

DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA MEDICIÓN DE LA IRRADIANCIA SOLAR A PARTIR
DEL ARREGLO DE CELDAS SOLARES EN UNA SEMIESFERA.

ANDERSON FERNEY RODRÍGUEZ JIMÉNEZ
FELIPE MUÑOZ MOLINA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIAS ELÉCTRICA, ELECTRÓNICA
Y TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2016

DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA MEDICIÓN DE LA IRRADIANCIA SOLAR A PARTIR
DEL ARREGLO DE CELDAS SOLARES EN UNA SEMIESFERA.

ANDERSON FERNEY RODRÍGUEZ JIMÉNEZ
FELIPE MUÑOZ MOLINA

Trabajo de grado para optar por el título de ingeniero electrónico

Director

SAID DAVID PERTUZ ARROYO
Ingeniero Electrónico, Ph.D.

Codirectora

MARÍA ALEJANDRA MANTILLA VILLALOBOS
Ingeniera Electrónica, Ph.D.

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERIA FISICO-MECANICAS
ESCUELA DE INGENIERIAS ELECTRICA ELECTRONICA
Y TELECOMUNICACIONES
BUCARAMANGA

2016

DEDICATORIA

“A Dios por permitirme y brindarme grandes capacidades, que, aunque los obstáculos sean a veces más grandes siempre estará él y mi familia para alentarme a continuar.

A mis padres y mi bendición, Alicia Jiménez y Juan Rodríguez por su apoyo incondicional, por el amor, la fé y enseñanza a sus hijos en cada paso de sus vidas y a mi hermanito del alma Ricardito por creer en mí, porque quiero ser un ejemplo para su vida.

A mi princesa Alejandra Santiago de Rodríguez, mi novia, mi amiga, mi gran apoyo... porque presenciaste y estuviste en cada etapa de este proceso y fuiste mi confidente en todo momento.

A mis amigos los Peters, compañeros de lucha, perseverancia, dedicación e inolvidables aventuras.

Gracias a todos por hacer parte de este momento.”

ANDERSON FERNEY RODRÍGUEZ JIMÉNEZ

DEDICATORIA

“Principalmente a Dios por bendecir cada camino de mi vida y darme las capacidades necesarias para realizar satisfactoriamente este proyecto.”

Sin dudas, el apoyo de mi familia es uno de los baluartes para llegar al final, a mis padres Jaime Muñoz Valdés y María Yineth Molina Torres, y junto a mi compañía de siempre mi hermana Adriana Muñoz Molina.

A Karen Hoyos por brindarme su amor, su cariño, apoyo y compañía.

A mis compañeros y amigos que tuve durante estos años en la universidad.”

FELIPE MUÑOZ MOLINA

AGRADECIMIENTOS

a DIOS por permitirnos la culminación de este proyecto de vida.

A la UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER por brindar un espacio en el crecimiento de nuestra vida personal y profesional.

A nuestro director y codirectora por su apoyo y acompañamiento en el desarrollo de este proyecto.

A nuestras familias por su apoyo incondicional, por estar a nuestro lado animándonos y apoyándonos en este proceso... a dar este paso.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág.
INTRODUCCIÓN	20
1. OBJETIVOS.....	23
1.1 OBJETIVO GENERAL	23
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	23
2. MARCO TEÓRICO	24
2.1 MAPAS DE IRRADIANCIA SOLAR	24
2.2 CELDAS SOLARES.....	29
2.2.1 CARACTERIZACIÓN DE CELDAS SOLARES.....	29
2.2.2 EFICIENCIA DE CONVERSIÓN.....	31
2.3 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS (SAD).....	33
3. ANTECEDENTES	35
4. DISEÑO DEL PROTOTIPO	38
4.1 SELECCIÓN DE CELDA SOLAR	39
4.2 DISEÑO ESTRUCTURAL DEL DOMO.....	43
4.2.1 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE LAS CELDAS.....	45
4.3 MÓDULO DE SENSADO	49
4.3.1 DIODOS DE BLOQUEO	51
4.3.2 REGULADOR DE TENSIÓN.....	52

