



Propuesta de un sistema para validar tablas de
irradiación en la ciudad de Bucaramanga

Modalidad: Seminario

Christian Sneyder Peña Albarracín
CC 1098797412
Néstor Fabián Gómez Alvarado
CC 1098741726

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
Facultad de ciencias naturales e ingenierías
Tecnología en electrónica Industrial
Bucaramanga 07/09/2021



Propuesta de un sistema para validar tablas de irradiación en la ciudad de Bucaramanga

Modalidad: Seminario

Christian Sneyder Peña Albarracín
CC 1098797412
Néstor Fabián Gómez Alvarado
CC 1098741726

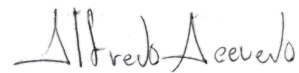
Trabajo de Grado para optar al título de
Tecnólogo en electrónica industrial

Director Michael Arenas Flórez
Codirector Lizeth Dayane Cortés Hernández

Grupo de Investigación en Energía - GIE

UNIDADES TECNOLÓGICAS DE SANTANDER
Facultad de ciencias naturales e ingenierías
Tecnología en electrónica Industrial
Bucaramanga 07/09/2021

Nota de Aceptación



Firma del Evaluador

Válida para seminario
UTS 2021

Firma del Director

DEDICATORIA

A mi familia que me ha impulsado a ser constante y siempre me ha brindado su apoyo incondicional.

ATM: Néstor Fabián Gómez Alvarado

A mi madre que siempre me ha apoyado en todos mis emprendimientos y me ha impulsado a ser mejor persona.

ATM: Christian Sneyder Peña Albarracín

AGRADECIMIENTOS

Expreso mis sinceros agradecimientos a nuestro director y codirector por su valioso tiempo y conocimientos dados para sacar adelante el proyecto.

ATM: Néstor Fabián Gómez Alvarado

Agradezco al director del trabajo Prof.: Michael Arenas Flórez. por su el tiempo y correcciones que fueron vitales para la culminación de este trabajo. también agradezco a mi madre Belsy Milena Albarracín Sánchez que me apoyó incondicionalmente.

ATM: Christian Sneyder Peña Albarracín

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN EJECUTIVO	10
INTRODUCCIÓN	11
1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	12
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	12
1.2. JUSTIFICACIÓN	13
1.3. OBJETIVOS	14
1.3.1. OBJETIVO GENERAL	14
1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	14
1.4. ESTADO DEL ARTE	15
2. MARCO TEORICO	18
2.1. RADIACIÓN SOLAR	18
2.1.1. Piranómetro fotovoltaico	19
2.2. PROTOCOLO DE CONECTIVIDAD	19
2.2.1. Protocolo I2C	19
2.2.2. Protocolo SMBus	21
3. DISEÑO DE LA INVESTIGACION	22
3.1. Metodología de la Investigación	22
3.2. Método o Técnicas	22
4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO	23
4.1. DIAGRAMA DEL SISTEMA	23
4.2. PIRANÓMETRO FOTOVOLTAICO	23
4.3. SENSORES AUXILIARES	25
4.3.1. Sensor TSL2561	25
4.3.2. Sensor DHT11	28
4.4. MICROCONTROLADOR Y MÓDULOS AUXILIARES	29
4.4.1. Arduino UNO Rev3	29
4.4.2. Módulo ESP8266	31
4.4.3. Tarjeta de memoria	31
4.5. MÓDULO DE ALIMENTACIÓN	32
4.5.1. Fuente	32

4.5.2.	Elevador de voltaje	32
4.5.3.	Regulador de 3,3V	33
4.5.4.	Alimentación de amplificadores operacionales	34
4.6.	ANÁLISIS DE CONSUMO DE ENERGÍA	34
4.7.	EVALUACIÓN DE COSTOS	36
5.	RESULTADOS	40
5.1.	MÓDULO DE ALIMENTACIÓN	40
5.2.	DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO	41
5.3.	PRESUPUESTO	43
6.	CONCLUSIONES	47
7.	RECOMENDACIONES	49
8.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	51
9.	ANEXOS	54
A.	CÓDIGO DE FUNCIONAMIENTO BÁSICO DEL SENSOR TDH11	54
B.	CÓDIGO DE FUNCIONAMIENTO BÁSICO DEL MÓDULO SD	55
C.	MAPA DE RADIACIÓN GLOBAL	57
D.	TARIFAS SEPTIEMBRE 2021 – ELECTRIFICADORA DE SANTANDER ESSA	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Espectro Electromagnético	18
Figura 2. Protocolo I2C	20
Figura 3. Diagrama del sistema propuesto	23
Figura 4. Circuito de Piranómetro Fotovoltaico	24
Figura 5. Sensor TSL2561	25
Figura 6. Esquema del circuto propuesto por el fabricante para el TSL256x	27
Figura 7. Sensor TDH11 conectado a Arduino	28
Figura 8. Disposiciones de los pines Arduino UNO Rev3	30
Figura 9. Fuente de alimentación de 5V- 700mA	32
Figura 10. Elevador de voltaje	33
Figura 11. Regulador 3,3VDC	33
Figura 12. Circuito alimentador de operacionales	34
Figura 13. Modulo propuesto de alimentación del circuito	38
Figura 14. Diagrama de funcionamiento	40
Figura 15. Diagrama del circuito	41
Figura 16. Piranómetro RK200-03	42
Figura 17. Código Sensor TDH11	54
Figura 18. Código Módulo SD	55
Figura 19. Mapa de Radiación Global	57
Figura 20. Tarifas septiembre 2021 ESSA	58

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. <i>Parámetros Fotodiodo BPW34</i>	24
Tabla 2. <i>Configuración de los terminales del sensor TSL2561</i>	26
Tabla 3. <i>Parámetros operativos del sensor TSL2561</i>	27
Tabla 4. <i>Parámetros de funcionamiento básicos de la placa Arduino uno Rev3</i>	30
Tabla 5. <i>Características generares de los módulos SD</i>	31
Tabla 6. <i>Análisis de consumo</i>	35
Tabla 7. <i>Evaluación económica de los componentes</i>	36
Tabla 8. <i>Presupuesto general</i>	37
Tabla 9. <i>Presupuesto Global del Proyecto</i>	44

RESUMEN EJECUTIVO

Teniendo en cuenta el auge en la implementación de sistemas fotovoltaicos y ante la necesidad apremiante en el departamento de Santander de conocer los niveles de radiación solar en la ciudad, el presente trabajo de investigación propone un sistema automatizado para la validación de tablas de irradiación.

Este trabajo se realiza mediante un análisis documental cualitativo de literatura especializada, el cual permite tener una idea general del estado del arte del proceso, adquirir los fundamentos teóricos necesarios para diseñar el sistema requerido y definir la topología detallada del sistema a implementar.

El sistema propuesto, se basa en diferentes componentes electrónicos, tales como los fotodiodos BPW34 encargados de censar la radiación solar, un sistema embebido Arduino Uno Rev3 encargado del control y procesamiento de las señales y una serie de sensores y componentes electrónicos auxiliares que trabajando en conjunto logran censar y medir la radiación solar para posteriormente realizar la validación de la información presente en las diferentes bases de datos existentes en la web. El diseño propuesto, proporciona mediciones con un bajo nivel de error, bajo consumo energético y bajo costo de fabricación e implementación si se compara con los dispositivos que se encuentran actualmente en el mercado comercial.

PALABRAS CLAVE. Radiación, energía, piranómetro, microcontrolador, fotodiodo.

INTRODUCCIÓN

Actualmente en el país, se genera un incremento en la implementación de sistemas foto voltaicos, impulsados por los avances tecnológicos, la reforma energética realizada en el 2014 y las políticas enmarcadas en el Pacto de París, el cual fue firmado por Colombia, el 22 de abril del 2021.

Conocer los niveles de radiación es de vital importancia en estos sistemas, para lograr efectuar los cálculos y dimensionarlos en forma correcta. Dichos niveles de radiación se obtienen por medio de estaciones de medición y monitoreo, como las dispuestas por el IDEAM o las disponibles en la web, como las estaciones de la NASA. Las tablas de radiación obtenidas por estos medios presentan inconvenientes, debido a las amplias distancias de censado realizadas desde el espacio. Adicionalmente, en muchos casos, la información disponible es el promedio anualizado de la radiación, como es el caso de la otorgada por el IDEAM.

Teniendo en cuenta la necesidad de contar con información confiable y actualizada sobre los niveles de radiación, en el país se han implementado sistemas basados en fotodiodos, fabricados por estudiantes de diferentes centros de educación superior y se han realizado múltiples trabajos que determinan los niveles de radiación en forma teórica. En esta oportunidad, se realiza un diseño teórico de un sistema de monitoreo de radiación solar, especificando sus componentes y simulando su funcionamiento básico en forma de esquema de bloques, para la posterior implementación eficiente del sistema diseñado.

1. DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad, se presenta un incremento en los sistemas de generación de energía renovables, de los cuales se espera que generen 1.000 MW para final de año y alcanzar los 2.400 MW para el 2022 (Ministerio de Minas y Energía, 2021). Adicional a esto, en la ciudad de Bucaramanga se cuenta con un recurso solar más que suficiente para generar energía fotovoltaica (Sierra et al., 2020).

Para implementar adecuadamente estos sistemas, se han presentado algunas dificultades técnicas, al momento de realizar las mediciones de los niveles de irradiación solar. Para obtener esta información, frecuentemente se opta por el uso de modelos que estiman los niveles de radiación, a partir de datos atmosféricos (Olejua y Navarro, 2020). Lamentablemente, medir la radiación solar no es fácil, requiere de equipos especializados, lo que genera que no estén tan disponibles al público (Sierra et al., 2020); esto obliga a utilizar solo la información que proviene de bases de datos web, la cual es útil, pero a veces por sus grandes distancias de censado no tienen en cuenta la topografía montañosa y la diversidad de climas del país, lo que genera que la medición no sea tan exacta en algunas zonas (Luna et al., 2020).

Ante este panorama, surge la pregunta de ¿qué características técnicas debe tener un equipo para validar las tablas de radiación solar?

1.2. JUSTIFICACIÓN

Ante la creciente popularidad de las energías renovables, y el incremento considerado de la radiación solar, producto del deterioro de la capa de ozono se encuentra que, en la ciudad de Bucaramanga y el área metropolitana no se cuenta con tablas de radiación solar estandarizadas ni tablas oficiales sobre los niveles de radiación; existen bases de datos de software fotovoltaicos y algunos datos libres de investigación realizadas en el sector. Según el Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia, en el departamento de Santander no existe una estación para la medición de radiación solar (IDEAM, Atlas de Radiación Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia, 2014). Este dato se confirma con la tabla de promedios mensuales de irradiación global media recibida en superficie para las principales ciudades del país, en donde se evidencian que no existen datos promedios mensuales sobre la irradiación en esta región del país, específicamente en Santander (IDEAM, s.f.).

Desde el 2014, la legislación colombiana promueve el desarrollo y la utilización de fuentes no convencionales de energía, principalmente aquellas de carácter renovable en el sistema energético nacional (CONGRESO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA, 2014); por lo cual es evidente la necesidad de cuantificar el recurso solar de manera más detallada y precisa para identificar y aprovechar su uso en dichos sistemas energéticos y así, lograr tener datos estadísticos confiables sobre la irradiación solar en el departamento de Santander.

Teniendo en cuenta esta necesidad, se realiza un diseño teórico de un sistema de monitoreo de radiación solar, proponiendo una lista de sensores, circuitos programables y componentes electrónicos, con una interfaz de funcionamiento básica en forma de esquema de bloques. Adicionalmente se sugiere una serie de recomendaciones y pautas

a seguir, creando el diseño teórico y metodológico básico que permitirá la posterior implementación eficiente del sistema propuesto.

Los conocimientos aquí concebidos pueden ser aprovechados por los grupos de investigación de la institución, dado su enfoque hacia las energías renovables, programación, prototipos y comunicaciones. La propuesta del sistema diseñado permite la construcción de un modelo funcional, de manera fácil, obteniendo los resultados esperados. Con la implementación de este sistema, se logra monitorear los niveles de radiación de la ciudad y comparar con las bases de datos actuales y de esta manera definir si esas son las bases de datos de radiación solar requeridas para uso institucional o público.

