687/Paralelos-y-meridianos>

<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/277/A5.pdf?sequence=5>. (15 de 1 de 2016). *Potencial de la radiacion solar* . Obtenido de Potencial de la radiacion solar :  
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/277/A5.pdf?sequence=5>

Indefinido. (15 de Enero de 2016). *Potencial de la radiacion solar*. Obtenido de Potencial de la radiacion solar:  
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/277/A5.pdf?sequence=5>

IPEM. (18 de Mayo de 2016). *Radiacion solar*. Recuperado el 18 de Mayo de 2016, de Radiacion solar: <http://www.oni.escuelas.edu.ar/2008/CORDOBA/1324/trabajo/radiacionsolar.html>

nreda2. (15 de Febrero de 2016). *Eliptica*. Recuperado el 15 de Febreo de 2016, de Eliptica: [www.nreda2.com/enredados-en-la-ciencia/astronomia/122-que-es-la-eclipica.html](http://www.nreda2.com/enredados-en-la-ciencia/astronomia/122-que-es-la-eclipica.html)

Panel. (10 de Mayo de 2016). *Panel Solar Fotovoltaico*. Recuperado el 10 de Mayo de 2016, de Panel Solar Fotovoltaico: <http://eliseosebastian.tumblr.com/post/53530683135/radiaci%C3%B3n-solar-irradiancia-e-insolaci%C3%B3n>

Sliderchare. (4 de Abril de 2016). *El clima*. Recuperado el 4 de Abril de 2016, de El clima: <http://es.slideshare.net/gabyagamezramos/instrumentos-para-medir-el-clima-y-la-humedad>

solar, P. d. (15 de 1 de 2016). *Pontencial de la radiacion solar*. Obtenido de Pontencial de la radiacion solar: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/277/A5.pdf?sequence=5>

UNAM. (15 de Enero de 2016). *Potencial de la radiacion solar*. Obtenido de Potencial de la radiacion solar: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/277/A5.pdf?sequence=5>

## ANEXO

### 4.1. Como utilizar el instrumento implementado.

#### Conectar el piranómetro.

En la parte lateral se encuentran dos conectores similares a los mostrados en la figura.



Figura 1 Conectores a laterales del equipo.

En estos conectores se debe de conectar el un piranómetro como el mostrado en la siguiente imagen:



Figura 2. Piranómetro

Los piranómetro deben de tener una sensibilidad que se apegue al medidor, para obtener datos correctos. De no disponer de un piranómetro de esta sensibilidad, se debe de modificar el código de la función "Save.ino", cambiando el valor de sensibilidad de acorde con la del piranómetro a utilizar.

#### Conectar el cable de red.

En la parte lateral del equipo, se encuentra un conector RJ45 tipo hembra que por efecto trae el Child Ethernet del Arduino, en donde se debe de conectar un cable de red recto. Este cable debe de ser cable UTP categoría 5 o superior.

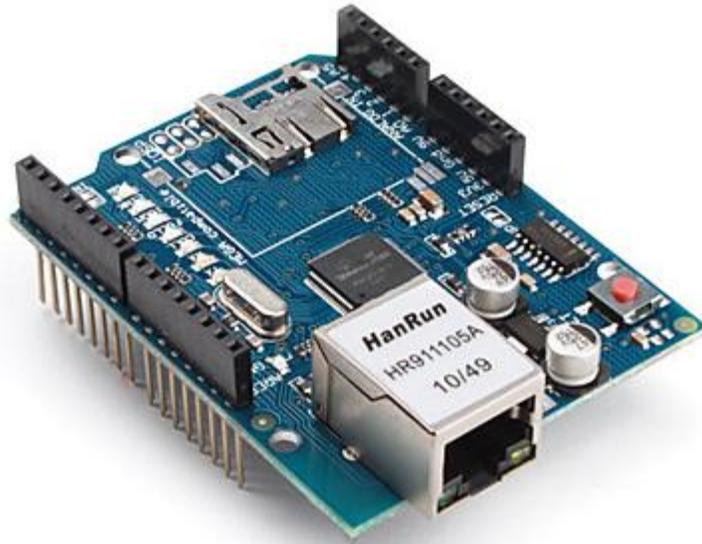


Figura 3. Conector tipo hembra de Child Ethernet.

### Conectar la alimentación.

En la parte posterior derecha se encuentra la entrada para a alimentación externa. Esta debe ser una alimentación monofásica a 120V AC.



Figura 4. Conector hembra para el cable de poder.

Junto a este conector se encuentra un porta-fusibles, este debe de ser un fusible para un máximo de 1A @ 600V AV. De preferencia este fusible debe de soportar un máximo de 600mA



Figura 5. Porta fusible.

### Encender el equipo.

Hay dos interruptores del lado de la alimentación AC, el interruptor de palanca, acciona la alimentación AC, de haber energía, el equipo encenderá con solo accionar este botón.



Figura 6. Interruptores de encendido del equipo y baterías.

El segundo botón es para activar las baterías, pero en este caso, el equipo no encenderá con accionar las baterías. Para encender el equipo siempre será necesario que el sistema tenga la conexión AC, una vez encendido, el interruptor de las baterías determinará si se utilizarán o no, en caso que exista una ausencia de energía en el alimentador AC.

Una vez encendido, el equipo no debería de apagarse a excepción que las baterías hayan alcanzado un valor muy bajo de carga, para apagarlo por completo, se deben de apagar ambos interruptores.

### Botones para encender la pantalla y reiniciar el equipo.

En el medidor existen dos botones que cumplen funciones especiales, uno de ellos es para encender la pantalla durante 20s, por defecto, la pantalla permanecerá apagada todo el tiempo, a excepción de cuando ese botón sea presionado.

El otro botón, es para un reinicio del Arduino, pero este es un reinicio por código, lo que implica que solo reiniciará en caso que el sistema no se encuentre congelado, para los casos que el equipo este congelado en su totalidad, será mejor apagarlo y volverlo a encender,



Figura 7. Botones para resetear y encender la pantalla.

## El sitio web

En el sitio web se comienza ingresando el usuario y contraseña para poder acceder a los distintos medidores, esta interfaz es muy amigable ya que la finalidad es una facilidad de obtención de información y sea accesible a las personas que estén interesadas en el comportamiento del recurso solar, por eso se expondrá su uso.

En la página principal basta con ingresar con usuario y contraseña asignado para poder ingresar a los medidores.



Figura 8. Página principal del sitio LOGIN.

Una vez se ha ingresado con usuario nos mostrará la página siguiente figura 9:

En la página de MEDIDORES REGISTRADOS se presentaran los medidores disponibles para consultar los datos en los diferentes campus universitarios.

La pestaña de INICIO nos retornara a la página de MEDIDORES REGISTRADOS.

La pestaña REGISTRAR MEDIDORES nos enviara a la página para registro de un nuevo medidor este en la cual solo nos proporcionara automáticamente un ID distinto para cada medidor, en la casilla NOMBRE se pondrá un nombre para identificar a los medidores, y será visto en la primera columna de la página REGISTRO DE MEDIDORES.

También mostrara un recuadro en la cual se pondrá una breve descripción o característica del medidor y esto se ve en la columna 3 de REGISTRAR MEDIDORES, y se podrán vaciar los datos de cada medidor con el icono del basurero.

## Medidores registrados

Lista de medidores registrados en el servidor

medidor 4	44628d06cc276fc93b432f78ab13883a	medidor 4		
medidor 3	57c87dad2976e7e161ede3a28658cf5c	medidor 3		

Figura 9. Medidores registrados.



Figura 10. Ventana de registro de medidores.

En la columna de donde muestra el ID de cada medidor en la página de MEDIDORES REGISTRADOS, se dará un click y se entrará Al formulario para consultar los datos.

La presentación de datos se tendrá la opción de consultarlos por día, por fecha y tiempo, y la forma visual de mostrarlos se podrá hacer ya sea por medio de gráficos, tabulación y finalmente se pondrán descargar los datos de dicha opción consultada.

admin Inicio Registrar medidor Configurar Salir

medidor 4  
44628d06cc276fc93b432f78ab13883a

Formulario

2016-10-23 2016-10-23

12:00 a.m. 12:00 a.m.

Busqueda por Fechas

Graficar datos  Tabular datos

Descargar datos

Realizar busqueda Reiniciar valores

Figura 11. Formulario de consulta de medidores para la obtención de datos.

Al elegir las opciones **GRAFICAR DATOS** y **TABULAR DATOS** y luego presionar **REALIZAR BÚSQUEDA** nos mostrara las gráficas de la Irradiancia, temperatura y humedad.

Las siguientes gráficas son tomadas del día domingo 23/10/16 en la cual se observara que su comportamiento cumple con lo esperado, presentando la Irradiancia de mayor valor a las 12:00 del mediodía.

Se presentaran los datos de 4 medidores que se dejaron monitoreando un día completo y a la vez los datos del equipo de medición patrón con su respectiva grafica de monitoreo.