4.3.3	SENSADO DE TENSIÓN.....	52
4.3.4	MULTIPLEXOR ANALÓGICO.....	55
4.3.5	SENSADO DE CORRIENTE.....	60
4.4	DIGITALIZACIÓN Y TRANSMISIÓN	61
4.4.1	DIGITALIZACIÓN.....	61
4.4.2	TRANSMISIÓN	62
4.4.2.1	MÓDULO DE CONEXIÓN XBEE EXPLORER	63
4.4.2.2	MÓDULOS XBEE PRO XBP 24-AWI-001	63
4.4.2.3	CONFIGURACIÓN DE LOS MÓDULOS XBEE PRO	64
4.5	RECEPCIÓN Y ALMACENAMIENTO.....	65
4.5.1	RECEPCIÓN.....	66
4.5.2	ALMACENAMIENTO	66
4.6	COSTOS DE ELABORACIÓN DEL PROTOTIPO GENERAL	66
5.	PRUEBAS PRELIMINARES	69
5.1	PROTOTIPO EXPERIMENTAL 1	69
5.1.1	ESQUEMA GENERAL	70
5.1.2	ESQUEMA DEL DOMO PROTOTIPO 1	71
5.2	PROTOTIPO EXPERIMENTAL 2	72
5.2.1	ESQUEMA DEL DOMO PROTOTIPO 2.....	72
5.3	ESQUEMA DE CONEXIÓN GENERAL PARA LOS MODELOS EXPERIMENTALES.....	73
5.4	CARACTERIZACIÓN DE LA CELDA SOLAR.....	74
5.4.1	PRUEBA DE TEMPERATURA Y TENSIÓN.....	75

5.4.2	SELECCIÓN DE LA RESISTENCIA EN ZONA DESEADA	78
5.4.3	PRUEBA DE OBTENCIÓN DE CURVAS DE CORRIENTE VS TENSIÓN A PARTIR DE UN ARREGLO DE DIFERENTES VALORES DE RESISTENCIAS.....	79
5.4.4	CARACTERIZACIÓN DE TENSIÓN VS IRRADIANCIA CON 5,12 Ω	80
5.5	RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE IRRADIANCIA SOLAR A PARTIR DE LOS PROTOTIPOS EXPERIMENTALES 1 Y 2.....	83
5.5.1	PROTOTIPO EXPERIMENTAL 1	84
5.5.2	PROTOTIPO EXPERIMENTAL 2	86
5.5.3	COMPARACIÓN DE PROTOTIPOS EXPERIMENTALES 1 Y 2.....	90
6.	FUENTES DE ERROR	93
7.	ESTUDIO DE PATENTABILIDAD.....	94
8.	DISCUSIONES Y CONCLUSIONES	100
9.	RECOMENDACIONES.....	103
	CITAS.....	106
	BIBLIOGRAFÍA.....	112
	ANEXOS.....	113

LISTA DE FIGURAS

	Pág.
FIGURA 1. CURVA DE FRECUENCIA ACUMULADA (EJEMPLO)	25
FIGURA 2. DATOS DE IRRADIANCIA DURANTE DOS DÍAS EN JUNIO EN PRINCETON, NJ	26
FIGURA 3. MAPA PROMEDIO MULTIANUAL DE RADIACIÓN SOLAR EN COLOMBIA.....	28
FIGURA 4. EFECTO FOTOVOLTAICO CELDA SOLAR.....	29
FIGURA 5. CIRCUITO PARA DETERMINAR LAS CARACTERÍSTICAS DE UNA CELDA SOLAR	30
FIGURA 6. CURVAS CARACTERÍSTICAS CELDAS SOLARES. A) CURVA CORRIENTE-TENSIÓN (I-V) CELDAS SOLARES B) CORRIENTE Y POTENCIA EN FUNCIÓN DE LA TENSIÓN.....	30
FIGURA 7. PARÁMETROS DE LA EFICIENCIA DE CONVERSIÓN EN UNA CELDA SOLAR. A) EFECTO DE DIFERENTES RADIACIONES SOLARES. B) EFECTO DE LA TEMPERATURA EN CELDAS SOLARES.....	32
FIGURA 8. DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN SAD BÁSICO	33
FIGURA 9. ESQUEMA BÁSICO DEL DISEÑO DEL SISTEMA PROPUESTO.....	38
FIGURA 10. A) MONOCRISTALINA B) POLICRISTALINA C) AMORFA.....	39
FIGURA 11. CURVAS CARACTERÍSTICAS CELDA SOLAR KXOB22-12X1. A) CURVA CARACTERÍSTICA CORRIENTE-TENSIÓN-POTENCIA. B) TENSIÓN DE CIRCUITO ABIERTO VS TEMPERATURA. C) CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO VS TEMPERATURA. D) TENSIÓN DE CIRCUITO ABIERTO VS IRRADIANCIA.....	42
FIGURA 12. CORTE TRANSVERSAL DOMO EN SOLIDWORKS	43