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. OBJETIVO GENERAL

Proponer un sistema para validar datos de radiación solar disponibles en bases de datos de acceso público para la ciudad de Bucaramanga.

1.3.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Definir una topología de sistema electrónico que permita medir la radiación solar mediante la revisión de bibliografía especializada con el fin de proponer un diseño propio.

- Estimar el presupuesto del sistema de validación de datos de radiación solar por medio de cotizaciones con el fin de conocer el costo de su implementación en la ciudad de Bucaramanga.
- Proponer el circuito electrónico básico a través de las herramientas de diseño electrónico con el fin de generar un esquema de circuito que sirva como guía para la integración de los componentes.

1.4. ESTADO DEL ARTE

Para la elaboración del estado del arte, se busca documentación especializada sobre todo lo referente a la fabricación de sistemas de medición fotovoltaicos. Al realizar dicha investigación, se encuentra que uno de los principales sistemas de medición de radiación, es el piranómetro, por tanto, se enfoca la búsqueda de la información hacia este sistema.

Para empezar, se encuentra la construcción de un piranómetro de bajo costo, con un sistema de medición de radiación, temperatura y humedad relativa. Para ello utilizaron un fotodiodo BPW21R, un microcontrolador ATMEGA 328p, un sensor de humedad DHT 22, su respectivo circuito de alimentación y un circuito RF de transmisión; sumado a la calibración de los sensores y programación de la interfaz en idioma C# y obteniéndose como resultado un dispositivo con una diferencia con respecto a un piranómetro estándar de 3% (Oyelami S. et al., 2021). De este trabajo se puede tomar como referencia de los circuitos como base para la propuesta.

Continuando con el análisis e investigación, se encuentran múltiples trabajos sobre piranómetros, basados en fotodiodos, obteniendo como resultado una muy buena base

documental (Oyelami S. et al., 2020). De este análisis investigativo, se obtuvo información que sirvió para la elaboración del presente documento.

Adicionalmente, en (AVALLONE et al., 2018) se construye un piranómetro térmico, que consiste en un disco de aluminio ennegrecido con una unión caliente y una fría, con un circuito detector de temperatura manejado por un microcontrolador, obteniendo un error estándar de $20,8 \text{ W/m}^2$ y una velocidad o tiempo de respuesta de 65 s. Este trabajo aporta una idea que se puede utilizar un piranómetro fototérmico en vez de uno fotovoltaico.

Continuando con la investigación, se encuentra la construcción de un piranómetro fotovoltaico basado en el fotodiodo BPW34, el cual utiliza la aproximación, de que cuando incide 1 W/m^2 de irradiación este genera una tensión de $580 \mu\text{V}$. Además, se incluye un circuito para acondicionar la señal proveniente del fotodiodo y obtener como resultado un mejor comportamiento del sistema, pero también se presentan una serie de variaciones que se les atribuyen a la variación de la temperatura (S.Parthasarathy & Anandkuma, 2016). En este documento, se puede ver más de cerca una propuesta de un circuito para acondicionar la señal proveniente del fotodiodo.

Otro de los sistemas investigados, corresponde a un piranómetro fotovoltaico, basado en una celda fotosensible “panel solar” que consiste en poner el panel en una especie de corto circuito a través de una resistencia muy pequeña y medir su tensión. La señal resultante, es acondicionada a través de un circuito basado en el operacional TL081; luego se realizan una serie de pruebas para medir el efecto de la temperatura y el ángulo en el piranómetro y se concluye, que este sistema no presenta la exactitud para su uso científico por problemas relacionados a la temperatura y ángulo, pero se concluye también, que los piranómetros fotovoltaicos son una excelente opción, si se tienen en cuenta estos factores y si se compensa su efecto en la medición (Fernández, 2012). De

este trabajo se recoge las recomendaciones y hallazgos con respecto al efecto de la temperatura y ángulo en las mediciones fotovoltaicas.

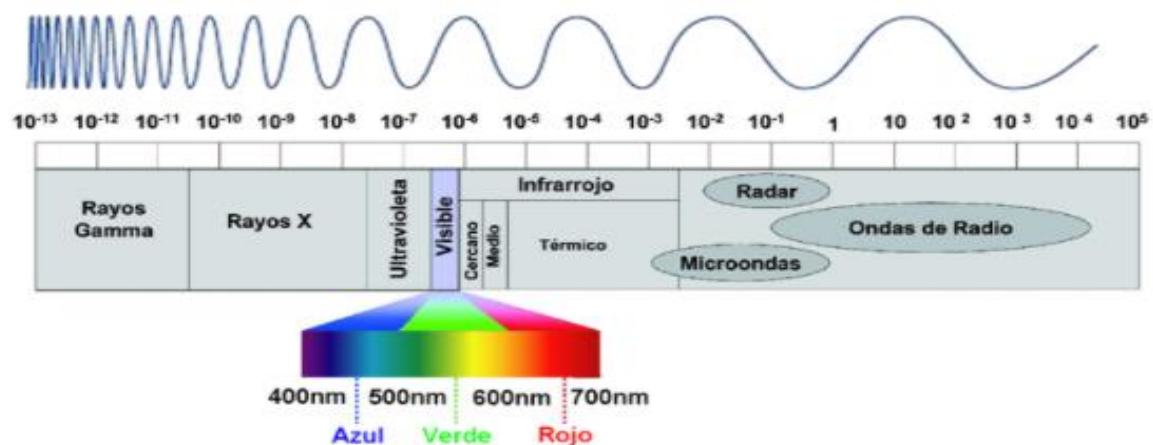
Por último, se investiga sobre la construcción y calibración de un piranómetro fotovoltaico basado en el diodo comercial PIN OP910W. El piranómetro fotovoltaico, fue calibrado mediante otro piranómetro de espectro, de la marca EPPLEY y una serie de pruebas en laboratorio en el cual se comprobó su respuesta a la temperatura y su respuesta óptica y linealidad, obteniendo como resultado un dispositivo con una linealidad del 99.28% y una sensibilidad de $8,57\mu\text{V}/\text{m}^2$ (Cardona et al., 2008). De este documento, se tiene que una cubierta difusora mejora el apartado óptico del dispositivo, ayuda a mejorar el ángulo y si se trabaja el fotodiodo como una fuente de corriente, este es menos susceptible a la temperatura.

2. MARCO TEORICO

2.1. RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar o flujo electromagnético, es una serie de ondas de alta energía, que se generan por los procesos de fusión nuclear que se dan en el núcleo del sol, liberando enormes cantidades de energía, la cual llega a nuestro planeta en forma de ondas electromagnéticas (Gallegos, 2004). Dependiendo de sus frecuencias se clasifican como se puede apreciar en la Figura 1. La radiación solar es muy importante en múltiples campos, como son el de la salud, la agricultura o en el campo de la generación de energía fotovoltaica.

Figura 1. Espectro Electromagnético



Fuente: Tomada de (IDEAM, 2014)

Los niveles de radiación se dan en la unidad de vatios por metro cuadrado (W/m^2) y se miden con un dispositivo llamado piranómetro que cuantifica la cantidad de radiación solar que incide sobre una superficie. Dependiendo de su funcionamiento y diseño, se encuentran varios tipos, pero teniendo en cuenta las

necesidades del proyecto, se enfoca la investigación hacia el piranómetro fotovoltaico.

2.1.1. Piranómetro fotovoltaico

Este tipo de dispositivo basa su funcionamiento en el principio fotoeléctrico, donde la incidencia de la radiación solar en un fotodiodo permite diferenciar el espectro solar por la frecuencia de la onda electromagnética. Es decir, la corriente generada por el diodo es proporcional a los niveles de radiación que inciden sobre su superficie, siendo este el principio básico de los paneles fotovoltaicos. Los piranómetros fotovoltaicos, son menos sensibles que otros piranómetros, siendo más económicos y con una correcta calibración son muy confiables.

2.2. PROTOCOLO DE CONECTIVIDAD

A continuación, se explica el funcionamiento básico de algunos protocolos de comunicación, que utilizan los dispositivos para comunicarse entre sí y tener un correcto funcionamiento del circuito diseñado.

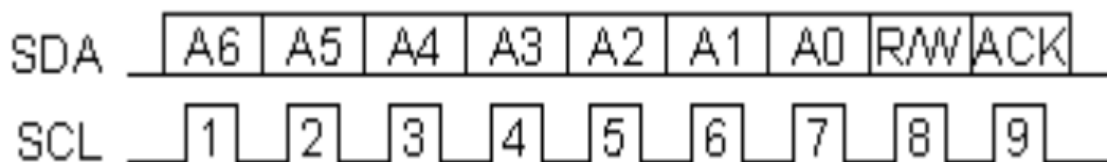
2.2.1. Protocolo I2C

Es un protocolo estándar de comunicación diseñado por Philips Semiconductor, que solo requieren de dos cables y una conexión de tierra (Carletti, 2017), alcanzando velocidades estándar de unos 100kbps. La primera línea de señal SCL, que significa system clock, corresponde a la señal del reloj que sincroniza el sistema y la segunda línea SDA, que significa system data, corresponde a la línea de transmisión de las instrucciones o la información.

Para su óptimo funcionamiento, las líneas de señal requieren de una configuración de drenaje abierto (Carletti, 2017), por lo que se colocan resistencias de pull-up cuyo valor más común es de $10k\Omega$, aunque pueden fluctuar dependiendo de las necesidades del diseño. Para la comunicación, generalmente utiliza la configuración de maestro-esclavo, donde solo el maestro puede iniciar la transmisión. Para poder entender mejor la transmisión con este protocolo, se debe analizar el paso a paso del diagrama de tiempos del protocolo, el cual, se muestra en la Figura 2.

La condición inicial ocurre, cuando ambos canales están en alto, entonces, el maestro se prepara para iniciar la comunicación, colocando el canal SDA en bajo, pero deja SCL en alto. Luego de las instrucciones de inicio, el maestro envía al esclavo una serie de siete bits que componen el registro y un bit más, que corresponde a la tarea que se realiza R/W (escritura o lectura de datos). Cuando el maestro envía los datos, el esclavo debe responder con un bit de confirmación (ACK). Mientras el bit de ACK este en bajo, esto le indica al maestro que el esclavo reconoce la solicitud y puede comunicarse. Si el bit (R/W) es puesto en bajo significa que el maestro le envía datos o instrucciones al esclavo, en su lugar si el bit (R/W) está en alto, esto significa que el maestro recibe información del esclavo, para esto, genera pulsos de reloj para que el esclavo pueda enviar la información.

Figura 2. Protocolo I2C



Fuente: Tomada de (Carletti, 2017)

2.2.2. Protocolo SMBus

El SMBus (Bus de administración del sistema) está basado en el I2C por lo cual son compatibles. Aunque su base es el I2C, existen algunas diferencias entre los dos protocolos. La principal diferencia es que sus estados lógicos son fijos (Pini, 2020). Otra diferencia que hay que tener en cuenta es la velocidad máxima de 100kbps, mientras que la de I2C puede ser mayor. Por último, este protocolo incluye tres tipos de equipos: Dispositivo esclavo, dispositivo maestro y el host, el cual es el encargado de proporcionar la interfaz principal con la CPU del sistema.

3. DISEÑO DE LA INVESTIGACION

3.1. Metodología de la Investigación

Para lograr satisfactoriamente los objetivos del proyecto, se ha realizado una investigación bibliográfica con un enfoque cualitativo, distribuido en fases, en donde se caracteriza una serie de componentes electrónicos y eléctricos, que, en su conjunto, pueden dar solución la problemática planteada.

3.2. Método o Técnicas

La primera fase, corresponde al análisis documental que permite la realización del estado del arte y el marco teórico del trabajo. Al realizar el análisis más en profundidad de los documentos, se identifican los componentes necesarios para implementar un dispositivo para la validación de tablas de irradiación.

Una vez identificados los elementos, en la segunda fase, se procede a la búsqueda de componentes similares disponibles localmente y se analiza sus características tales como el consumo de corriente, el voltaje de alimentación y los protocolos de conectividad.