Al presentar las gráficas se podrá observar que se pueden tener datos de irradiación en los diferentes campus universitarios monitoreados desde un sitio web con fácil descarga de ellos.

## Diseño de PCB para los diferentes circuitos.

### Diseño de PCB del Arduino

La PCB se diseñó EAGLE y es una de la más importante en este dispositivo ya que aquí en esta placa se unen todas las características y funciones del medidor aquí desde esta PCB, alimentamos con voltaje al Arduino, conectamos los pines de la LCD, los pines del reloj RTC DS1307 y un sensor de humedad y temperatura DHT 11, en la figura se muestra el diseño de las PCB esta placa se construyó a doble cara la de color azul es la parte inferior y la de color rojo parte superior de la PCB.

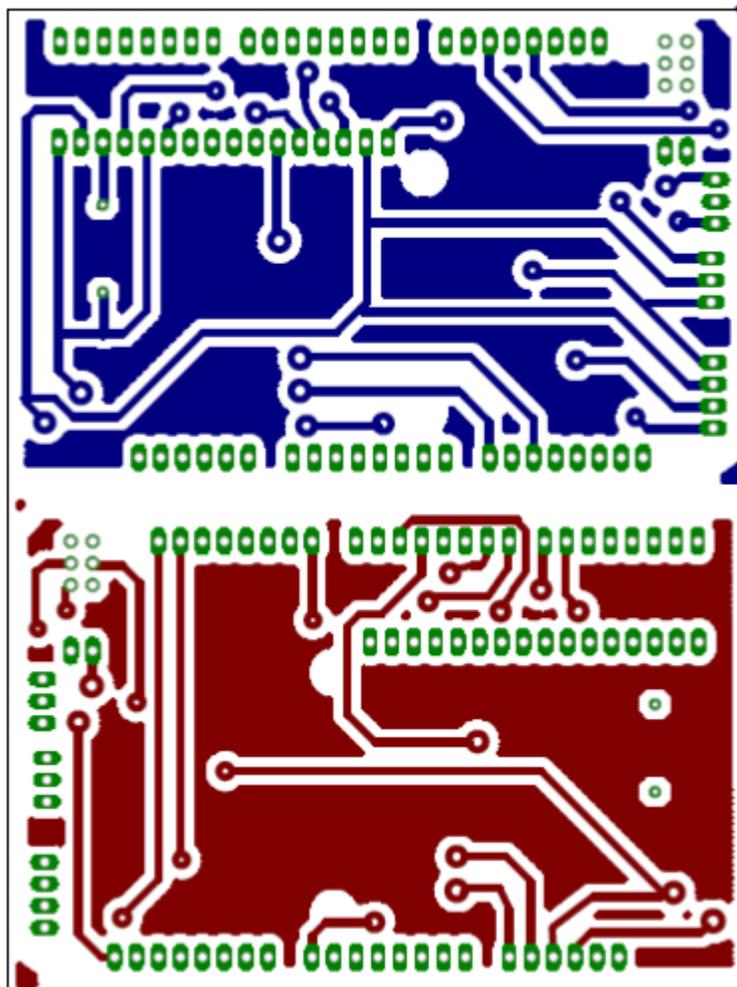


Figura 12. Pistas listas para imprimir en Eagle.

En la siguiente figura se muestran PCB terminadas después que hayan pasado por el proceso de quemado. Este proceso es bastante complicado uno de los primeros pasos es imprimir en un dispositivo láser el diseño de la PCB en papel cuché luego se realiza el planchado que consiste colocar la impresión en la plaquita de cobre y luego se plancha hasta quede bien impregnado la tinta y bien adherido el papel en el cobre, el siguiente

paso es colocar en agua la plaquita para poder quitar el papel que ha quedado adherido en cobre y como paso final colocar en acido la placa para que forme la pista conductora.

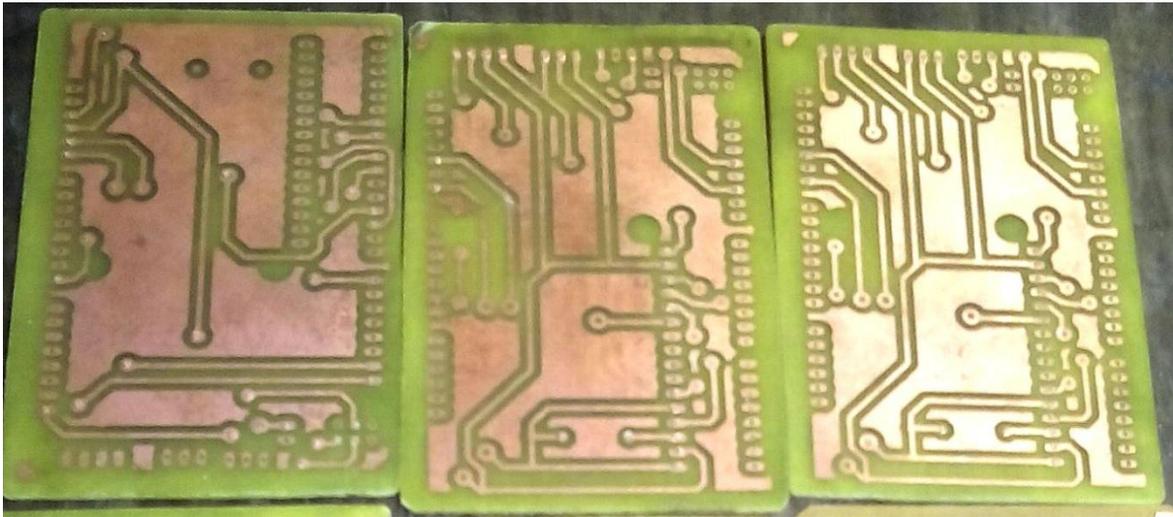


Figura 13. PCB quemadas

En esta etapa se simularon los circuitos para luego realizar la simulación de la placa con el software EAGLE, el cual nos permite realizar el montaje y posicionamiento de los elementos en una placa de cobre.

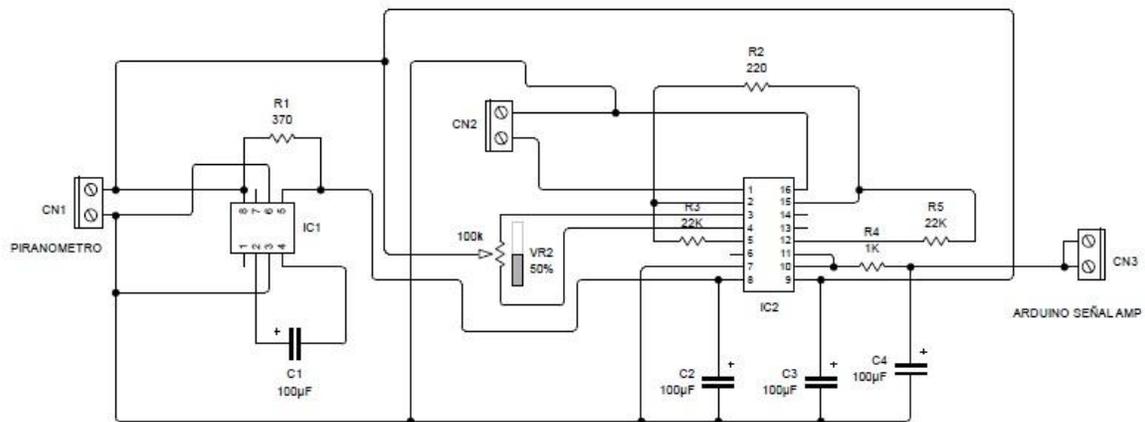


Figura 14. Circuito que contiene el AD625D (convertidor Analógico-Digital)

El siguiente paso después de conectar todos los elementos en el programa de diseño se realizó la tableta de las pistas la cual se muestra a continuación.

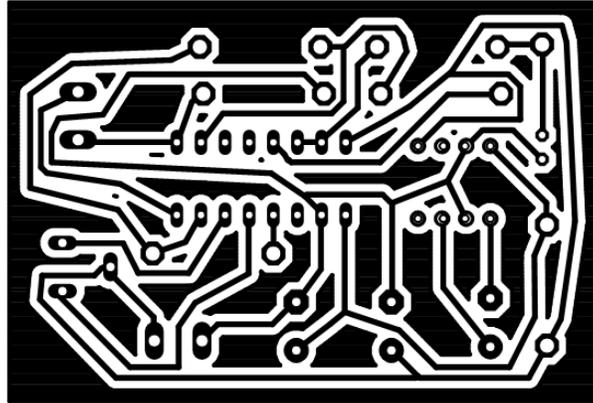


Figura 15. Pistas del circuito del IC AD625D que se obtuvo a través del software de simulación.

Ahora que se obtuvo la pista y se guardó para su impresión, es necesario saber el valor de cada elemento para no cometer equivocaciones, para ello se obtuvo una imagen de la ubicación donde dejamos cada elemento en nuestra placa.