FIGURA 13. DISEÑO DEL DOMO EN SOLIDWORKS	44
FIGURA 14. DISTRIBUCIÓN DE CELDAS SOLARES A LO LARGO (VISTA LATERAL DE CELDA SOLAR EN SU LADO MÁS LARGO .	45
FIGURA 15. CASOS DE DISTRIBUCIÓN DE CELDAS SOLARES. A) CASO 1: 8 LÍNEAS, CADA UNA DE 12 CELDAS UBICADAS A LO LARGO. B) CASO 2: 16 LÍNEAS, CADA UNA DE 12 CELDAS UBICADAS A LO LARGO. C) CASO 3: 8 LÍNEAS, CADA UNA DE 12 CELDAS UBICADAS A LO ANCHO	47
FIGURA 16. VISTA SUPERIOR CÚSPIDE DEL DOMO	47
FIGURA 17. MÓDULO DE SENSADO	50
FIGURA 18. INSTALACIÓN DIODO DE BLOQUEO.....	51
FIGURA 19. REGULADOR DE TENSIÓN	52
FIGURA 20. A) PARTE DELANTERA DE LA TARJETA ARDUINO UNO. B) PARTE POSTERIOR DE LA TARJETA ARDUINO UNO.	53
FIGURA 21. ADECUACIÓN DE MULTIPLEXORES PARA TODAS LAS CELDAS SOLARES UTILIZADAS EN EL CASO 1	58
FIGURA 22. ADECUACIÓN DE MULTIPLEXORES PARA TODAS LAS CELDAS SOLARES UTILIZADAS EN EL CASO 2.....	59
FIGURA 23. ZONA DESEADA CURVA CORRIENTE VS TENSIÓN	60
FIGURA 24. MÓDULO DE DIGITALIZACIÓN Y TRANSMISIÓN.....	61
FIGURA 25. MÓDULO DE CONEXIÓN XBEE EXPLORER	63
FIGURA 26. MÓDULOS XBEE PRO S1, TRANSMISOR Y RECEPTOR.....	64
FIGURA 27. MÓDULO DE DIGITALIZACIÓN Y TRANSMISIÓN.....	65
FIGURA 28. IMAGEN PROTOTIPO EXPERIMENTAL DE 5 CELDAS	69
FIGURA 29. MONTAJE GENERAL DE MEDICIÓN DEL PROTOTIPO 1.....	70
FIGURA 30. ESQUEMA GENERAL DE MEDICIÓN DEL PROTOTIPO 1.....	71
FIGURA 31. ESQUEMA DEL DOMO PARA EL PROTOTIPO 1	71

FIGURA 32. IMAGEN PROTOTIPO EXPERIMENTAL DE 5 CELDAS	72
FIGURA 33. ESQUEMA DEL DOMO PARA EL PROTOTIPO 2	73
FIGURA 34. ESQUEMA CONEXIÓN GENERAL.....	74
FIGURA 35. A) TENSIÓN DE CIRCUITO ABIERTO VS IRRADIANCIA DIA MIERCOLES. B) TENSIÓN DE CIRCUITO ABIERTO VS IRRADIANCIA DÍA JUEVES C) TENSIÓN DE CIRCUITO ABIERTO VS TEMPERATURA DÍA MIERCOLES. D) TENSIÓN DE CIRCUITO ABIERTO VS TEMPERATURA DÍA JUEVES.....	74
FIGURA 36. A) GRÁFICA IRRADIANCIA VS TIEMPO. B) GRÁFICA TEMPERATURA VS TIEMPO. C) GRÁFICA TENSIÓN VS TIEMPO	77
FIGURA 37. CIRCUITO PARA MEDICIÓN CARACTERIZACIÓN CURVAS DE IRRADIANCIA	79
FIGURA 38. CURVAS CORRIENTE VS TENSIÓN A DIFERENTES VALORES DE IRRADIANCIA	80
FIGURA 39. ESTACIÓN METEOROLÓGICA DAVIS VANTAGE PRO2.....	81
FIGURA 40. CARACTERIZACIÓN TENSIÓN-CORRIENTE VS IRRADIANCIA...	82
FIGURA 41. TEMPERATURA VS IRRADIANCIA.....	83
FIGURA 42. DISTRIBUCIÓN CELDAS SOLARES PROTOTIPO EXPERIMENTAL 1	84
FIGURA 43. GRÁFICAS DE IRRADIANCIA VS TIEMPO PRUEBA PROTOTIPO 1	85
FIGURA 44. DISTRIBUCIÓN CELDAS SOLARES PROTOTIPO EXPERIMENTAL 2	87
FIGURA 45. IRRADIANCIA VS TIEMPO PRUEBA PROTOTIPO 2	88
FIGURA 46. SIMULACIÓN EN MATLAB OBTENCIÓN DEL ESPECTRO	