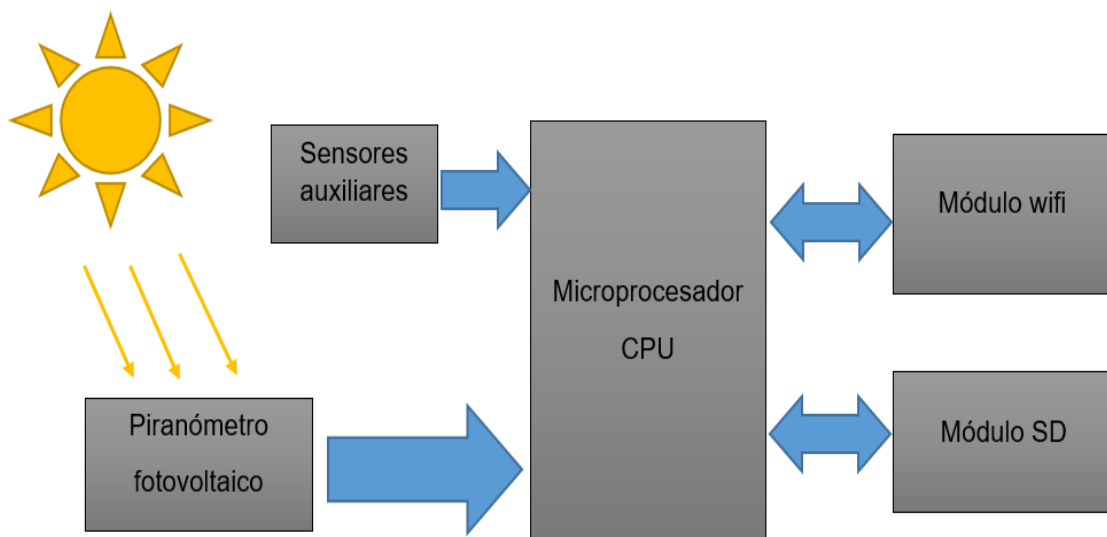
Con toda la información recolectada en las fases anteriores, se procede a crear el diseño, el esquema de funcionamiento y un diagrama operativo, más un análisis de costos, para saber cuánto es el costo de la implementación del sistema diseñado.

4. DESARROLLO DEL TRABAJO DE GRADO

4.1. DIAGRAMA DEL SISTEMA

El sistema planteado está basado en un piranómetro fotovoltaico, en donde las señales obtenidas son procesadas por un sistema embebido micro controlado. Además, tiene sensores auxiliares, módulo de memoria y un módulo wifi. El sistema en diagrama de bloques se puede apreciar en la Figura 3.

Figura 3. Diagrama del sistema propuesto



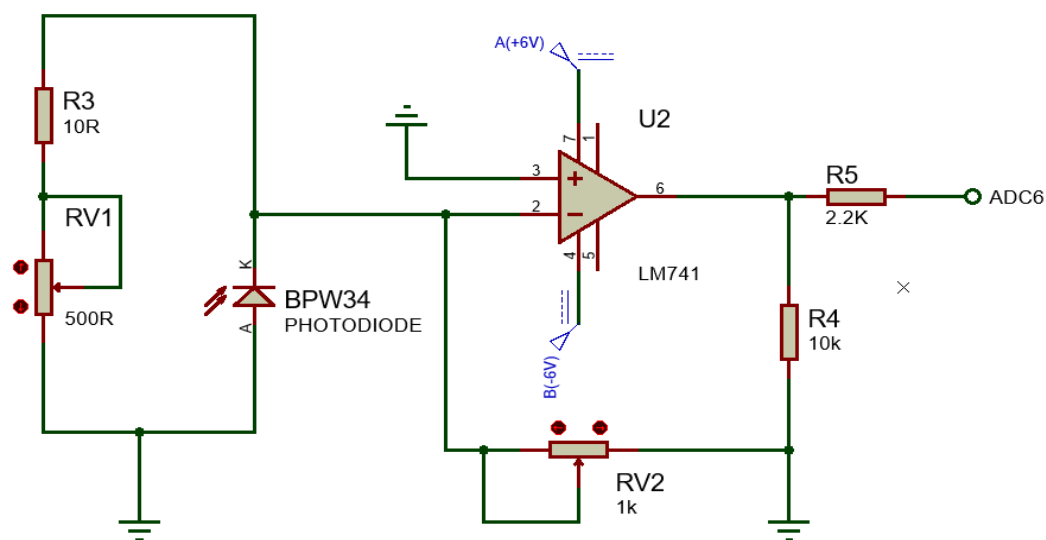
Fuente: Autores.

4.2. PIRANÓMETRO FOTOVOLTAICO

Para empezar a definir ya el diseño del piranómetro fotovoltaico, se especifican los componentes electrónicos principales del diseño. El dispositivo por diseñar tiene como base el fotodiodo BPW34, el cual se ajusta a los requerimientos del diseño por sus especificaciones técnicas mostradas en la Tabla 1. Dicho fotodetector se

conecta como fuente o señal de entrada a un amplificador operacional LM741, una resistencia variable de $1\text{k}\Omega$ y un condensador de $1\mu\text{F}$. El circuito esquemático diseñado se observa detalladamente en la Figura 4.

Figura 4. Circuito de piranómetro fotovoltáico



Fuente: Autores.

Tabla 1. Parámetros Fotodiodo BPW34

Parámetros	Mínimo	Regular	Máximo	Unidades
Voltaje inverso	60			V
Corriente inversa		2	30	nA
Rangos de temperatura	-40		+100	°C
Rango de sensibilidad	430		1100	nm
Foto corriente		70		uA
Longitud de onda			900	nm

Nota: Tabla elaborada por los autores a partir de la información presente en la hoja de datos del fotodiodo BPW34 (ALLDATASHEET.COM, 2021)

4.3. SENSORES AUXILIARES

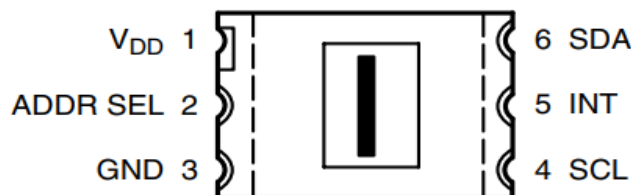
Los sensores auxiliares son dispositivos que completan la información que va a entregar el dispositivo final. La propuesta de diseño tiene en cuenta también los parámetros de temperatura, humedad y niveles de luz natural. Para poder censar estos parámetros, se utiliza el sensor TDH11 y el sensor TSL2561 respectivamente.

4.3.1. Sensor TSL2561

El sensor TSL2561, es un dispositivo de segunda generación, capaz de censar luz ambiental. Cada dispositivo lleva dos conversores de analógico a digital (ADC) que integran las corrientes de dos fotodiodos ubicados en el canal cero y canal uno.

Ambos conversores realizan la integración al mismo tiempo. Una vez terminado el proceso, la información se guarda en los registros del canal cero y canal uno respectivamente. Cuenta con doble búfer para garantizar la integridad de los datos y solo, cuando se termina la transferencia el dispositivo, da comienzo a un nuevo ciclo de integración. La comunicación se logra a través de un bus serie I2C o un SMBus estándar de dos cables y esto permite conectarlo fácilmente con un microcontrolador como puede ser un sistema embebido Arduino.

Figura 5. Sensor TSL2561



Fuente: Tomada de (ams AG, 2017)

El TSL2561 tiene una salida de tipo digital y no necesita un circuito para acondicionar la señal (ams AG, 2017). También cuentan con la función de interrupción que facilita su uso y permite establecer un umbral superior y uno inferior. El dispositivo cuenta con seis pines de conexión (ver Figura 5) y su configuración y descripción se aprecia en la Tabla 2.

Tabla 2. Configuración de los terminales del sensor TSL2561

Terminal	Pin	Tipo	Descripción
VDD	1	ALIMENTACIÓN	Voltaje de alimentación
ADDR SEL	2	“I” ENTRADA	Selección del registro de direcciones
GND	3	TIERRA O MASA	Tierra de la fuente de alimentación “todos los voltajes están referenciados a GND”
SCL	4	“I” ENTRADA	Entrada de la señal de reloj
INT	5	“O” SALIDA	Interrupciones “Activo en bajo”
SDA	6	“I/O”	Entrada o salida de datos

Nota: tabla elaborada por los autores con base a la información de (ams AG, 2017)

Esta familia de sensores se puede dividir en dos grandes grupos dependiendo de la interfaz de funcionamiento. En este caso, el TSL2561 utiliza I2C y es controlado y monitoreado por un total de dieciséis registros de los cuales tres son reservados. En la Tabla 3, se observa los parámetros de funcionamiento recomendables y máximos del sensor TSL2561.

Adicionalmente, en la Figura 6, se visualiza un esquema de circuito, suministrado por el fabricante en su datasheet. Se observa la conexión de un condensador de $0,1\mu\text{F}$ como desacople del voltaje (Vdd) e igualmente se indica que si se utilizan resistencias pull-up (R_{pi} , RP) pueden variar entre (10 – 100) k Ω . Se recomienda consultar el datasheet completo del dispositivo, para conocer las

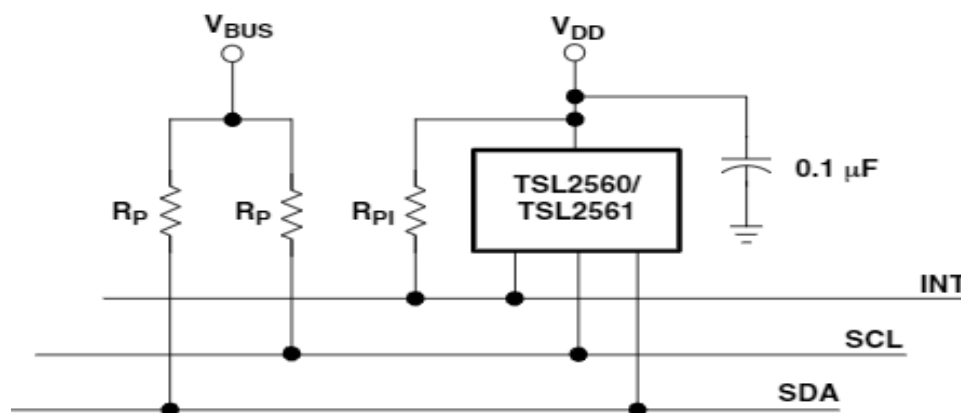
disposiciones de los registros, formas de control y manejo de interrupciones, entre otras especificaciones.

Tabla 3. Parámetros operativos del sensor TSL2561

símbolo	Parámetros	mínimo	Recomendado	máximo	unidades
VDD	Voltaje de alimentación	2,7	3,0	3,6	V
IDD	Corriente de alimentación	-	240	600	μA
TA	Temperatura	-30	-	70	$^{\circ}\text{C}$
VIL	Voltaje bajo	-0,5	-	0,8	V
VIH	Voltaje alto	2,1	-	3,6	V
VOL	Salida de bajo voltaje	0	-	0,6	V
ILeak	Corriente de fuga	-5	-	5	μA

Nota: Tabla elaborada por los autores con base a la información de (ams AG, 2017)

Figura 6. Esquema del circuito propuesto por el fabricante para el TSL256x



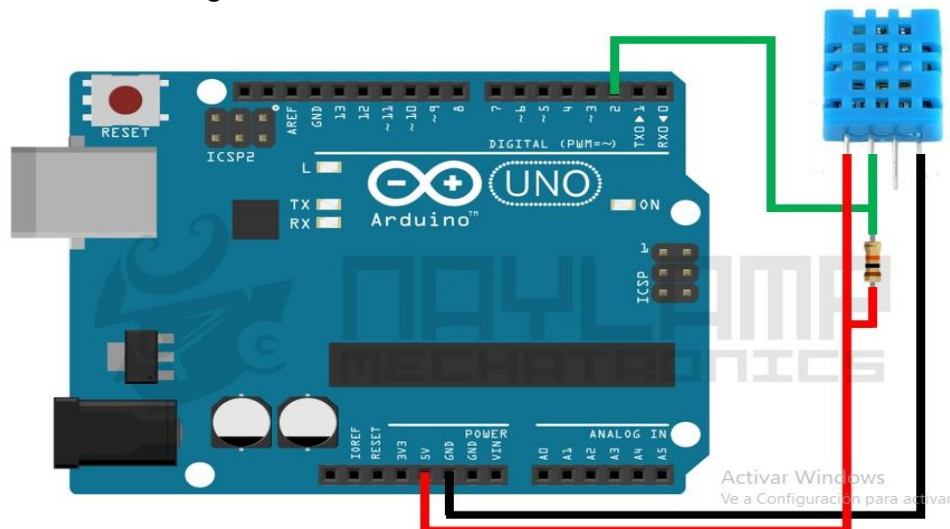
Fuente: Tomada de (ams AG, 2017)

4.3.2. Sensor DHT11

El sensor DHT11, es un sensor digital de temperatura y humedad relativa, por lo tanto, se debe conectar en la parte digital del sistema embebido Arduino. Su rango de funcionamiento varía entre 3.5 Vdc a 5.5 Vdc y puede ser alimentado por el pin positivo del sensor a 5 Vdc y el pin negativo del sensor a 0 V (GND) del Arduino o tierra del circuito.