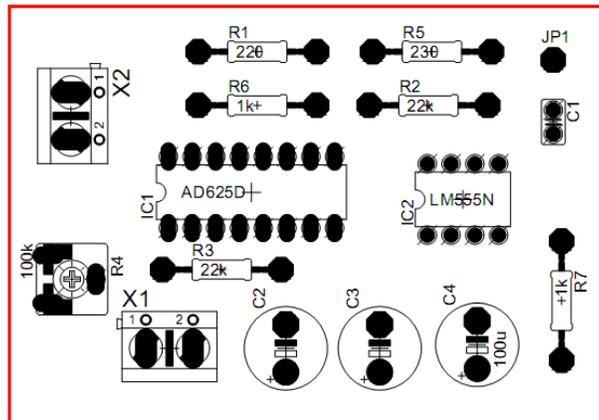


Figura 16. En esta figura se aprecia la posición de los elementos que componen esta placa.

De igual manera como se hizo con el circuito o la placa del AD625 se hizo el circuito de la fuente de alimentación utilizando el software de simulación se conectaron los elementos que componen la fuente.

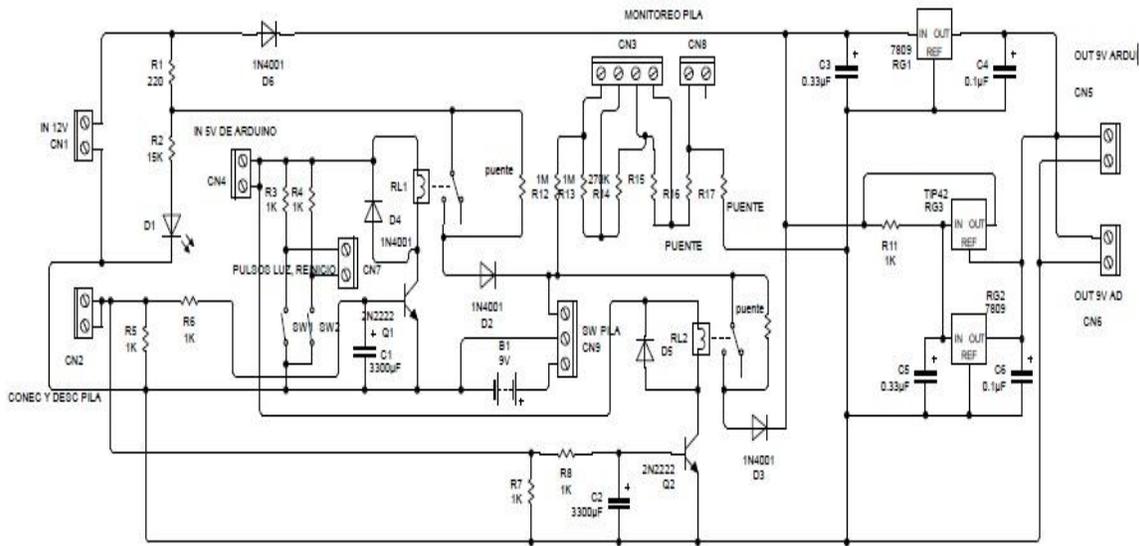


Figura 17. Fuente de alimentación de los medidores.

El circuito de la fuente está diseñado para alimentar al arduino durante se tenga una fuente de 120 Vac, con un circuito de respaldo con una batería de 9 Vdc. El componente RG1 que es un regulador de 9VDC con el IC7809 es que siempre alimentara al arduino y al circuito AD.

La circuitería que contiene al RG2 y al RG3 es un circuito en el cual se utilizara cuando se requiera de más corriente para alimentar los elementos en el cual se tendrá que deshabilitar el RG1, este circuito se puede mostrar en el datasheet de la familia 78XX. Se obtiene la placa de las pistas que se muestra en la figura 18.

Como se mencionó es necesario saber la ubicación de los elementos y el valor que le corresponde a cada uno, por obtuvimos la imagen en 2D de la placa figura 19.

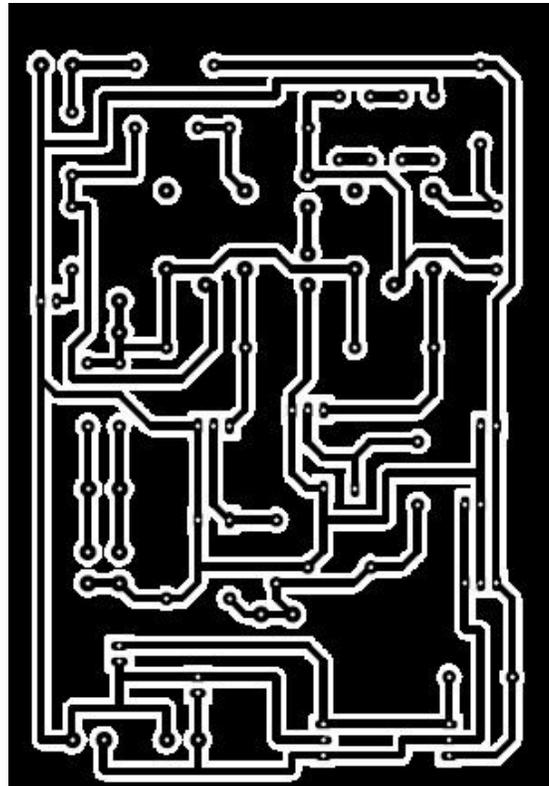


Figura 18. Pistas de la fuente que alimenta a al medidor.

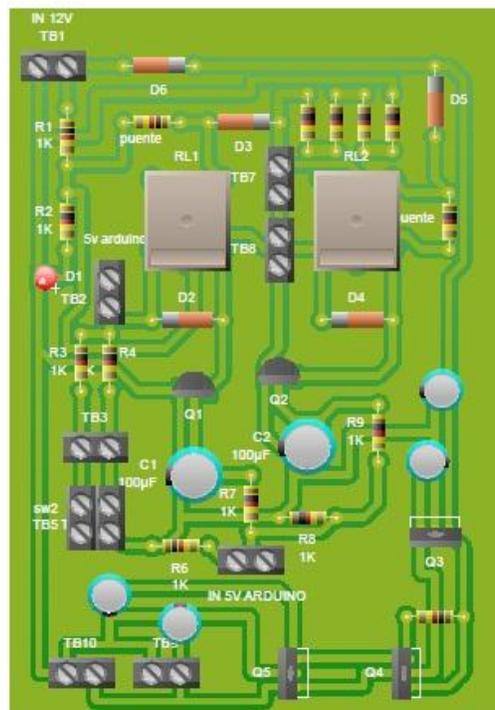


Fig.19 Posicionamiento y valor de los elementos de la fuente del medidor.

## Graficas de mediciones.

### Medidor 2

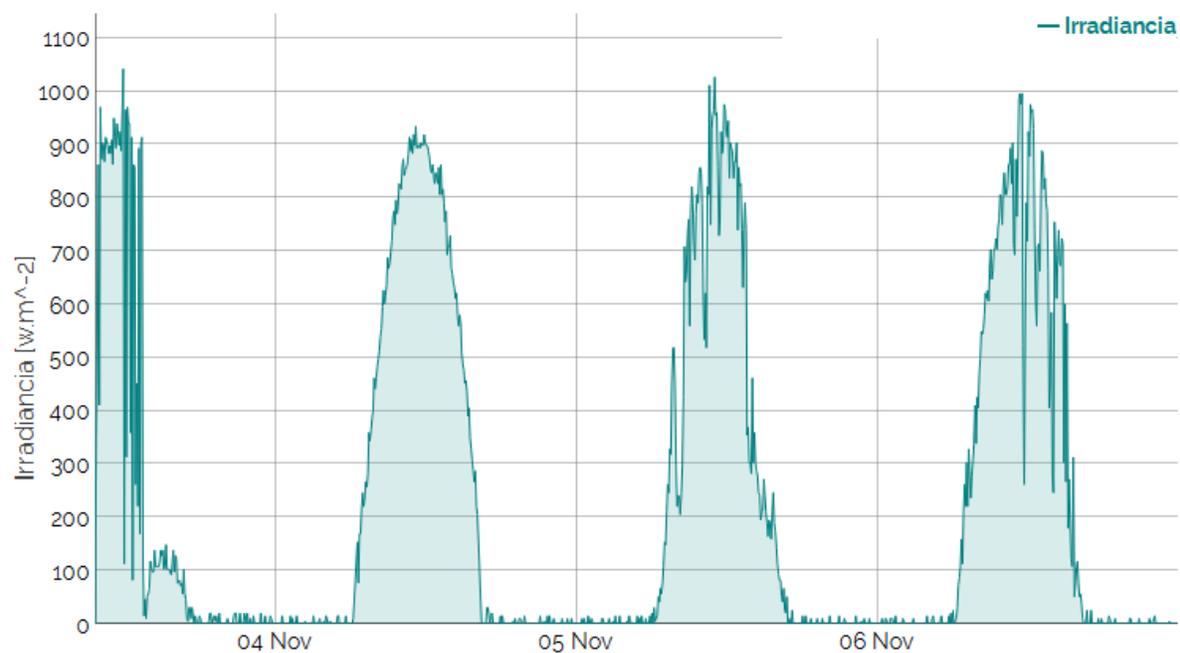


Fig. 20 grafico de irradiancia solar.