O IRRADIANCIA SOLAR RESPECTO AL TIEMPO	89
FIGURA 47. CURVAS CARACTERÍSTICAS IDEALES DE COMPORTAMIENTO DE IRRADIANCIA.	
A) PROTOTIPO EXPERIMENTAL 1.	
B) PROTOTIPO EXPERIMENTAL 2.	90
FIGURA 48. PIRANÓMETRO PLANO FOTOVOLTAICO	94
FIGURA 49. SENSOR DE IRRADIACIÓN “KACO”	95
FIGURA 50. PROYECTO SOLARÍMETRO GRUPO GIDER	96
FIGURA 51. PROYECTO SUNROOF DE GOOGLE	97

LISTA DE TABLAS

	Pág.
TABLA 1. COMPARACIÓN CARACTERÍSTICAS DIFERENTES TIPOS DE CELDAS SOLARES	40
TABLA 2. DATOS TÉCNICOS CELDA SOLAR KXOB22-12X1.....	41
TABLA 3. CARACTERÍSTICAS DE LOS 3 CASOS PLANTEADOS.....	48
TABLA 4. ESPECIFICACIONES TÉCNICAS TARJETA ARDUINO UNO	54
TABLA 5. CARACTERÍSTICAS MUX/DEMUX 74HC4067 Y HEF4051B	56
TABLA 6. CARACTERÍSTICAS MUX/DEMUX SELECCIONADO HCF4051BE.....	57
TABLA 7. RECOMENDACIONES DE OPERACIÓN MUX/DEMUX HCF4051BE...57	57
TABLA 8. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS MÓDULOS XBEE PRO S1.....	64
TABLA 9. COSTOS DISEÑO PROTOTIPO EXPERIMENTAL DE 5 CELDAS.....	67
TABLA 10. DISEÑO PROPUESTO CASO 1 (SECCIÓN 4.2.1, FIGURA 10A).....	68
TABLA 11. DISEÑO PROPUESTO CASO 2 (SECCIÓN 4.2.1, FIGURA 10B).....	68
TABLA 12. PORCENTAJE DE ERROR PRUEBAS REALIZADAS.....	92

LISTA DE ANEXOS

	Pág.
ANEXO 1. CÓDIGO SENSADO DE TENSIÓN CON INTERFAZ DE EXCEL Y PLX DAQ	113
ANEXO 2. CÓDIGO UTILIZADO PARA LA PROGRAMACIÓN DEL MULTIPLEXOR	114
ANEXO 3. TABLA CARACTERIZACIÓN TENSIÓN VS IRRADIANCIA	115

RESUMEN

TITULO: DISEÑO DE UN SISTEMA PARA LA MEDICIÓN DE LA IRRADIANCIA SOLAR A PARTIR DEL ARREGLO DE CELDAS SOLARES EN UNA SEMIESFERA.*

AUTORES: ANDERSON FERNEY RODRÍGUEZ JIMÉNEZ, FELIPE MUÑOZ MOLINA.**

PALABRAS CLAVES: USO RACIONAL DE LA ENERGÍA (URE) Y ENERGÍAS RENOVABLES (ER).

DESCRIPCIÓN:

La irradiancia solar es la magnitud utilizada para describir la densidad de potencia de radiación solar incidente en una superficie, expresada en watts por metro cuadrado. El estudio y la medición de la irradiancia solar son importantes en aplicaciones relacionadas con el uso de energías alternativas. Existen diversas técnicas y dispositivos de medición de la radiación solar, como los piranómetros, la generación de mapas de radiación basados en elementos fotovoltaicos, mediante aplicaciones GPS, o sistemas de información geográfica. Las principales limitaciones de estas alternativas son la eficiencia, altos costos de instalación e implementación, la necesidad de sistemas de control, alto consumo de energía, complejos diseños, limitantes ambientales y asequibilidad, entre otros. En este trabajo, se ha diseñado un prototipo de medición para obtener los datos de irradiancia solar de un lugar determinado. El equipo está formado por un arreglo de celdas solares monocristalinas sobre una semiesfera, un sistema de adquisición de datos y un sistema de transmisión. El prototipo permite determinar los valores de irradiancia solar incidente en un arreglo de celdas solares fotovoltaicas distribuidas en una semiesfera en diferentes inclinaciones y orientaciones. Los valores de la irradiancia incidente en cada celda se miden a través de la corriente de cada celda solar. Estas medidas son transmitidas a una computadora (usuario o destino) mediante dos módulos de comunicación Xbee (transmisor y receptor) basados en el protocolo de red IEEE 802.15.4, para su visualización y análisis. Este documento describe las especificaciones del diseño y funcionamiento del dispositivo, las pruebas preliminares realizadas y los resultados obtenidos. Dentro de las características de este dispositivo cabe resaltar que, a diferencia de las alternativas existentes en el estado del arte, este dispositivo tiene la ventaja de ser autónomo, permitir fácilmente la transmisión de los datos, fácil instalación, cuenta con diferentes sistemas de alimentación.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica Electrónica y Telecomunicaciones. Director: Said David Pertuz Arroyo. Codirectora: María Alejandra Mantilla Villalobos

ABSTRACT

TITLE: A PROTOTYPE FOR THE MEASUREMENT OF SOLAR IRRADIANCE ON A SPECIFIC LOCATION*

AUTHORS: ANDERSON FERNEY RODRIGUEZ JIMENEZ, FELIPE MUÑOZ MOLINA**

KEYWORDS: RATIONAL USE OF ENERGY (URE) and RENEWABLE ENERGY (ER)

DESCRIPTION:

Solar irradiance is the magnitude used to describe the power density of solar radiation incident on a surface, expressed in Watts per square meter. The study and measurement of solar irradiance are important in applications related to the use of alternative energies, such as in the design of Solar Parks. There are diverse technologies and devices and techniques for measuring solar radiance, such as radiometers, the generation of maps of radiation based on photovoltaic elements, GPS applications, or geographic information systems. The principal limitations of these alternatives are the efficiency, high installation and implementation costs, the need for control systems, high-energy consumption, complex designs, environmental barriers, and affordability, among others. In this work, a prototype has been designed to estimate the spatial distribution of the solar radiance on a specific location. The device consists of a cell array of mono-crystalline solar cells on a dome (semi-sphere), a data acquisition system, and a communication system. The prototype can determine the values of solar irradiance incident in an array of solar photovoltaic cells arranged on a dome at different inclinations and orientations. Values of incident irradiance in each cell is measured indirectly by measuring the current of each solar cell. Subsequently, the data are transmitted to a computer (user or destination) for display and analysis. The transmission is carried out through two Xbee communication modules (transmitter and receiver) based on the IEEE 802.15.4 network protocol. This document describes the specifications for the design and operation of the device as well as the results of the preliminary tests. Compared to alternatives existing in the state-of-the-art, this device has the following advantages: standalone operation, ease of data transmission, robustness to changing weather conditions, ease of installation, different power supply options.

* Degree Work

** Faculty of Physical – Mechanics Engineering. Electrical, electronic and telecommunication. Director Dr. Said David Pertuz Arroyo

INTRODUCCIÓN

La energía solar es una fuente primordial de suministro energético y para aprovechar su potencial se han desarrollado diversas maneras de lograrlo [1]. La energía solar es aquel tipo de energía que se puede captar directamente de la radiación solar y puede ser utilizada en dos formas fundamentales: mediante el aprovechamiento del calor que se obtiene con la conversión térmica [2] y mediante el aprovechamiento de la luz solar que se obtiene mediante la conversión fotovoltaica [2], siendo esta última la idea central en este trabajo.

Actualmente los avances tecnológicos en el área del aprovechamiento de la radiación solar han permitido llegar al punto de poder aprovechar la energía solar mediante la conversión fotovoltaica con células o celdas solares, que básicamente captan la luz solar y la convierten en energía eléctrica [3]. En este contexto, el análisis del comportamiento espacial y temporal de las horas de sol es fundamental para la estimación de la radiación solar en lugares que aún no cuentan con datos de irradiación solar. A su vez, esta información es necesaria para el dimensionamiento de sistemas que a partir de la energía solar permiten el abastecimiento de energía eléctrica con el fin de satisfacer diversos requerimientos como iluminación, comunicaciones, señalización, suministro de calor, y para el diseño de edificaciones confortables y energéticamente eficientes, entre otras. Es posible realizar una medida de la cantidad de radiación recibida durante un determinado periodo ya sea diario, mensual o anual en un punto cualquiera para obtener un mapa de actividad solar. A este proceso, nos referimos como *mapeo de la irradiancia solar*. La irradiancia es una medida de densidad de potencia, que en el sistema métrico internacional las unidades serán W/m^2 (vatio por metro

cuadrado). Esta radiación se mide horizontalmente sobre la superficie de la tierra [4].