El sensor DHT11 utiliza un sensor capacitivo de humedad y un termistor para medir el aire circulante y muestra los datos por medio del pin de salida del sensor conectado a la parte digital del Arduino. Su rango de temperatura medible es de 0 a 50°C, su rango de precisión a 25°C es de $\pm 2^\circ\text{C}$. En el rango de medición de humedad puede ir entre 20% a 90% de humedad relativa con una resolución de 1% RH. En la Figura 7, se observa la forma de conexión del sensor a la tarjeta Arduino UNO.

Figura 7. Sensor TDH11 conectado a Arduino



Fuente: Tomada de (Naylamp Mechatronics SAC, 2021)

4.4. MICROCONTROLADOR Y MÓDULOS AUXILIARES

Continuando con la definición de los componentes electrónicos del diseño, se propone trabajar con una de las plataformas programables Arduino junto con módulos de wifi y de almacenamiento. A continuación, se realiza una descripción de cada uno de estos sistemas.

4.4.1. Arduino UNO Rev3

El sistema Arduino UNO Rev3, es un sistema micro-programable basado en microcontrolador ATMEGA328p. La web oficial dice que es la mejor placa para iniciar con procesos de programación de sistemas embebidos (Arduino, 2021), ya que contiene todo lo necesario para la implementación de diferentes proyectos electrónicos.

En la Figura 8, se observa que la placa cuenta con seis entradas analógicas (A0 – A5), cuenta con un total de catorce pines (I/o) digitales, de los cuales seis son PWM. Adicionalmente, cuenta con tres pines de tierra, una entrada VIN y dos salidas de +5 Vdc y 3,3 Vdc respectivamente. Igualmente, en la Tabla 4, se puede apreciar las características eléctricas básicas del Arduino UNO Rev3.

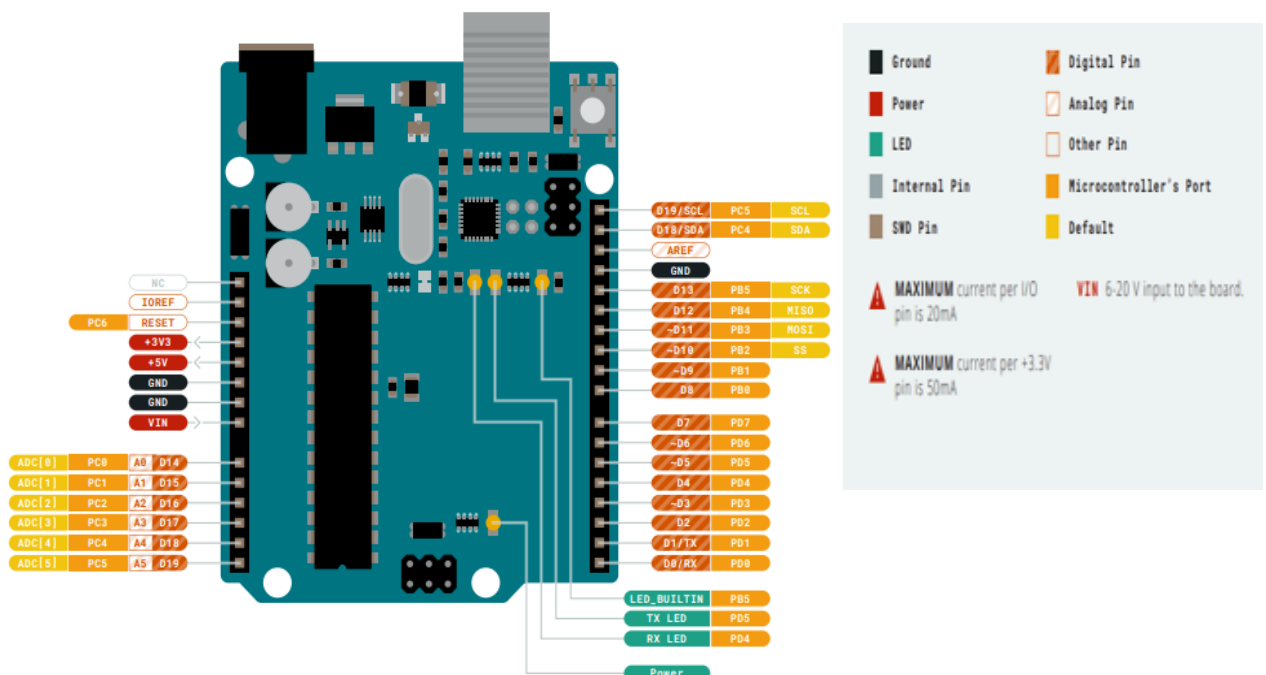
Arduino UNO Rev3, tiene una amplia gama de librerías hechas por la comunidad y el fabricante, que facilita la programación de los sensores y la conectividad entre los distintos dispositivos, siendo la placa Arduino UNO, la más usada y documentada de todas (Arduino, 2021).

Tabla 4. Parámetros de funcionamiento básicos de la placa Arduino uno Rev3

Nombres	Mínimos	Recomendado	Máximo	Unidades
Voltaje de operación	-	5	-	V
Voltaje de alimentación VIN	6	7-12	20	V
Frecuencia	-	-	16	MHz
Corriente de salida/entrada	-	-	0,02	A
Corriente del pin 3,3V	-	-	0,05	A
Máxima corriente de la placa	-	-	0,5	A

Nota: tabla elaborada por los autores con base en la información de (Arduino, 2021).

Figura 8. Disposiciones de los pines Arduino UNO Rev3



Fuente: Tomada de (Arduino, 2021).

4.4.2. Módulo ESP8266

El módulo ESP8266 es una solución wifi, que permite enviar la información a un computador o cargarla a una página web, de la cual, puede ser recuperada luego de forma remota. Su voltaje de alimentación varía entre (2,5 ~ 3,6) Vdc y un consumo energético de aproximadamente 80 mA.

4.4.3. Tarjeta de memoria

Para almacenar los datos de forma local, ya sea para tener un archivo de respaldo o porque no se contempla la posibilidad de subir la información a la web, se puede utilizar un módulo SD. En la Tabla 5, se visualiza algunas características generales de estos módulos microSD y en el apéndice C de los anexos, se presenta el código de funcionamiento básico. Existen módulos diseñados para trabajar directamente con las plataformas Arduino, conectándose en los pines 11 (MOSI (DI)), 12 (MISO (DO)), 13 (CLK) y 4 (CS). Dichas conexiones se complementan con la utilización de las librerías `#include <SPI.h>`, `#include <SD.h>`.

Tabla 5. Características generales de los módulos SD

Nombre	Mínimo	recomendado	Máximo	unidades
Voltaje operativo	-	5	-	V
Voltaje Vdc	4,5	5	5,5	V
Consumo de corriente	0,2	80	200	mA
Capacidad de memoria	2G	-	32G	bits

Nota: Elaborada por los autores a través de información disponible en los datasheet de los diferentes dispositivos.

4.5. MÓDULO DE ALIMENTACIÓN

En esta sección se presenta una serie de componentes eléctricos y electrónicos existentes que sirven para alimentar el circuito de la propuesta.

4.5.1. Fuente

Para alimentar el circuito propuesto, se puede utilizar una fuente de alimentación como la que se observa en la Figura 9, la cual cuenta con una entrada de 85 a 220 V en corriente alterna, a una frecuencia de 50/60 Hz y una salida de 5 Vdc y 700mA.

Figura 9. Fuente de alimentación de 5V- 700mA

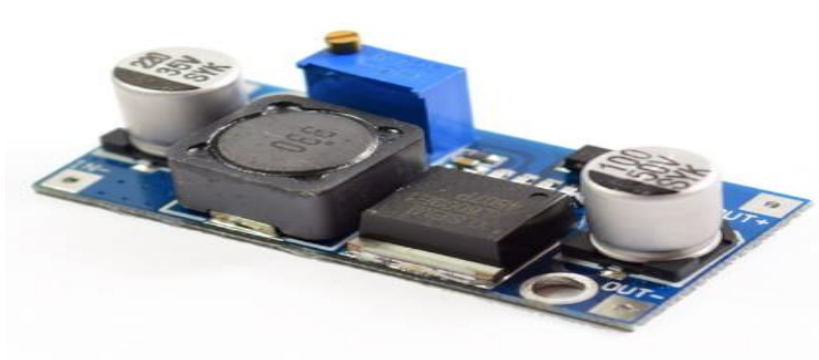


Fuente: Tomada de (MACTRONICA.COM, 2021)

4.5.2. Elevador de voltaje

Para el diseño, se utiliza una placa elevadora DC-DC, basada en el integrado XL6009, el cual se observa en la Figura 10. Este dispositivo permite alimentar diferentes dispositivos que requieran una tensión de entrada de 12 Vdc.

Figura 10. Elevador de voltaje



Fuente: Tomada de (MACTRONICA.COM, 2021)

4.5.3. Regulador de 3,3V

En el diseño a implementar, se necesita alimentar sensores a un voltaje de 3,3 Vdc. Por tanto, se propone un regulador basado en el integrado AMS1117, el cual se muestra en la Figura 11. Este regulador, se alimenta con una entrada entre 4,7 a 7 Vdc y ofrece una salida regulada de 3,3 Vdc, con una corriente de 800 mA.

Figura 11. Regulador 3,3Vdc

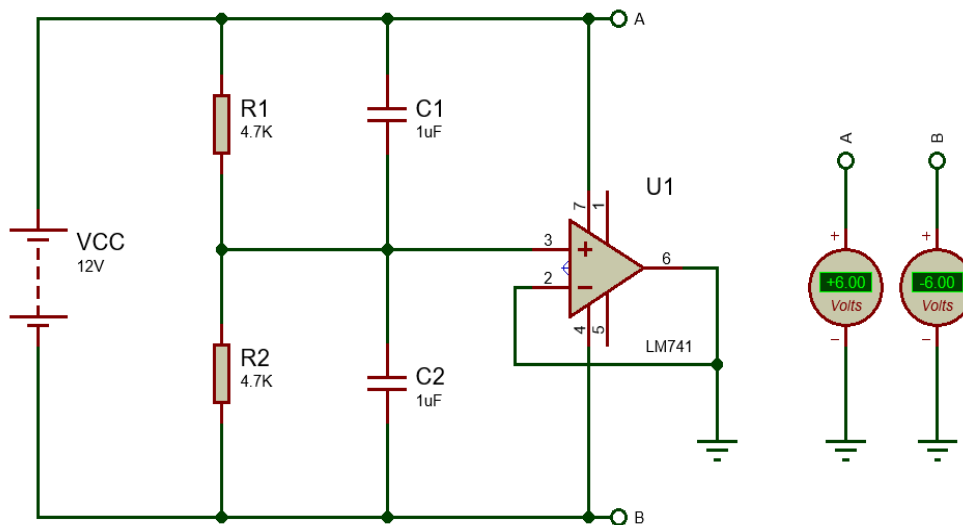


Fuente: Tomada de (MACTRONICA.COM, 2021)

4.5.4. Alimentación de amplificadores operacionales

El siguiente circuito es una opción para alimentar los amplificadores operacionales que se usan en el diseño propuesto. Dicha alimentación cuenta con una salida de +6 Vdc y -6 Vdc como se puede apreciar en la Figura 12. Las salidas de ± 6 Vdc son suficientes, dado que la información se procesa por un microcontrolador que funcionan con señales de 0 a 5 Vdc.