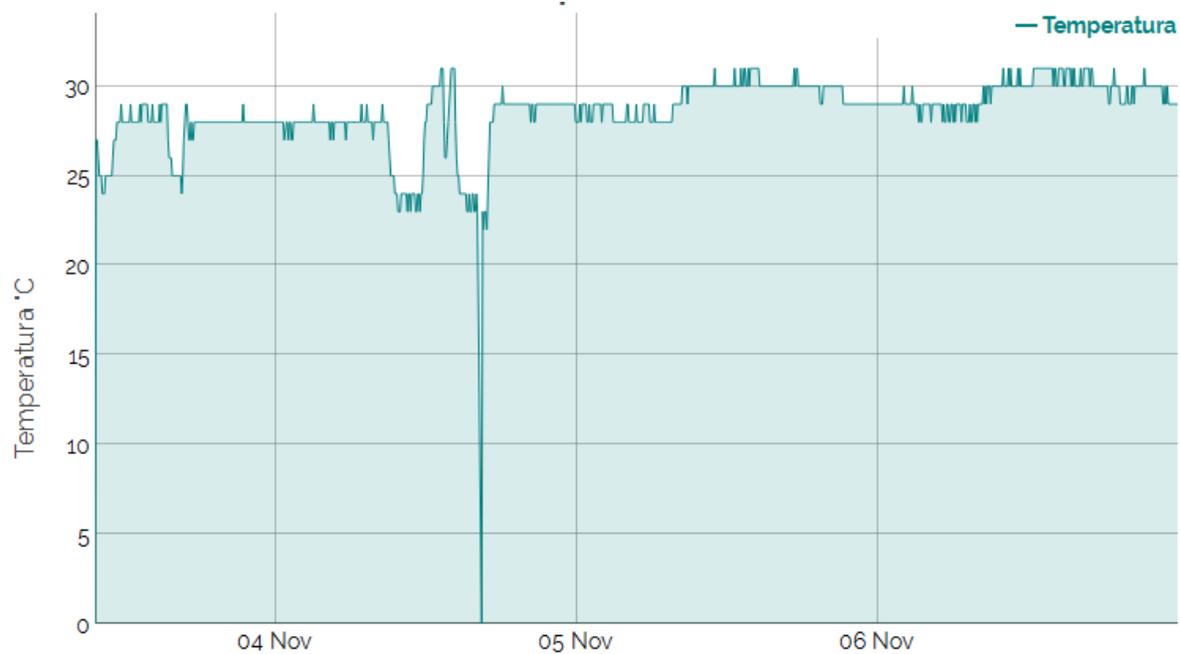


Fig. 21 Grafico de temperatura.

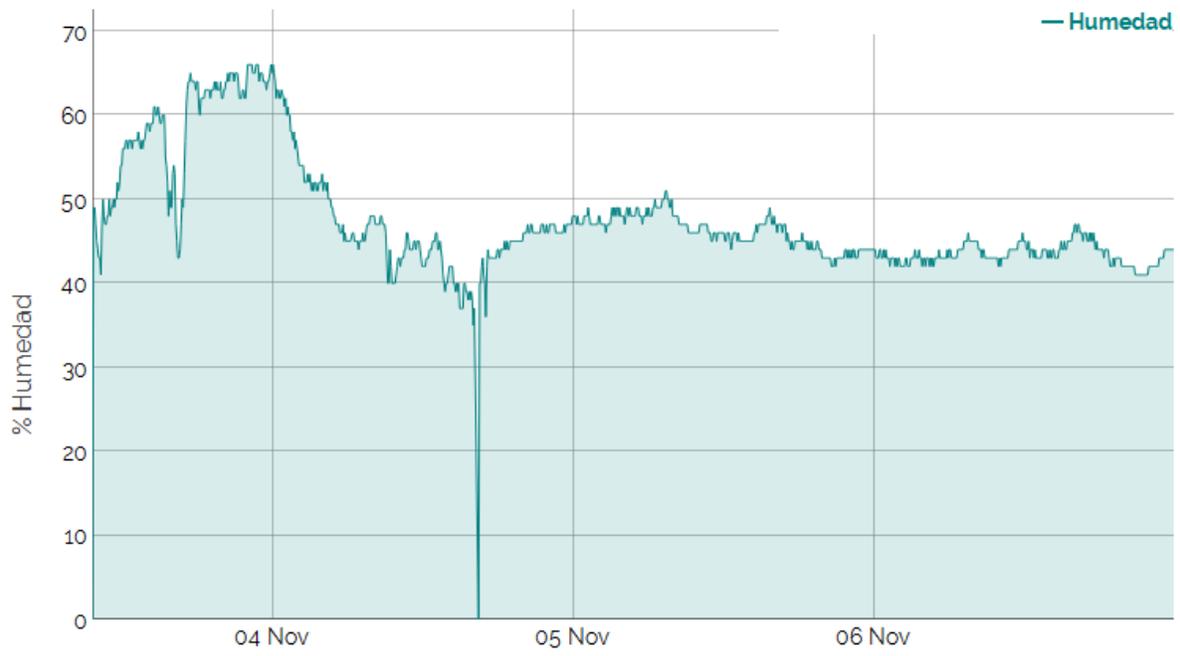


Fig. 22 Grafico de humedad.

**Medidor 3**

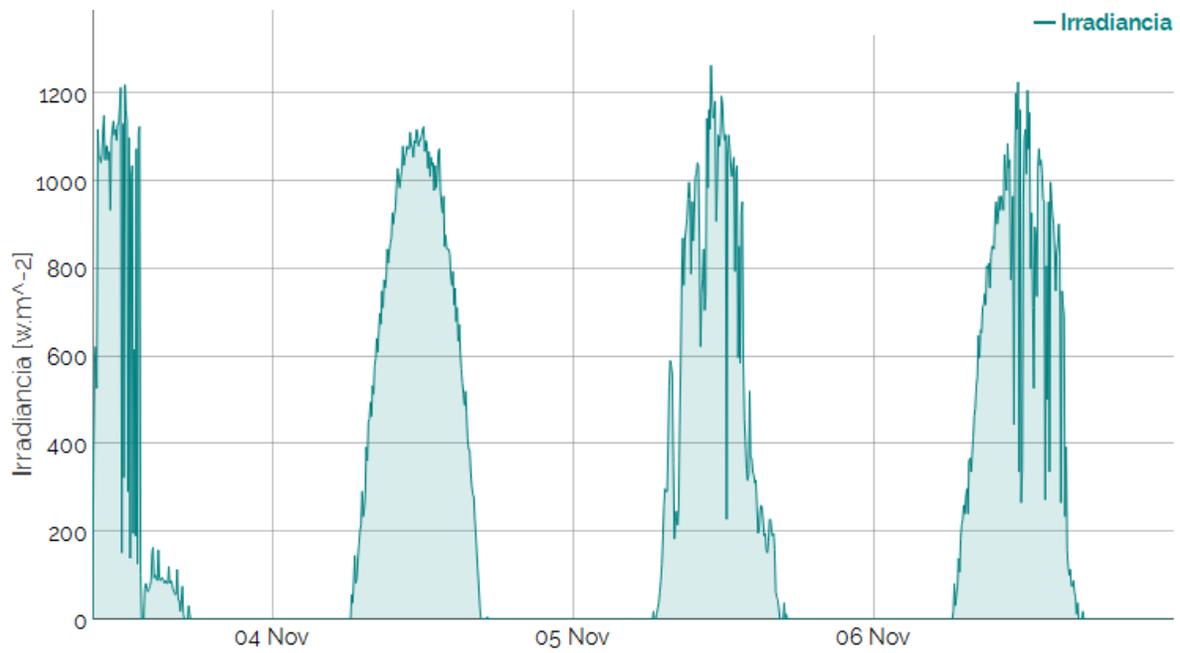


Fig. 23 grafico de irradiancia solar.



Fig. 24 Grafico de temperatura.

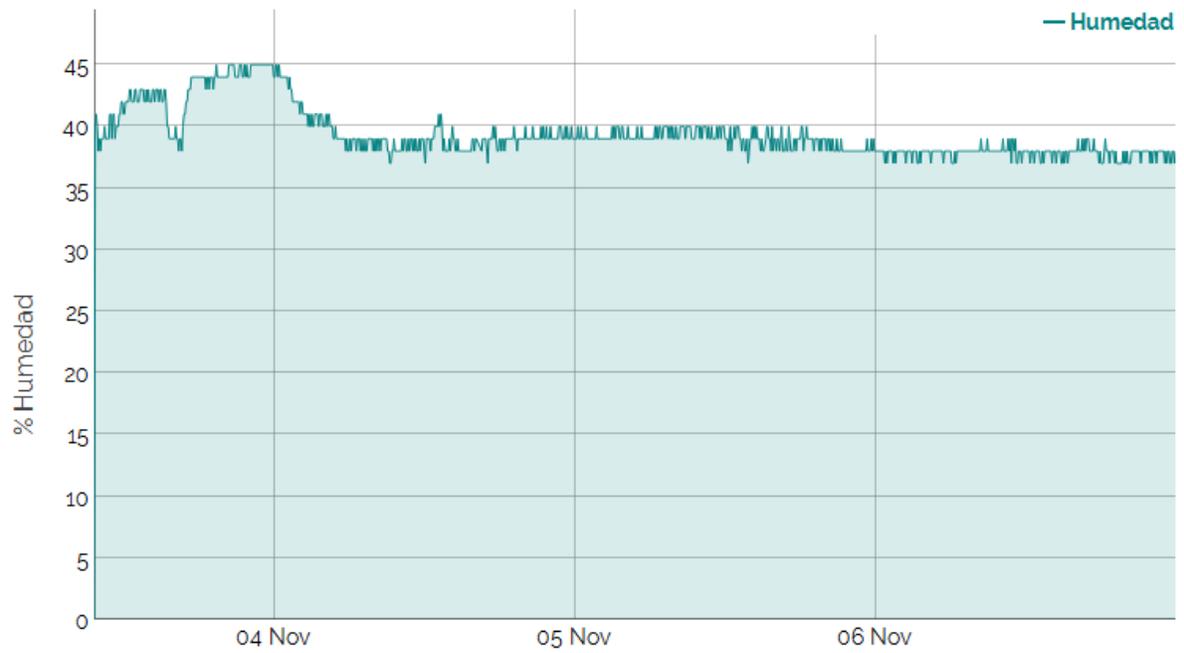


Fig. 25 Grafico de humedad.

**Medidor 4.**

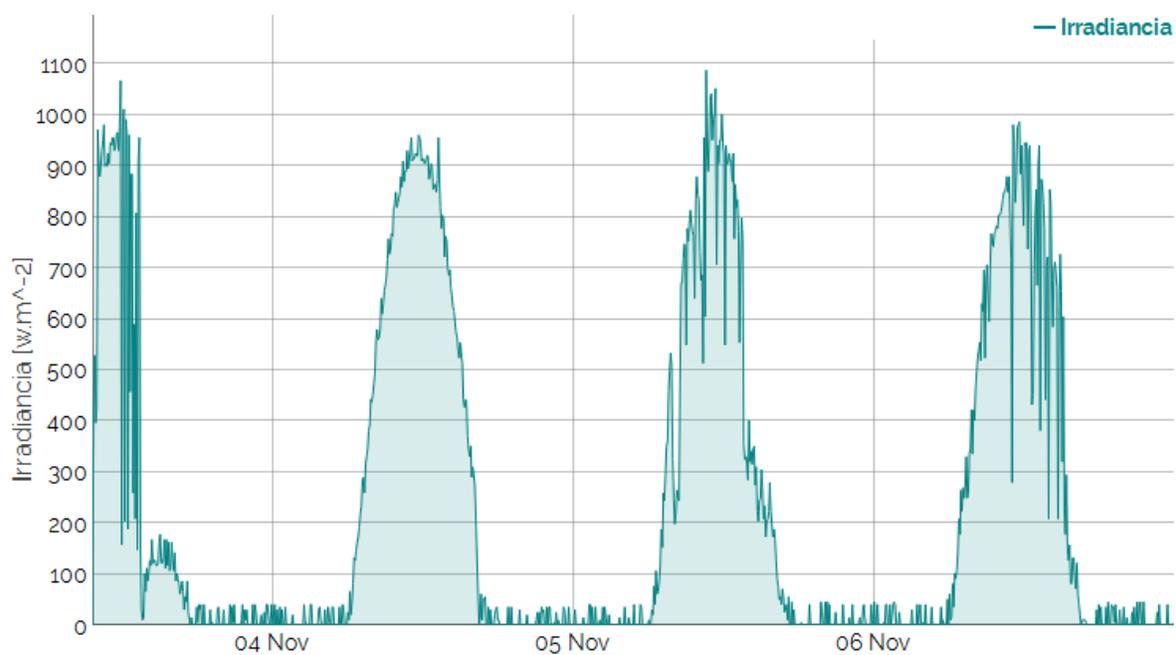


Fig. 26 grafico de irradiancia solar.

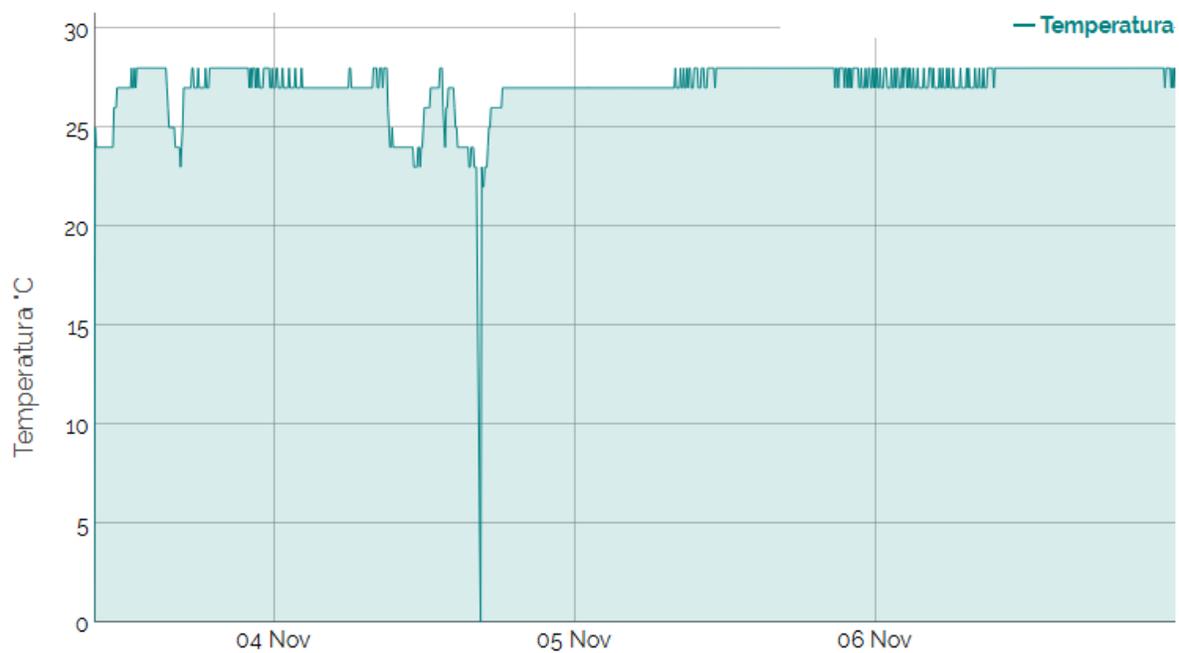


Fig. 27 Grafico de temperatura.

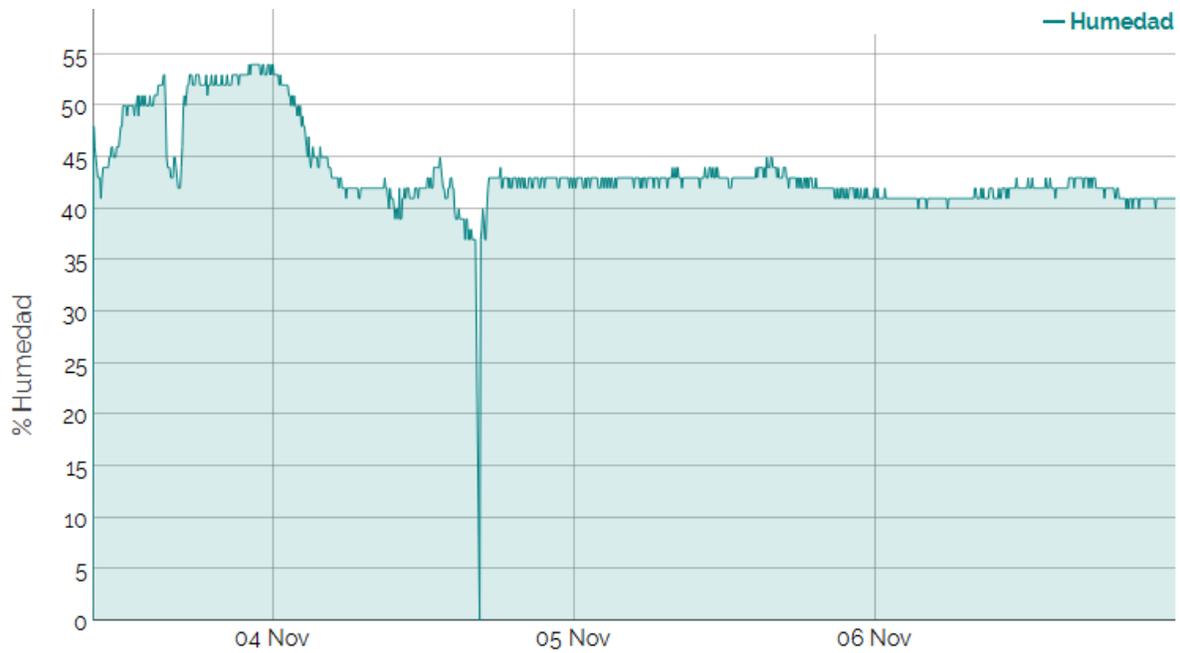


Fig. 28 Grafico de humedad.