Figura 12. Circuito alimentador de operacionales



Fuente: Autores.

4.6. ANÁLISIS DE CONSUMO DE ENERGÍA

Teniendo en cuenta la información presentada en los diferentes datasheet, se estructura la Tabla 6, donde se puede apreciar los voltajes de operación y la corriente máxima de trabajo de cada dispositivo, con el fin de determinar cuánta potencia consume aproximadamente el sistema diseñado.

Tabla 6. Análisis de consumo

Nombre	Voltaje de operación	Consumo de corriente	Potencia
Arduino	(7 – 12) V	65 mA	0,455 W - 0,78 W
TDH11	(3,5 - 5,5) V	0,3 mA	1,05 mW - 1,65 mW
ESP8266	(2,5 – 3,6) V	80 mA	0,2 W - 0,288 W
Modulo SD	(4,5 - 5,5) V	200 mA	0,9 W - 1,1 W
TSL2561	(2,7 – 3,6) V	0,6 mA	1,62 mW - 2,16 mW
total		346 mA	1,55 W - 2,17 W

Nota: elaborada por el autor a partir de la información de los diferentes datasheet

Consideración 1: el consumo de corriente es el máximo que consumen los dispositivos según la información de los distintos datasheet.

Consideración 2: si el Arduino es alimentado por VIN, se recomienda un voltaje de entre (7-12) Vdc, para un funcionamiento adecuado del dispositivo (Arduino, 2021).

Adicionalmente, se realiza un análisis del consumo energético desde el punto de vista económico. Para realizar los cálculos correspondientes, se usa la información de la Tabla 6, en donde se especifica el consumo total del dispositivo, el cual es de 346 mA. Se aplica la ecuación de potencia para circuitos en corriente directa y se toma el rango superior.

$$LEY\ ohm \approx P = V \times I$$

$$P = 2.17\ W$$

Se realizan los siguientes cálculos para saber el costo a un año vista

$$2.17 \text{ W} \times \frac{1}{1000} = 0.00217 \text{ kW}$$

Para continuar con el análisis, se debe tener en cuenta que, aunque el día tiene veinticuatro horas, solo catorce horas son útiles para obtener la energía solar por irradiación. En el anexo C, se observa el mapa de radiación global, en donde se especifica el intervalo de horas de radiación, entre las 5:00 am – 6:00 pm. Por tanto, reemplazando los datos en la ecuación, se obtiene un consumo de 11.0887 kWh al año, como se observa a continuación.

$$\frac{14 \text{ h}}{\text{dia}} \times 365 \text{ Dias} = 5110 \text{ h}$$

$$0.00217 \text{ kW} \times 5110 \text{ h} = 11.0887 \text{ kWh}$$

4.7. EVALUACIÓN DE COSTOS

Para tener un panorama económico general de los costos de implementación del sistema propuesto, se realiza la consulta de cuatro diferentes páginas web de proveedores de componentes electrónicos y se recopila la información en la Tabla 7. En las páginas consultadas, no se pudo encontrar el diodo BPW34 o su reemplazo, por ende, se complementa la búsqueda de su costo en Mercado Libre.

- BPW34 \$ 25.700 COP

Un punto importante para tener en cuenta es que, al hacer la compra en un mismo lugar, se puede ahorrar en costos de envío, por esta razón, se elige para el cálculo de costos, los valores obtenidos del proveedor ARCA ELECTRONICA. Para

el resto de los componentes se elige, el más económico del mercado, presente en la tabla.

Tabla 7. Evaluación económica de los componentes

componente	SIGMA ELECTRONICA	ELECTRONILAB	ARCA ELECTRONICA	VISTRONICA
Sensor TSL2591	\$38.890 COP	\$25.700 COP		
Sensor DHT11	\$14.994 COP	\$6.500 COP	\$7.000 COP	\$6.052 COP
Arduino uno R3	\$101.150 COP	\$23.500 COP	\$30.000 COP	\$29.560 COP
Fuente 5V-700mA			\$7.000 COP	
Modulo Elevador de voltaje XL6009	\$9.996 COP	\$8.000 COP	\$8.500 COP	\$6.754 COP
Modulo Regulador de voltaje AMS1117			\$3.500 COP	\$2.142 COP
LM741	\$2.618 COP		\$1.300 COP	
Modulo SD			\$5.000 COP	\$3.700 COP
Módulo ESP8266		\$11.800 COP	\$11.000 COP	\$10.735 COP
Protoboard	\$13.090 COP	\$11.500 COP	\$9.900 COP	\$10.379 COP

Nota: cotización de diferentes componentes en cuatro tiendas virtuales que operan en Colombia, tabla realizada por los autores.

Al sumar los precios de los componentes comprados en ARCA ELECTRONICA, se obtiene un valor de \$83.200 COP. Sumando \$25.700 COP del sensor TSL2591 comprado en ELECTRONILAB y los \$25.700 del BPW34, se obtiene un valor final de \$134.600 COP. A este valor se debe sumar un factor de 15%, dado que en la cotización no se tienen en cuenta posibles costos de envío y la inclusión de componentes muy económicos como resistencias, condensadores y cables.

$$134.600 \times 0.15 = 20.190 \text{ COP}$$

Con este porcentaje adicional, el precio final aproximado de \$155.000 COP. El dispositivo implementado con estos materiales puede ser operado y controlado por una o más personas y estaría ubicado en las instalaciones de la UTS en Bucaramanga - Santander.

Otro punto para tener en cuenta en la evaluación de costos, es el factor del consumo energético del dispositivo. Según el cálculo realizado en la sección 4.6 de este documento, el dispositivo tiene un consumo energético anual aproximado de 11.0887 kWh. Para calcular el costo de este consumo, es necesario conocer el valor del kW/h en la ciudad de Bucaramanga. Después de consultar las tarifas del mes de septiembre del 2021, de la empresa electrificadora de Santander (ESSA,2021), se obtiene que el costo por kW/h, sin subsidio del gobierno, es de \$559,5974 COP, como se puede constatar en el anexo D.

$$11.0887 \text{ kWh} \times \frac{559.5974 \text{ COP}}{\text{kWh}} = \$6205.21 \text{ COP}$$

El costo energético de mantener el dispositivo conectado por un año es de \$6.205,2076 COP o aproximado \$ 6.205 COP. A este valor no se le han aplicaron los subsidios del gobierno.

Después de realizar toda la evaluación de costos asociados al proyecto, en la Tabla 8, se observa el presupuesto general necesario para la implementación del dispositivo en un periodo de un año.

Tabla 8. Presupuesto general

variables	cantidades	Valor
Componentes	2	\$310.000 COP
Personal	2	\$0 COP
Pasajes de Transporte	60	\$156.000 COP
Costo energético		\$6.205 COP
Mantenimiento		\$50.000 COP
Total		\$522.205 COP

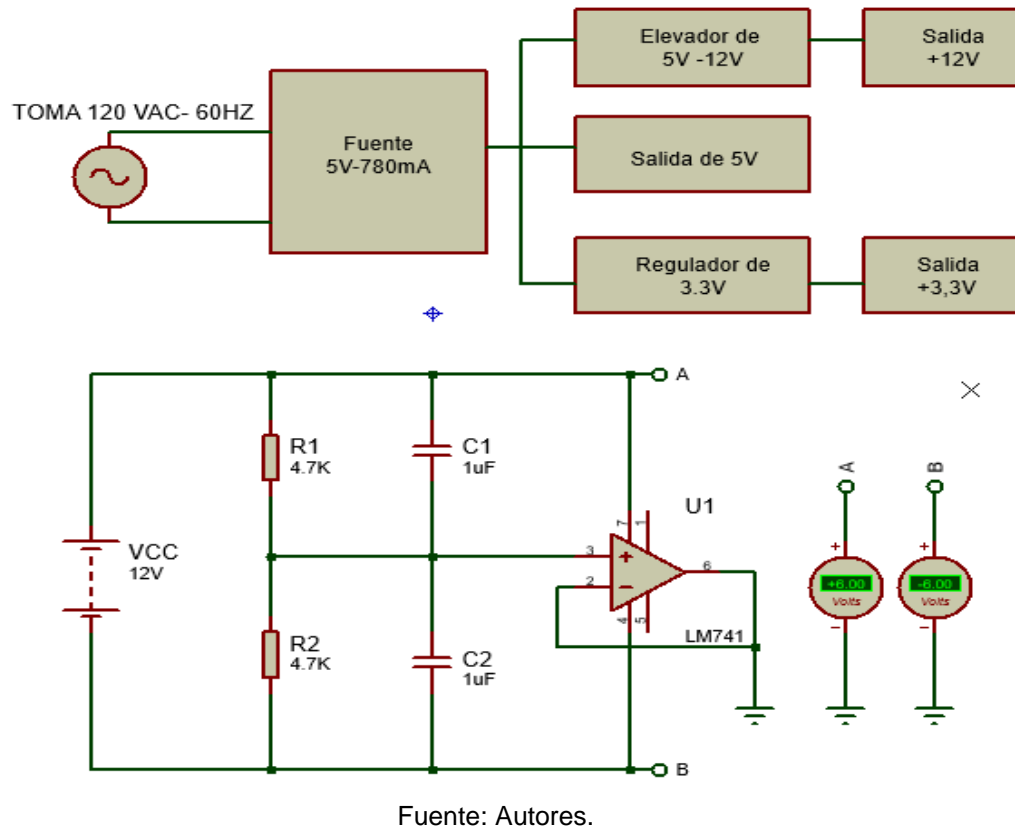
Nota: presupuesto implementación del dispositivo a un año, elaborado por autores del proyecto.

5. RESULTADOS

5.1. MÓDULO DE ALIMENTACIÓN

Se puede observar, que el consumo plateado del sistema es aproximadamente de 400 mA, por ende, con la fuente recomendada de 700 mA y con sus respectivos módulos de elevación y regulación, se logra cumplir con los requerimientos del sistema. Adicionalmente, al módulo de alimentación se le incorpora el circuito para alimentar los amplificadores operacionales. Todo el módulo de alimentación propuesto se muestra en la Figura 13.