De la fig.20 a la fig.28 se muestran gráficos de irradiancia, temperatura y humedad versus tiempo respectivamente, estos son resultado de mediciones continuas que se realizaron con los sistemas de monitoreo.

En la tabla 1 se muestra datos de irradiancia, temperatura y humedad relativa extraídos de la base de datos que proporciona la página web.

FECHA	HORA	TEMPERATURA °C	HUMEDAD	IRRADIANCIA W/m2
23/10/2016	05:37:22	25	53	0
23/10/2016	05:42:22	25	53	0
23/10/2016	05:47:23	25	52	0
23/10/2016	05:52:22	26	52	0
23/10/2016	05:57:22	26	51	0
23/10/2016	06:02:23	26	52	0
23/10/2016	06:07:24	26	50	25.42
23/10/2016	06:12:23	26	50	50.85
23/10/2016	06:17:24	26	50	76.27
23/10/2016	06:22:22	26	50	86.44
23/10/2016	06:27:21	27	49	91.52
23/10/2016	06:32:22	27	49	101.69
23/10/2016	06:37:24	27	48	122.03
23/10/2016	06:42:23	27	48	132.2
23/10/2016	06:47:23	28	47	157.63
23/10/2016	06:52:23	27	46	162.71
23/10/2016	06:57:23	27	46	193.22
23/10/2016	07:02:23	28	46	259.32
23/10/2016	07:07:23	27	45	244.07
23/10/2016	07:12:23	28	47	213.56
23/10/2016	07:17:23	28	46	244.07
23/10/2016	07:22:23	28	46	208.47
23/10/2016	07:27:22	28	45	300
23/10/2016	07:32:23	28	45	340.67
23/10/2016	07:37:23	28	44	355.93
23/10/2016	07:42:22	29	43	361.01
23/10/2016	07:47:22	28	45	396.61
23/10/2016	07:52:22	28	44	437.28
23/10/2016	07:57:22	28	45	467.79
23/10/2016	08:02:24	29	43	549.15
23/10/2016	08:07:25	28	44	518.64
23/10/2016	08:12:25	28	44	574.57
23/10/2016	08:17:25	29	43	549.15
23/10/2016	08:22:23	28	43	564.4
23/10/2016	08:27:23	28	43	594.91
23/10/2016	08:32:20	28	43	605.08
23/10/2016	08:37:17	29	42	625.42
23/10/2016	08:42:17	29	42	630.5
23/10/2016	08:47:14	28	43	691.52
23/10/2016	08:52:13	28	43	625.42

Tabla 1. Datos de irradiancia, temperatura y humedad.

TABLAS DE DECLINACIÓN.

TABLAS DECLINACIÓN (grados), DISTANCIA RELATIVA INVERSA y ECUACIÓN DE TIEMPO (minutos)  
CALCULADAS SEGÚN LAS FORMULAS DE SPENCER  
(M. Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press (1983))