Figura 13. Modulo propuesto de alimentación del circuito



El módulo de alimentación proporciona cinco salidas como se puede apreciar en la Figura 9 y se utilizan de la siguiente forma:

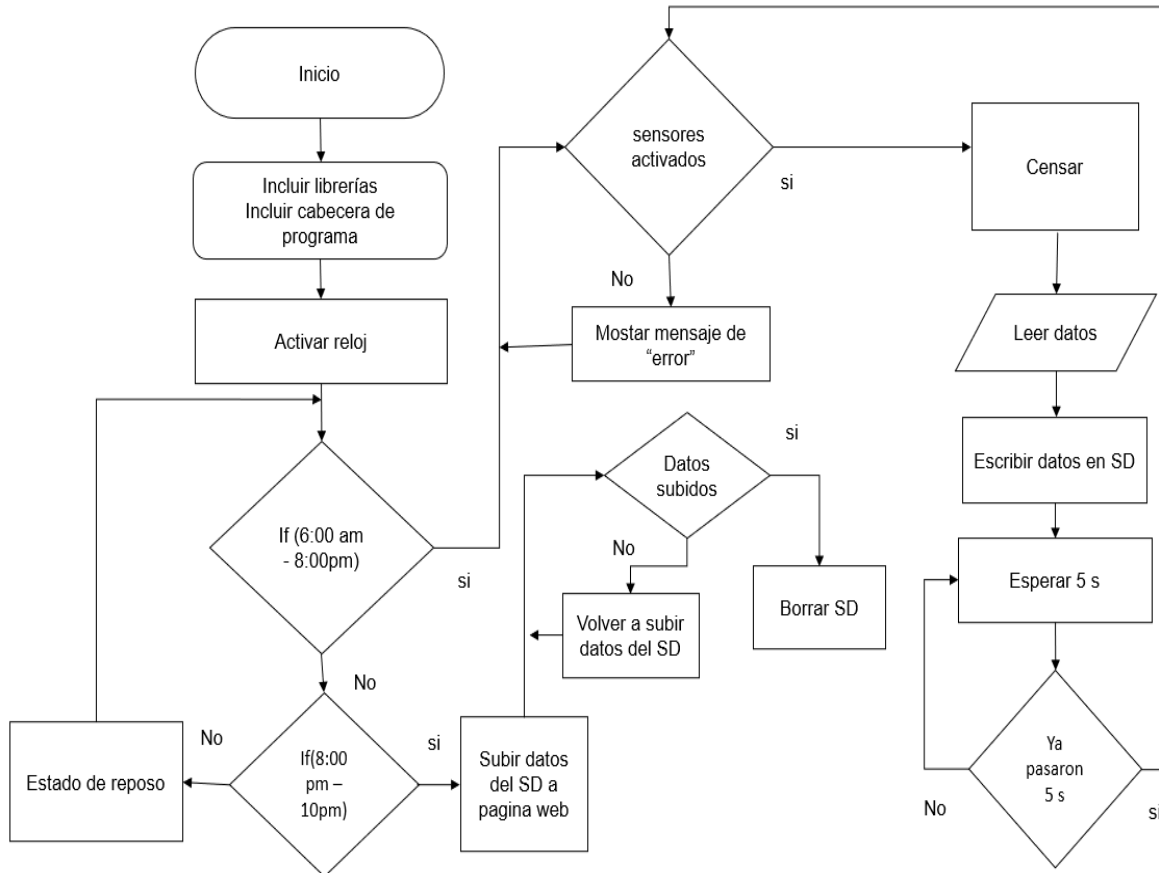
- La salida de +5 Vdc se utiliza para alimentar el DTH11 y el módulo SD.
- La salida de +12 Vdc se utiliza para alimentar el Arduino a través del pin VIN
- La salida de 3,3 Vdc se utiliza para alimentar los sensores TSL2561 y el módulo wifi ESP8266.

- El módulo inferior es para alimentación de los amplificadores operacionales +6 Vdc y –6 Vdc

5.2. DIAGRAMA DE FUNCIONAMIENTO

En esta sección, se presenta el diagrama de funcionamiento del dispositivo propuesto. El sistema está diseñado para trabajar en tres bloques de horarios; el primero de 6:00 am a 8:00 pm que sería el bloque de día, donde el sistema mide y censa las variables; después un segundo bloque de 8:00 pm a 10:00 pm donde el sistema carga la información a la web o a un computador por medio del wifi y procede a limpiar la memoria SD; y el tercer bloque opera de 10:00 pm a 6:00 am donde el sistema entra en un estado de reposo, dado que en esta franja no hay luz solar. Esto se puede visualizar en la Figura 14.

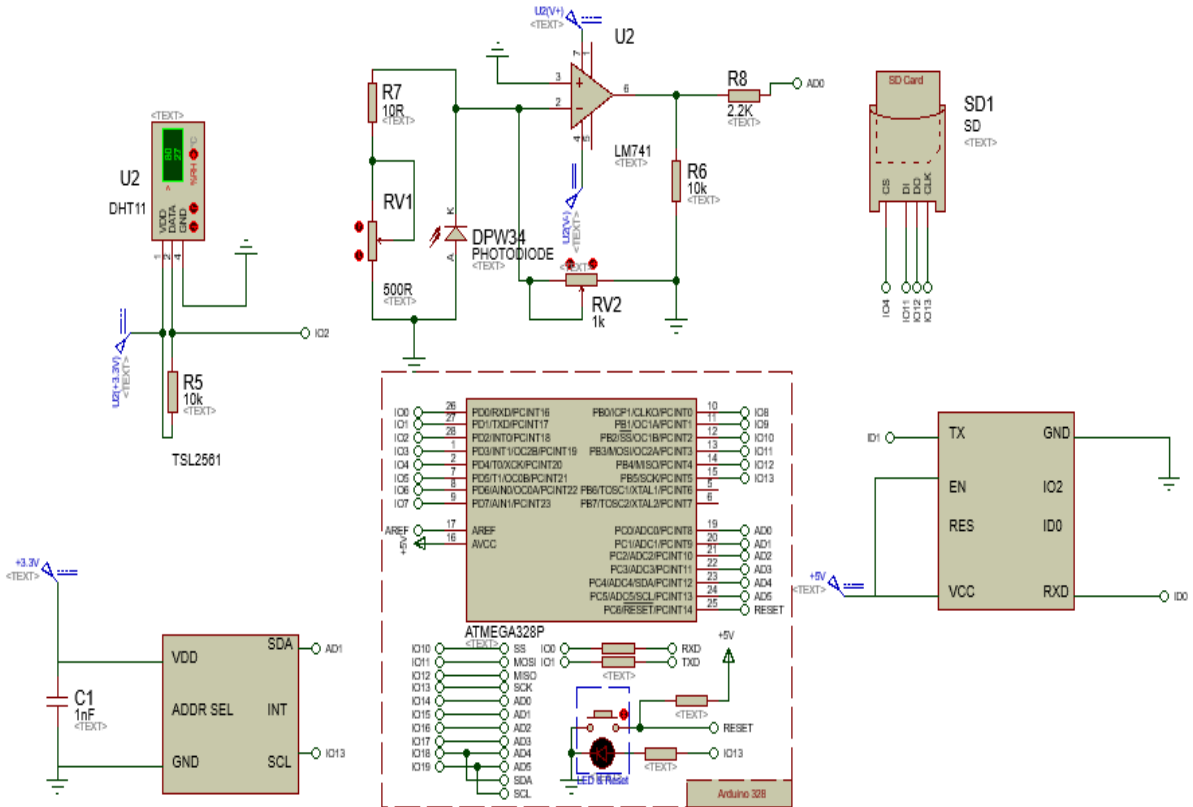
Figura 14. Diagrama de funcionamiento



Fuente: Autores.

En la Figura 15 se visualiza el esquemático general del circuito del dispositivo diseñado, el cual se convierte en una guía de conectividad básica. En él se muestra, las diferentes conexiones de la plataforma Arduino UNO con el circuito integrado ESP8266, el módulo SD, el sensor TDH11 y el fotodiodo.

Figura 15. Diagrama del circuito



Fuente: Autores.

5.3. PRESUPUESTO

Un aspecto importante al momento de implementar el dispositivo propuesto es el costo global del proyecto. A continuación, en la Tabla 9, se presenta en forma detallada los costos generales, teniendo en cuenta los materiales, herramientas, transporte, mano de obra, entre otros.

Tabla 9. Presupuesto global del proyecto

Componente	Cantidad	Tiempo	Costo
Sensor TSL2591	2	-	\$51.400 COP

F-DC-125 INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO EN MODALIDAD DE PROYECTO DE INVESTIGACIÓN, DESARROLLO TECNOLÓGICO, MONOGRAFÍA, EMPRENDIMIENTO Y SEMINARIO

VERSIÓN: 1.0

Sensor DHT11	2	-	\$14.000 COP
Arduino UNO R3	2	-	\$60.000 COP
Fuente 5V-700mA	2	-	\$14.000 COP
Modulo Elevador de voltaje XL6009	2	-	\$17.000 COP
Modulo Regulador de voltaje AMS1117	2	-	\$7.000 COP
LM741	2	-	\$2.600 COP
Modulo SD	2	-	\$10.000 COP
Módulo ESP8266	2	-	\$22.000 COP
Protoboard	2	-	\$19.800 COP
Diodo BPW 34	2	-	\$51.400 COP
Componentes diversos	2	-	\$40.000 COP
Subtotal			\$309.200 COP
Mano de obra			
Personal	2	15 días	\$1,200.000 COP
Transporte	4	246 días	\$2,558.400 COP
Equipo personal	-	-	-
Subtotal			\$3,758.400 COP
Equipo			
Multímetro digital uní-t	1	--	\$54.000 COP
Set de 4 pinzas	1	-	\$12.000 COP
Subtotal			\$66.000 COP
Costo energético	-	1 año	\$6.205 COP
Total			\$4,139.805 COP

Nota 1: El salario de un tecnólogo se asume de 1,200.000 COP dividido en 30 días nos da que el diario se vendrá pagado 40.000 COP.

Nota 2: La calibración se puede hacer a través del método de comparación con un piranómetro estándar.

Nota 3: En Colombia en el 2021 hay 246 días hábiles de trabajo, los demás son o fines de semana o festivo
 Nota 4: El pasaje en transporte público a normativa vigente 21/09/2021 tiene un precio en Bucaramanga de 2.600 COP
 Nota 5: Tabla elaborada por los autores

El costo de la implementación del dispositivo a un año es de aproximadamente \$522.205 COP, el cual representa un costo menor que algunos dispositivos genéricos que se consiguen en el mercado, aproximadamente en \$600.000 COP por unidad. La propuesta que se presenta en este trabajo incluye componentes electrónicos de bajo costo para reemplazar los piranómetros, reduciendo considerablemente los costos de implementación del dispositivo.

Al comparar el dispositivo propuesto, con un piranómetro certificado, cuyo costo es de aproximadamente \$2'000.000 COP, como lo es el RK200-03 o Rk200-04 que se muestra en la Figura 16, se evidencia que la propuesta presentada en este trabajo, desde el punto de vista económico, es más que viable, dado que el dispositivo tiene un costo aproximado de 25% menos del valor de un dispositivo certificado que se encuentra en el mercado.

Figura 16. Piranómetro RK200-03



Fuente: Tomada de (Didáctica electronica.com, 2021)

Es de aclarar que los dispositivos comerciales, solo leen la radiación solar y para poder registrar la información y crear bases de datos, se necesita adquirir una serie de elementos adicionales que elevan su costo. Por lo anteriormente mencionado, la propuesta planteada en este trabajo es una solución económicamente viable, que basa su valor más que todo en la programación y la calibración de la señal del fotodiodo, logrando así, datos confiables para la validación de las tablas de irradiación requeridas.

6. CONCLUSIONES

- La topología básica del dispositivo diseñado resultante se presentó en la Figura 3 del documento, donde se aprecia que el sistema requiere de dos elementos principales: el sensor fotovoltaico y un sistema micro controlado para el procesamiento de señales. Adicionalmente, se necesita máximo tres componentes auxiliares: sensores de temperatura, humedad y luz ambiental, modulo SD y módulo wifi, los cuales dan un valor agregado al dispositivo.
- Como sistema de control y procesamiento de señal del dispositivo, se confirma que la opción más factible es la plataforma Arduino UNO Rev3, dado que cuenta con una amplia gama de librerías que facilitaría la programación, sumado a un alto número de pines que permite conectar todos los elementos electrónicos utilizados, sin la necesidad de utilizar más de un microcontrolador por piranómetro a implementar.
- Los componentes necesarios para construir el dispositivo tienen un costo bastante moderado, aproximadamente \$310.000 COP. Dicho valor es mínimo, si se compara con los dispositivos comerciales vigentes en el mercado. Adicionalmente, como son componentes que se consiguen en el mercado nacional, al momento de realizar reparaciones y mantenimiento al dispositivo, se puede realizar rápidamente, sin incrementar costos por importación de materiales y minimizando los tiempos de parada del dispositivo.
- El sistema diseñado, tiene un costo operativo en su primer año de \$522.205 COP obteniendo excelentes resultados en las mediciones realizadas. Este es

un costo de operación bastante bajo, comparado con el costo de un piranómetro comercial de alrededor de \$2'000.000 COP, sin contar los costos de reparación en el momento que lo requiera. Este aspecto, hace que la propuesta presentada en este trabajo esté al alcance del ciudadano del común o de pequeñas empresas que quieran realizar la medición de la radiación solar en Santander.