DIA MES	ENERO / FEBRERO				MARZO / ABRIL				MAYO / JUNIO				JULIO / AGOSTO			
	J	$\delta$ (°)	$d_r$	$E_t$ (min)	J	$\delta$ (°)	$d_r$	$E_t$ (min)	J	$\delta$ (°)	$d_r$	$E_t$ (min)	J	$\delta$ (°)	$d_r$	$E_t$ (min)
1	1	-23.06	1.0351	-2.90	60	-7.88	1.0190	-12.91	121	14.83	0.9845	3.02	182	23.18	0.9666	-3.46
2	2	-22.98	1.0351	-3.35	61	-7.50	1.0185	-12.73	122	15.13	0.9840	3.15	183	23.11	0.9666	-3.66
3	3	-22.89	1.0351	-3.79	62	-7.12	1.0179	-12.54	123	15.43	0.9835	3.27	184	23.04	0.9666	-3.86
4	4	-22.80	1.0351	-4.23	63	-6.73	1.0174	-12.35	124	15.73	0.9830	3.38	185	22.96	0.9666	-4.05
5	5	-22.70	1.0351	-4.67	64	-6.35	1.0169	-12.14	125	16.02	0.9825	3.48	186	22.88	0.9666	-4.24
6	6	-22.59	1.0350	-5.09	65	-5.96	1.0164	-11.92	126	16.31	0.9820	3.57	187	22.78	0.9666	-4.42
7	7	-22.47	1.0350	-5.52	66	-5.57	1.0158	-11.70	127	16.59	0.9816	3.65	188	22.69	0.9666	-4.60
8	8	-22.35	1.0350	-5.93	67	-5.19	1.0153	-11.47	128	16.87	0.9811	3.72	189	22.58	0.9666	-4.77
9	9	-22.21	1.0349	-6.34	68	-4.79	1.0147	-11.23	129	17.14	0.9806	3.78	190	22.47	0.9667	-4.93
10	10	-22.07	1.0348	-6.74	69	-4.40	1.0142	-10.98	130	17.41	0.9802	3.83	191	22.35	0.9667	-5.09
11	11	-21.93	1.0347	-7.14	70	-4.01	1.0136	-10.72	131	17.67	0.9797	3.87	192	22.23	0.9668	-5.24
12	12	-21.77	1.0347	-7.52	71	-3.62	1.0131	-10.46	132	17.93	0.9793	3.90	193	22.09	0.9668	-5.39
13	13	-21.61	1.0346	-7.90	72	-3.23	1.0125	-10.19	133	18.18	0.9788	3.92	194	21.96	0.9669	-5.53
14	14	-21.45	1.0344	-8.27	73	-2.83	1.0119	-9.92	134	18.43	0.9784	3.94	195	21.81	0.9670	-5.66
15	15	-21.27	1.0343	-8.63	74	-2.44	1.0114	-9.64	135	18.67	0.9779	3.94	196	21.66	0.9671	-5.79
16	16	-21.09	1.0342	-8.99	75	-2.04	1.0108	-9.36	136	18.91	0.9775	3.93	197	21.51	0.9672	-5.90
17	17	-20.90	1.0340	-9.33	76	-1.65	1.0102	-9.07	137	19.14	0.9771	3.91	198	21.35	0.9673	-6.01
18	18	-20.71	1.0339	-9.66	77	-1.25	1.0096	-8.77	138	19.37	0.9767	3.88	199	21.18	0.9674	-6.11
19	19	-20.51	1.0337	-9.99	78	-0.86	1.0091	-8.47	139	19.59	0.9763	3.85	200	21.00	0.9675	-6.20
20	20	-20.30	1.0335	-10.30	79	-0.46	1.0085	-8.17	140	19.81	0.9759	3.80	201	20.82	0.9677	-6.28
21	21	-20.09	1.0334	-10.60	80	-0.07	1.0079	-7.86	141	20.02	0.9755	3.74	202	20.64	0.9678	-6.35
22	22	-19.87	1.0332	-10.89	81	0.33	1.0073	-7.55	142	20.23	0.9751	3.68	203	20.44	0.9680	-6.42
23	23	-19.64	1.0330	-11.18	82	0.72	1.0067	-7.24	143	20.43	0.9747	3.61	204	20.25	0.9682	-6.47
24	24	-19.41	1.0327	-11.45	83	1.12	1.0061	-6.93	144	20.62	0.9744	3.52	205	20.04	0.9683	-6.52
25	25	-19.17	1.0325	-11.70	84	1.51	1.0056	-6.61	145	20.81	0.9740	3.43	206	19.84	0.9685	-6.55
26	26	-18.92	1.0323	-11.95	85	1.90	1.0050	-6.29	146	20.99	0.9737	3.33	207	19.62	0.9687	-6.58
27	27	-18.67	1.0320	-12.19	86	2.30	1.0044	-5.97	147	21.16	0.9733	3.23	208	19.40	0.9689	-6.59
28	28	-18.42	1.0318	-12.41	87	2.69	1.0038	-5.66	148	21.33	0.9730	3.11	209	19.18	0.9691	-6.60
29	29	-18.15	1.0315	-12.62	88	3.08	1.0032	-5.34	149	21.50	0.9727	2.99	210	18.95	0.9693	-6.59
30	30	-17.89	1.0312	-12.82	89	3.47	1.0026	-5.02	150	21.65	0.9723	2.86	211	18.71	0.9696	-6.57
31	31	-17.61	1.0309	-13.00	90	3.86	1.0020	-4.70	151	21.80	0.9720	2.72	212	18.47	0.9698	-6.55
1	32	-17.34	1.0306	-13.18	91	4.24	1.0014	-4.38	152	21.95	0.9717	2.58	213	18.22	0.9700	-6.51
2	33	-17.05	1.0303	-13.34	92	4.63	1.0008	-4.06	153	22.09	0.9714	2.42	214	17.97	0.9703	-6.46
3	34	-16.76	1.0300	-13.49	93	5.01	1.0002	-3.75	154	22.22	0.9711	2.27	215	17.72	0.9705	-6.41
4	35	-16.47	1.0297	-13.62	94	5.40	0.9996	-3.44	155	22.34	0.9709	2.10	216	17.46	0.9708	-6.34
5	36	-16.17	1.0294	-13.75	95	5.78	0.9990	-3.13	156	22.46	0.9706	1.93	217	17.19	0.9711	-6.26
6	37	-15.87	1.0290	-13.86	96	6.16	0.9985	-2.82	157	22.58	0.9703	1.76	218	16.92	0.9714	-6.17
7	38	-15.56	1.0287	-13.95	97	6.53	0.9979	-2.51	158	22.68	0.9701	1.58	219	16.65	0.9717	-6.07
8	39	-15.25	1.0283	-14.04	98	6.91	0.9973	-2.21	159	22.78	0.9698	1.39	220	16.37	0.9720	-5.96
9	40	-14.93	1.0279	-14.11	99	7.28	0.9967	-1.92	160	22.87	0.9696	1.20	221	16.09	0.9723	-5.83
10	41	-14.61	1.0276	-14.16	100	7.66	0.9961	-1.62	161	22.96	0.9694	1.01	222	15.80	0.9726	-5.70
11	42	-14.29	1.0272	-14.21	101	8.03	0.9955	-1.34	162	23.04	0.9691	0.81	223	15.51	0.9729	-5.56
12	43	-13.96	1.0268	-14.24	102	8.39	0.9950	-1.05	163	23.11	0.9689	0.60	224	15.21	0.9733	-5.40
13	44	-13.63	1.0264	-14.26	103	8.76	0.9944	-0.78	164	23.18	0.9687	0.40	225	14.91	0.9736	-5.24
14	45	-13.29	1.0260	-14.27	104	9.12	0.9938	-0.50	165	23.23	0.9685	0.19	226	14.61	0.9739	-5.07
15	46	-12.95	1.0256	-14.26	105	9.48	0.9932	-0.24	166	23.29	0.9684	-0.02	227	14.30	0.9743	-4.88
16	47	-12.61	1.0251	-14.24	106	9.84	0.9927	0.02	167	23.33	0.9682	-0.24	228	13.99	0.9747	-4.69
17	48	-12.26	1.0247	-14.21	107	10.19	0.9921	0.28	168	23.37	0.9680	-0.45	229	13.67	0.9750	-4.48
18	49	-11.91	1.0243	-14.17	108	10.55	0.9915	0.52	169	23.40	0.9679	-0.67	230	13.36	0.9754	-4.27
19	50	-11.56	1.0238	-14.11	109	10.89	0.9910	0.76	170	23.42	0.9677	-0.89	231	13.03	0.9758	-4.05
20	51	-11.20	1.0234	-14.04	110	11.24	0.9904	1.00	171	23.44	0.9676	-1.11	232	12.71	0.9762	-3.82
21	52	-10.84	1.0229	-13.96	111	11.58	0.9898	1.22	172	23.45	0.9674	-1.32	233	12.38	0.9766	-3.57
22	53	-10.48	1.0224	-13.87	112	11.92	0.9893	1.44	173	23.46	0.9673	-1.54	234	12.05	0.9770	-3.32
23	54	-10.12	1.0220	-13.76	113	12.26	0.9888	1.65	174	23.45	0.9672	-1.76	235	11.71	0.9774	-3.06
24	55	-9.75	1.0215	-13.65	114	12.60	0.9882	1.85	175	23.44	0.9671	-1.98	236	11.38	0.9778	-2.80
25	56	-9.38	1.0210	-13.52	115	12.93	0.9877	2.04	176	23.42	0.9670	-2.20	237	11.03	0.9783	-2.52
26	57	-9.01	1.0205	-13.39	116	13.25	0.9871	2.23	177	23.40	0.9669	-2.42	238	10.69	0.9787	-2.24
27	58	-8.63	1.0200	-13.24	117	13.57	0.9866	2.40	178	23.37	0.9669	-2.63	239	10.34	0.9791	-1.95
28	59	-8.26	1.0195	-13.08	118	13.89	0.9861	2.57	179	23.33	0.9668	-2.84	240	9.99	0.9796	-1.65
29					119	14.21	0.9856	2.73	180	23.29	0.9667	-3.05	241	9.64	0.9800	-1.34
30					120	14.52	0.9850	2.88	181	23.24	0.9667	-3.26	242	9.29	0.9805	-1.03
31													243	8.93	0.9810	-0.71

Nota. El valor de  $J$  expresado en la tabla corresponde al número de orden del día dentro de un año ordinario.  
Si el año es bisiesto el día  $J = 60$  corresponderá al 29 de febrero en lugar de al 1 de marzo, y a partir de dicha fecha deberá sumarse una unidad al valor de  $J$ : por ejemplo, el día 31 de agosto de un año bisiesto tiene  $J = 244$ , el día 5 de diciembre de un año bisiesto tiene  $J = 340$ .

TABLAS DECLINACIÓN (grados), DISTANCIA RELATIVA INVERSA y ECUACIÓN DE TIEMPO (minutos)  
 CÁLCULADAS SEGÚN LAS FÓRMULAS DE SPENCER  
 (M. Iqbal, *An Introduction to Solar Radiation*, Academic Press (1983))

DÍA MES	SEPTIEMBRE / OCTUBRE				NOVIEMBRE / DICIEMBRE			
	$J$	$\delta$ (°)	$d_r$	$E_t$ (min)	$J$	$\delta$ (°)	$d_r$	$E_t$ (min)
1	244	8.57	0.9814	-0.38	305	-14.19	1.0156	16.39
2	245	8.21	0.9819	-0.05	306	-14.51	1.0161	16.39
3	246	7.85	0.9824	0.29	307	-14.83	1.0167	16.37
4	247	7.48	0.9829	0.63	308	-15.14	1.0172	16.35
5	248	7.11	0.9834	0.98	309	-15.46	1.0177	16.31
6	249	6.74	0.9839	1.33	310	-15.76	1.0182	16.25
7	250	6.37	0.9844	1.69	311	-16.06	1.0188	16.18
8	251	6.00	0.9849	2.05	312	-16.36	1.0193	16.10
9	252	5.62	0.9854	2.41	313	-16.65	1.0198	16.01
10	253	5.25	0.9859	2.78	314	-16.94	1.0203	15.90
11	254	4.87	0.9865	3.15	315	-17.22	1.0208	15.77
12	255	4.49	0.9870	3.52	316	-17.50	1.0213	15.64
13	256	4.11	0.9875	3.89	317	-17.77	1.0217	15.49
14	257	3.73	0.9881	4.27	318	-18.04	1.0222	15.33
15	258	3.34	0.9886	4.64	319	-18.30	1.0227	15.15
16	259	2.96	0.9891	5.02	320	-18.56	1.0232	14.96
17	260	2.57	0.9897	5.40	321	-18.81	1.0236	14.76
18	261	2.19	0.9902	5.77	322	-19.06	1.0241	14.55
19	262	1.80	0.9908	6.15	323	-19.30	1.0245	14.32
20	263	1.41	0.9914	6.52	324	-19.53	1.0249	14.08
21	264	1.03	0.9919	6.90	325	-19.76	1.0254	13.83
22	265	0.64	0.9925	7.27	326	-19.98	1.0258	13.57
23	266	0.25	0.9930	7.64	327	-20.20	1.0262	13.30
24	267	-0.14	0.9936	8.01	328	-20.41	1.0266	13.01
25	268	-0.53	0.9942	8.37	329	-20.61	1.0270	12.71
26	269	-0.92	0.9948	8.73	330	-20.81	1.0274	12.41
27	270	-1.31	0.9953	9.09	331	-21.00	1.0278	12.09
28	271	-1.70	0.9959	9.44	332	-21.18	1.0281	11.76
29	272	-2.09	0.9965	9.79	333	-21.36	1.0285	11.42
30	273	-2.48	0.9971	10.13	334	-21.53	1.0289	11.07
1	274	-2.87	0.9977	10.47	335	-21.69	1.0292	10.72
2	275	-3.25	0.9983	10.80	336	-21.85	1.0295	10.35
3	276	-3.64	0.9988	11.13	337	-22.00	1.0299	9.98
4	277	-4.03	0.9994	11.44	338	-22.14	1.0302	9.59
5	278	-4.42	1.0000	11.76	339	-22.27	1.0305	9.20
6	279	-4.80	1.0006	12.06	340	-22.40	1.0308	8.80
7	280	-5.19	1.0012	12.36	341	-22.52	1.0311	8.40
8	281	-5.57	1.0018	12.65	342	-22.64	1.0314	7.98
9	282	-5.95	1.0024	12.93	343	-22.74	1.0316	7.56
10	283	-6.33	1.0030	13.20	344	-22.84	1.0319	7.14
11	284	-6.71	1.0036	13.46	345	-22.93	1.0322	6.71
12	285	-7.09	1.0042	13.71	346	-23.01	1.0324	6.27
13	286	-7.47	1.0047	13.95	347	-23.09	1.0326	5.83
14	287	-7.84	1.0053	14.19	348	-23.16	1.0329	5.38
15	288	-8.22	1.0059	14.41	349	-23.22	1.0331	4.93
16	289	-8.59	1.0065	14.62	350	-23.27	1.0333	4.48
17	290	-8.96	1.0071	14.82	351	-23.32	1.0335	4.02
18	291	-9.33	1.0077	15.01	352	-23.35	1.0336	3.56
19	292	-9.69	1.0083	15.19	353	-23.38	1.0338	3.10
20	293	-10.06	1.0088	15.36	354	-23.41	1.0340	2.64
21	294	-10.42	1.0094	15.51	355	-23.42	1.0341	2.17
22	295	-10.77	1.0100	15.66	356	-23.43	1.0343	1.71
23	296	-11.13	1.0106	15.79	357	-23.42	1.0344	1.24
24	297	-11.48	1.0111	15.91	358	-23.41	1.0345	0.78
25	298	-11.83	1.0117	16.01	359	-23.40	1.0346	0.31
26	299	-12.18	1.0123	16.11	360	-23.37	1.0347	-0.16
27	300	-12.52	1.0128	16.19	361	-23.34	1.0348	-0.62
28	301	-12.86	1.0134	16.25	362	-23.30	1.0349	-1.08
29	302	-13.20	1.0140	16.31	363	-23.25	1.0349	-1.54
30	303	-13.53	1.0145	16.35	364	-23.19	1.0350	-2.00
31	304	-13.86	1.0151	16.37	365	-23.13	1.0350	-2.45
					366	-23.06	1.0351	-2.90