- Se concluye también, que el circuito a implementar (ver Figura 16), desde el punto de vista del hardware del dispositivo, es un circuito de un grado de complejidad baja, compuesto por componentes electrónicos básicos y fáciles de configurar. Esto hace que el diseño sea confiable, seguro y, ante todo, amigable con el personal de mantenimiento y el usuario final del dispositivo.
- Adicionalmente, se concluye también, que la programación necesaria para el correcto funcionamiento del dispositivo (ver Figura 15), no es compleja, es corta y está al alcance de un tecnólogo en electrónica, con formación en programación de sistemas embebidos de gama baja y media. La programación se basa en leer los sensores, procesar las señales adquiridas y guardar los valores obtenidos en la tarjeta de memoria del dispositivo. Esta labor se hace fácilmente, gracias a la versatilidad que ofrece la plataforma Arduino y el conjunto de librerías asocias a este sistema embebido.

7. RECOMENDACIONES

- Es recomendable, realizar la calibración del dispositivo diseñado en este trabajo, comparándolo con un equipo patrón de medición de radiación. Esto garantiza que las mediciones del dispositivo sean correctas y válidas, para así, conformar las bases de datos de tablas de irradiación en la región de Santander.
- Se debe tener en cuenta que, debido a la poca área de censado de un solo fotodiodo, se puede trabajar con más de uno, con el fin de mejorar el nivel de error y tener una mayor área de censado en el dispositivo.
- En cuanto a que los tiempos de censado deben ser largos con el fin de obtener información válida. Se debe contar con un piranómetro de respaldo, con el fin de que, si ocurre un imprevisto, poder utilizarlo y no perder datos valiosos en diferentes periodos de tiempo.
- Para un análisis futuro, se debe tener en cuenta, el efecto de la temperatura en el fotodiodo, para poder cuantificar dicho efecto, determinar posibles pérdidas y así poder realizar las correcciones necesarias en versiones nuevas del dispositivo.
- Se recomienda seguir investigando y profundizando en esta área, para que en un futuro no muy lejano, se pueda pensar en la posibilidad de contar con bancos de pruebas para la calibración de piranómetros, con patrones estandarizados y en sí, avanzar hacia la construcción de estaciones

climatológicas de bajo costo para la medición, no solo de irradiación solar, sino de más variables climatológicas, que aporten información veraz y confiable al sector de energías renovables y sistemas fotovoltaicos.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MACTRONICA.COM. (2021). *www.mactronica.com.co*. Recuperado el 30 de junio de 2021, de *www.mactronica.com.co*: <https://www.mactronica.com.co/convertidor-dc-dc-xl6009-elevador>
- ALLDATASHEET.COM. (2021). *ALLDATASHEET.COM*. Obtenido de *ALLDATASHEET.COM*: <https://www.alldatasheet.com/datasheet-pdf/pdf/26251/VISHAY/BPW34.html>
- ams AG. (05 de Mayo de 2017). TSL2561 Ambient Light Sensor. Recuperado el 07 de Abril de 2021, de <https://ams.com/tsl2561#tab/documents>
- Arduino. (2021). <https://www.arduino.cc/>. Obtenido de <https://www.arduino.cc/https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>
- AVALLONE, E., MÍORALLÍ, P. C., SCALON, V. L., PADILHA, A., & OLIVEIRA, S. D. (1 de Marzo de 2018). Thermal Pyranometer Using the Open Hardware Arduino Platform. *21(1) P.1-5(1)*. *International Journal of Thermodynamics*. doi:<https://doi.org/10.5541/ijot.5000209000>
- Cardona, C. A., Cely, Ó. E., & Guerrero, F. (21 de julio de 2008). Diseño y construcción de un medidor de radiación solar. *Tecnura*, *12(23)*, p.13-23. doi:<https://doi.org/10.14483/22487638.6263>
- Carletti, E. J. (19 de julio de 2017). Comunicación - Bus I2C. Recuperado el 05 de julio de 2021, de <https://www.bolanosdj.com.ar/MOVIL/ARDUINO2/ComunicacionBusI2C.pdf>
- CELSIA. (2018). *Eficiencia Energetica*. Obtenido de Todo lo que Debes Saber Sobre Energia Solar en Colombia: <https://eficienciaenergetica.celsia.com/todo-lo-que-debes-saber-sobre-energia-solar-en-colombia/>
- CONGRESO DE LA REPÚBLICA DE COLOMBIA. (13 de Mayo de 2014). LEY 1715 DE 2014. Bogota, Bogotá, D. C, colombia: Diario Oficial No. 49.150. Recuperado el 07 de julio de 2021, de http://www.secretariasenado.gov.co/senado/basedoc/ley_1715_2014.html
- didactica electronica.com. (2021). *didactica electronica*. Obtenido de didactica electronica: <https://www.didacticaselectronicas.com/index.php/sensores/radiacion-uv/piran%C3%B3metro-solar%C3%ADmetro-actin%C3%B3metro-sensores-de-radiaci%C3%B3n-solar-rk200-03-rika-electronic-detail>
- ESSA, E. D. (2021). *ELECTRIFICADORA DE SANTANDER ESSA*. Obtenido de *ELECTRIFICADORA DE SANTANDER ESSA*: https://www.essa.com.co/site/Portals/0/documentos/mi-factura/tarifas/2021/Tarifa_ESSA_202109.pdf
- Fernández, J. M. (10 de febrero de 2012). PIRANÓMETRO FOTOVOLTAICO. Pamplona, Navarra, España. Obtenido de <https://academica-e.unavarra.es/bitstream/handle/2454/4670/577682.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

- Gallegos, H. G. (2004). Notas sobre radiación solar. (225). Luján, Buenos Aires, Argentina. Obtenido de https://www.researchgate.net/profile/Hugo-Grossi-Gallegos/publication/311375862_Notes_on_Solar_Radiation_en_espanol/links/584338c208ae2d2175637d92/Notes-on-Solar-Radiation-en-espanol.pdf
- HG Ingeniería y Construcciones S.A.S. (23 de Octubre de 2020). *www.hgingeneria.com.co*. Obtenido de *www.hgingeneria.com.co*: <https://www.hgingeneria.com.co/radiacion-solar-en-colombia/>
- IDEAM. (2014). *Atlas de Radiacion Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia*. Obtenido de IRRADIACION GLOBAL HORIZONTAL MEDIO DIARO ANUAL : <http://atlas.ideam.gov.co/visorAtlasRadiacion.html>
- IDEAM. (2014). *Atlas de Radiacion Solar, Ultravioleta y Ozono de Colombia*. Obtenido de Anexo: Promedios Mensuales de Irradiacion Global Media Recibida en Superficie para las Principales Ciudades del Pais: <http://atlas.ideam.gov.co/basefiles/Anexo-Promedios-mensuales-de-Irradiacion-Global-Media.pdf>
- IDEAM. (s.f.). <http://www.ideam.gov.co/>. Recuperado el 17 de julio de 2021, de <http://www.ideam.gov.co/>: <http://www.ideam.gov.co/web/tiempo-y-clima/radiacion-solar-ultravioleta>
- IDEAM. (2018). *IDEAM*. Obtenido de IDEAM: http://www.ideam.gov.co/documents/24277/72007220/PDF_ATLAS/83b33ddd-09ef-4fa6-9419-cdf8b26db260
- Luna-Carlosama, C., Jiménez-García, F., Moreno-Chuquen, R., & Mulcué-Nieto, L. (29 de mayo de 2020). Potencial de irradiación solar para generar electricidad en el departamento del Putumayo de Colombia. *Vol. 19, n.º 3, pp. 153-162, 2020*. Putumayo, Colombia: Revista UIS Ingenierías. doi:<https://doi.org/10.18273/revuin.v19n3-2020015>
- MACTRONICA.COM. (2021). *Mactronica electronica y tecnologia*. Recuperado el 30 de Junio de 2021, de Mactronica electronica y tecnologia: <https://www.mactronica.com.co/mini-fuente-convertidor-ac-dc-5v-700ma>
- MACTRONICA.COM. (30 de junio de 2021). *www.mactronica.com*. Recuperado el 2021, de *www.mactronica.com*: <https://www.mactronica.com.co/regulador-ams1117-33v>
- Ministerio de Minas y Energía. (2021). *Transición energética: un legado para el presente y el futuro de Colombia*. Obtenido de <https://www.minenergia.gov.co/libro-transicion-energetica>
- Naylamp Mechatronics SAC. (s.f.). *Naylamp Mechatronics*. Recuperado el 24 de julio de 2021, de *Naylamp Mechatronics*: https://naylampmechatronics.com/blog/40_tutorial-sensor-de-temperatura-y-humedad-dht11-y-dht22.html
- Olejua-Gómez, C. A., & Navarro-León, A. A. (28 de septiembre de 2020). Estimación de la Radiación Solar Mediante Métodos Empíricos en Bucaramanga, Colombia. *Vol. 5, Núm. 2 (2020)*. (C. Veracruz, Ed.) Bucaramanga, Santander, Colombia. Recuperado el 07 de julio de 2021, de <http://www.rinderesu.com/index.php/rinderesu/article/view/88/92>
- Oyelami, S., Azeez, N. A., Adedigba, S. A., Akinola, O. J., & Ajayi, R. (16 de diciembre de 2020). A Pyranometer for Solar Radiation Measurement-Review. *3 N1 p.61-68*.

- Adeleke University Journal of Engineering and Technology. Obtenido de <http://aujet.adelekeuniversity.edu.ng/index.php/aujet/article/view/114>
- Oyelami, S., Azeez, N. A., Ologunye, O. B., Adeyi, A. J., Adegboye, T. A., Olawale, O. K., & Olawuyi, O. A. (2021). Development of a Low-Cost Wireless Data Logging Pyranometer with Inbuilt Temperature and Humidity Monitoring System. *Environmental Challenges*(2021). doi:<https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100219>
- Pini, A. (07 de Abril de 2020). *Digi-Key Electronics*. Obtenido de Digi-Key Electronics: <https://www.digikey.com.mx/es/articles/why-the-inter-integrated-circuit-bus-makes-connecting-ics-so-easy>
- Programarfacil.com. (2021). *Programarfacil.com*. Obtenido de Programarfacil.com: <https://programarfacil.com/blog/arduino-blog/sensor-dht11-temperatura-humedad-arduino/>
- S.Parthasarathy, & Anandkuma, D. N. (julio de 2016). Development of Low Cost Data Acquisition. *volumen 5 p.12850-12856*(issue 7). *International Journal of Innovative Research in Science*,. doi:DOI:10.15680/IJRSET.2016.0507146
- Sierra, N. G., Quintero, D. M., & Navarro, A. A. (28 de Agosto de 2020). Estimación de la Radiación Solar en Bucaramanga, Santander Mediante el Método de °Angström- Prescott. Bucaramanga, santander, colombia. Recuperado el 07 de julio de 2021, de http://cici.unillanos.edu.co/media2020/memorias/CICI_2020_paper_76.pdf
- Vergara-Barrios, P. P., Rey-López, J. M., Osma-Pinto, G. A., & Ordóñez-Plata, G. (15 de junio de 2014). Evaluación del potencial solar y eólico del campus centra de la Universidad Industrial de Santander y la ciudad de Bucaramanga, Colombia. *Artículos*(vol 13). Bucaramanaga, Santander, Colombia: Revista Uis ingenierias. Recuperado el 06 de julio de 2021, de <https://revistas.uis.edu.co/index.php/revistausingenierias/article/view/49-57/4729>
- VISHAY. (2020). <https://www.vishay.com>. Obtenido de <https://www.vishay.com>: <https://www.vishay.com/product?docid=81521>