Nota. El valor de  $J$  expresado en la tabla corresponde al número de orden del día dentro de un año ordinario. Si el año es bisiesto el día  $J = 60$  corresponderá al 29 de febrero en lugar de al 1 de marzo, y a partir de dicha fecha deberá sumarse una unidad al valor de  $J$ : por ejemplo, el día 31 de agosto de un año bisiesto tiene  $J = 244$ , el día 5 de diciembre de un año bisiesto tiene  $J = 340$ .

**CARTA PSICROMETRICA.**

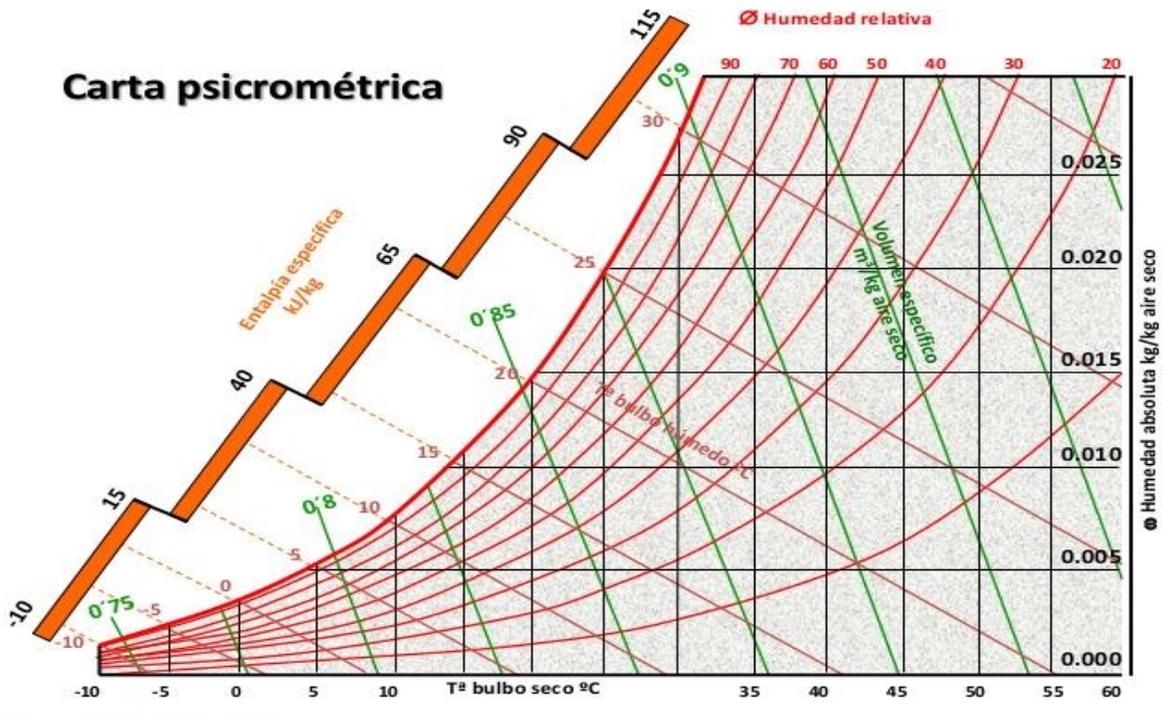


Fig. 29 Carta psicrometrica

Tbs= Temperatura de bulbo seco (°C)

Tbh= Temperatura de bulbo húmedo (°C)

H = humedad absoluta o humedad específica. (kg<sub>H2O</sub>/kg<sub>AIRE</sub>)

Φ = humedad relativa (%)

h = Entalpía (kJ/kg o kcal/kg)

Tw = Temperatura de Rocío. (°C)

E la siguiente imagen se muestra una carta psicométrica con la cual se pueden obtener las propiedades antes mencionadas del aire, conociendo los datos de la temperatura de bulbo húmedo y seco.

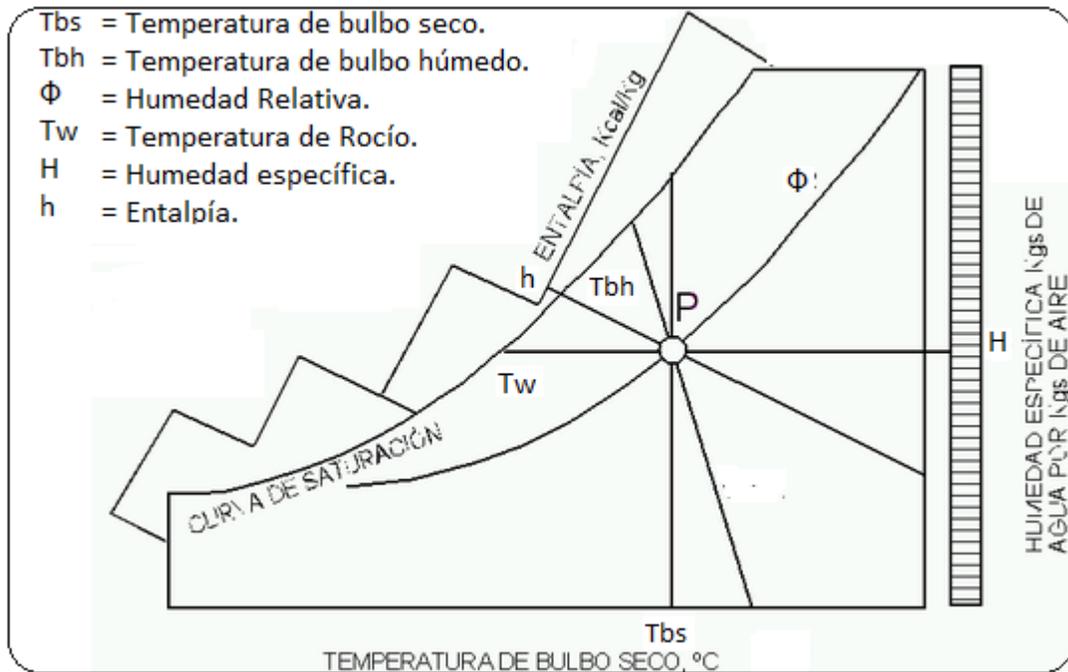


Fig. 30 Parámetros de la carta psicrometrica.