9. ANEXOS

A. CÓDIGO DE FUNCIONAMIENTO BÁSICO DEL SENSOR TDH11

Figura 17. Código Sensor TDH11

```
#include <DHT.h>

#define DHTPIN 5
#define DHTTYPE DHT11

DHT dht(DHTPIN, DHTTYPE);

void setup() {
  Serial.begin(9600);
  dht.begin();
}

void loop() {
  delay(60000);

  float hum = dht.readHumidity();
  float tem = dht.readTemperature();
  float fha = dht.readTemperature(true);

  if (isnan(hum) || isnan(tem) || isnan(fha)) {
    Serial.println("Error obteniendo los datos del sensor DHT11");
    return;
  }

  float hif = dht.computeHeatIndex(f, h);
  float hic = dht.computeHeatIndex(t, h, false);

  Serial.print("Humedad: ");
  Serial.print(hum);
  Serial.print(" %t");
  Serial.print("Temperatura: ");
  Serial.print(tem);
  Serial.print(" *C ");
  Serial.print(fha);
  Serial.print(" *F");
  Serial.print("Índice de calor: ");
  Serial.print(hic);
  Serial.print(" *C ");
  Serial.print(hif);
  Serial.println(" *F");
}
```

Fuente: Tomada de (Programarfacil.com, 2021)

B. CÓDIGO DE FUNCIONAMIENTO BÁSICO DEL MÓDULO SD

Figura 18. Código Módulo SD

```
#include <SPI.h>
#include <SD.h>
File myFile;
void setup() {
  Serial.begin(9600);
  while (!Serial) {
    ; // wait for serial port to connect. Needed for native USB port only
  }
  Serial.print("Initializing SD card...");
  if (!SD.begin(4)) {
    Serial.println("initialization failed!");
    while (1);
  }
  Serial.println("initialization done.");
  // open the file. note that only one file can be open at a time,
  // so you have to close this one before opening another.
  myFile = SD.open("test.txt", FILE_WRITE);
  // if the file opened okay, write to it:
  if (myFile) {
    Serial.print("Writing to test.txt...");
    myFile.println("testing 1, 2, 3.");
    // close the file:
    myFile.close();
    Serial.println("done.");
  } else {
    // if the file didn't open, print an error:
    Serial.println("error opening test.txt");
  }
  // re-open the file for reading:
  myFile = SD.open("test.txt");
  if (myFile) {
    Serial.println("test.txt:");
    // read from the file until there's nothing else in it:
    while (myFile.available()) {
      Serial.write(myFile.read());
    }
    // close the file:
    myFile.close();
  } else {
    // if the file didn't open, print an error:
    Serial.println("error opening test.txt");
  }
}
void loop() {
  // nothing happens after setup
}
#include <SD.h>
File myFile;
void setup()
{
```

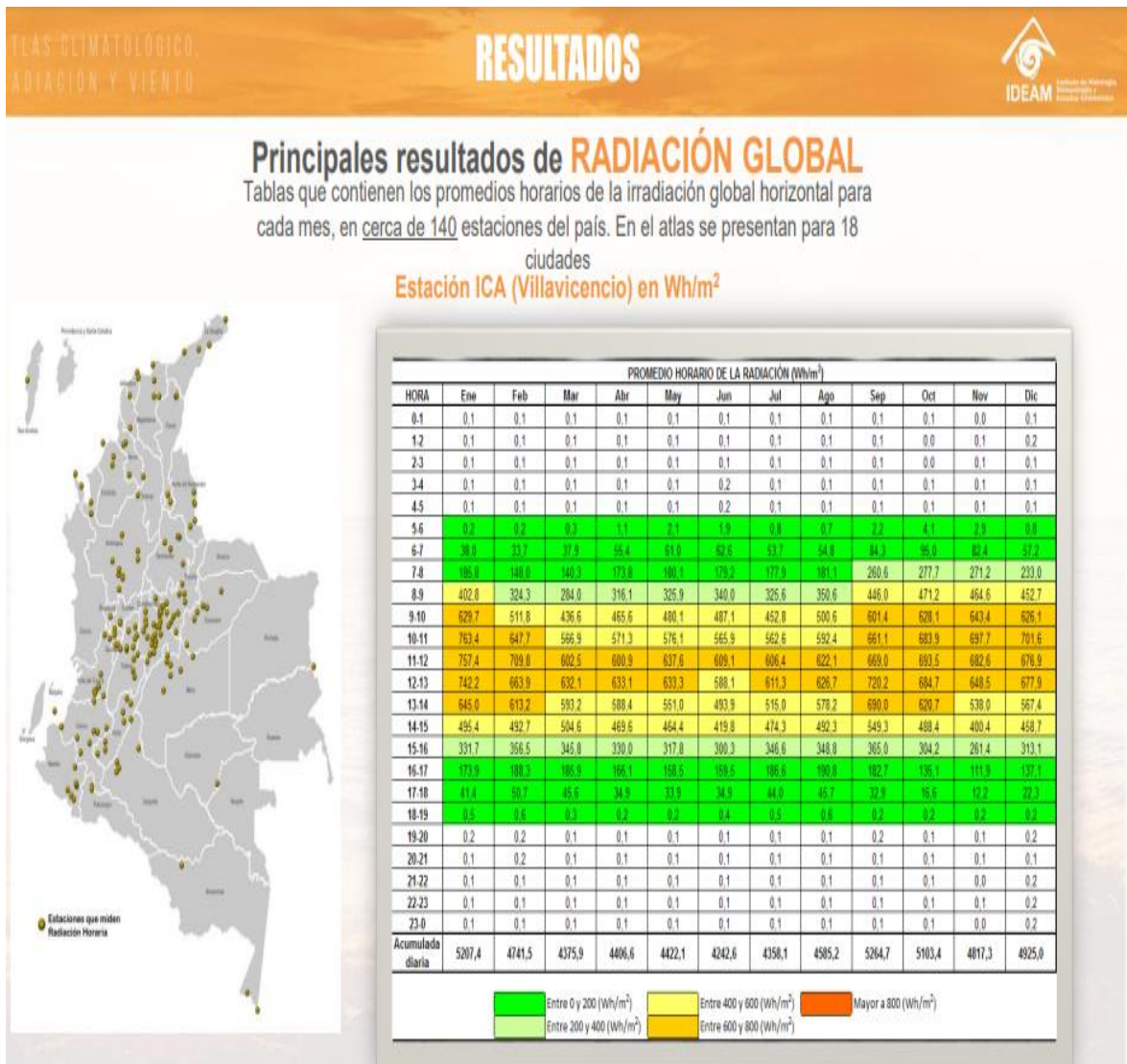
```

Serial.begin(9600);
Serial.print("Iniciando SD ...");
if (!SD.begin(4)) {
    Serial.println("inicializacion fallida");
    return;
}
Serial.println("inicializacion correcta");
}
void loop()
{
myFile = SD.open("datalog.txt", FILE_WRITE);
if (myFile) {
    Serial.print("Escribiendo SD: ");
    int tem = analogRead(0);
    int hum = analogRead(1);
    int luz = analogRead(2);
    myFile.print("Tiempo(ms)=");
    myFile.print(millis());
    myFile.print(", tem=");
    myFile.print(tem);
    myFile.print(", hum=");
    myFile.print(hum);
    myFile.print(", luz=");
    myFile.println(luz);
    myFile.close();
    Serial.print("Tiempo(ms)=");
    Serial.print(millis());
    Serial.print(", tem=");
    Serial.print(tem);
    Serial.print(", hum=");
    Serial.print(hum);
    Serial.print(", luz=");
    Serial.println(luz);
} else {
    Serial.println("Error al abrir el archivo");
}
delay(100);
}
    
```

Fuente: Tomada de (Programarfacil.com, 2021)

C. MAPA DE RADIACIÓN GLOBAL



Figura 19. Mapa de Radiación Global



Fuente: Tomada de (IDEAM, 2018)

D. TARIFAS SEPTIEMBRE 2021 – ELECTRIFICADORA DE SANTANDER ESSA

Figura 20. Tarifas septiembre 2021 ESSA

ELECTRIFICADORA DE SANTANDER S.A. ESP.									
INFORMA A SUS USUARIOS DEL SISTEMA DE ENERGIA ELECTRICA DEL DEPARTAMENTO DE SANTANDER, NORTE DE SANTANDER, SUR DEL CESAR, BOLIVAR Y BOYACA									
ESSA se acogió a la opción tarifaria de acuerdo a lo establecido en las Resolución CREG 012 de 2020 y realiza publicación de la tarifa del mes de SEPTIEMBRE de 2021									
Teniendo en cuenta las resoluciones 119/07, 180/14, 191/14 y 015/16, 015/18, 019/18, 030/18, 158/19, 103/19, 129/19, 036/19, 199/19, 104/20 expedidas por la Comisión de Regulación de Energía y Gas CREG, que permiten establecer los costos de la prestación del servicio a usuarios regulados.									
TARIFAS RESIDENCIALES									
ESTRATO		1		2		3		4	
PROPIEDAD ACTIVOS	NIVEL MEDIDA	% SUBSIDIO	TARIFA \$/kWh	% SUBSIDIO	TARIFA \$/kWh	% SUBSIDIO	TARIFA \$/kWh	TARIFA \$/kWh	
ESSA	I	-60.00%	247.4953	-50.00%	309.3691	-15.00%	525.9274	618.7381	
CLIENTE	I	-60.00%	223.8390	-50.00%	279.7987	-15.00%	475.6578	559.5974	
COMPARTIDA	I	-60.00%	235.6671	-50.00%	294.5839	-15.00%	500.7926	589.1678	
Nota: El subsidio es aplicado hasta el consumo de subsistencia.									
TARIFAS RESIDENCIALES				TARIFAS NO RESIDENCIALES					
ESTRATO		5 y 6		COMERCIAL / INDUSTRIAL		ACUEDUCTOS. ESP		OFICIAL	
PROPIEDAD ACTIVOS	NIVEL MEDIDA	% CONTRIB.	TARIFA \$/kWh	CONTRIB. 20%	TARIFA \$/kWh	CONTRIB. 10%	TARIFA \$/kWh	TARIFA \$/kWh	
ESSA	I	20.00%	742.4858	123.7476	742.4858	61.8738	680.6119	618.7381	
CLIENTE	I	20.00%	671.5169	111.9195	671.5169	55.9597	615.5571	559.5974	
COMPARTIDA	I	20.00%	707.0013	117.8336	707.0013	58.9168	648.0845	589.1678	
	II			101.8167	610.9000	50.9083	559.9917	509.0833	
	III			83.8235	502.9408	41.9117	461.0290	419.1173	
	IV			77.1261	462.7567	38.5631	424.1936	385.6306	
COMPONENTES DEL COSTO UNITARIO VARIABLE Y FIJO DE PRESTACION DEL SERVICIO (CU) según Res. CREG 119/2007									
Conforme con las resoluciones CREG 180/14, 015/16 y 019/18 el valor (Cfm,j) que aplica para el mes de septiembre de 2021 es 7244.41 \$/factura									
NIVEL MEDIDA	G	T	D	Cv	PR	R	CÚv Calculado	CÚv Aplicado	CÚf Aplicado
	Compra Energía \$/kWh	Costo STN \$/kWh	Costo Distribución \$/kWh	Costo de Comercialización \$/kWh	Costo de Compra, transporte y reducción de pérdidas \$/kWh	Costo de Restricciones \$/kWh	Costo Unitario Variable de Prestación del Servicio \$/kWh	Resoluciones CREG 012 de 2020 y 152 de 2020 opción tarifaria \$/kWh	Costo Unitario Fijo de Prestación del Servicio \$/kWh
I ESSA	217.5000	36.9664	226.4309	62.4072	48.6388	37.0190	628.9624	618.7381	
I CLIENTE	217.5000	36.9664	165.2014	62.4072	48.6388	37.0190	567.7329	559.5974	
II	217.5000	36.9664	143.6615	62.4072	18.3977	37.0190	515.9519	509.0833	
III	217.5000	36.9664	62.3014	62.4072	13.8838	37.0190	430.0779	419.1173	
IV	217.5000	36.9664	26.4775	62.4072	8.9199	37.0190	389.2901	385.6306	
150%	217.5000	36.9664	195.8162	62.4072	48.6388	37.0190	598.3477	589.1678	
CONSUMO DE SUBSISTENCIA			Alturas inferior a 1000 Mts	Alturas superior o = a 1000 Mts					
Resolución UPME 0355 de 8 de Julio de 2004.			173 kWh	130 kWh					

Fuente: Tomada de (ESSA, 2021)