En la literatura, los mapas de radiación solar se elaboran a partir de mediciones vía satélite o a partir de los datos obtenidos en las principales zonas y raras veces se tienen en cuenta los niveles de radiación solar con suficiente detalle a nivel de pequeñas zonas geográficas [5]. Estos datos tienen cierta incertidumbre dependiendo de la tecnología que se emplea. Además, la mayoría de datos están referidos a grandes extensiones de territorio, por lo que su uso se hace limitado y poco práctico en algunos casos [5]. Esta limitación puede conducir a realizar un mal diseño de los equipos de aprovechamiento de la radiación solar. Esta limitación en el proceso de diseño puede tener graves consecuencias en lo que respecta a costos de inversión, operación o mantenimiento, precisión en la adquisición de datos, así como la sostenibilidad de los sistemas cuando ellos no cumplen con el fin para el cual fueron instalados.

El presente proyecto de investigación tiene como propósito estudiar la conversión fotovoltaica con celdas solares y diseñar un sistema que permita sensar la irradiancia solar en un punto específico. El sistema diseñado debe permitir la captura de datos/medidas de irradiancia solar en cualquier zona geográfica según la orientación e inclinación de las celdas solares. Para este proyecto en particular, la validación experimental se limitará a la zona metropolitana de Bucaramanga-Santander, Colombia. La idea principal es tomar los datos proporcionados por las celdas solares, almacenarlos y organizarlos para su posterior análisis.

Este documento está dividido en varias secciones, en la segunda sección se abordarán los estudios y avances anteriores referentes al proyecto, luego en la sección III se encuentra el diseño del sistema o prototipo, presentando en primer

lugar las celdas solares utilizadas, también se da a conocer el diseño del domo, el módulo de sensado que comprende sensado irradiancia describiendo el método de la adquisición de la tensión y corriente tomada de las celdas solares, junto a la estimación de la potencia e irradiancia solar. Luego se muestra la digitalización y transmisión de los datos que se manipulan en el sistema, así como su recepción y almacenamiento con un software en específico, llegando finalmente en esta sección a presentar el estudio de costos de materiales y elaboración del estado final del diseño y del prototipo de medición. En la sección cinco (5) se describe las distintas pruebas preliminares que se realizaron al prototipo experimental basado en 5 celdas, la respectiva caracterización de la celda solar, los resultados de la medición de irradiancia solar y finalmente las fuentes de error para el diseño planteado. La sección siete (7) muestra la base bibliográfica que fundamenta teóricamente la opción de que este diseño en específico sea patentable al realizarse la implementación y finalmente en la secciones ocho (8) y nueve (9) se enuncian las conclusiones, discusiones y recomendaciones de este documento.

El fundamento teórico sobre conceptos de energía solar fotovoltaica, celdas solares, medición de la irradiancia solar, sistema fotovoltaico y sistema de adquisición de datos, se conocen y son utilizados para cada una de éstas secciones siendo de gran importancia en el desarrollo del diseño.

1. OBJETIVOS

1.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar un sistema para la medición de la irradiancia solar en función del tiempo a partir de un arreglo de celdas solares en una semiesfera.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

El cumplimiento del objetivo general del trabajo de grado comprende:

- Realizar el estudio de las celdas solares que harán parte del diseño del sistema propuesto en este documento, especificando criterios y parámetros de selección.
- Diseñar un sistema basado en celdas solares que permitirá la obtención de datos, con el fin de plasmar gráficamente la distribución de la radiación solar en cualquier zona geográfica.
- Seleccionar los componentes que harán parte del diseño.
- Evaluar la patentabilidad del diseño.
- Elaborar un documento final con el resumen del trabajo, los análisis y los detalles del diseño.

2. MARCO TEÓRICO

En esta sección se describen los fundamentos teóricos necesarios para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto de investigación, el cual se divide en tres partes principales que son: información sobre mapas de irradiancia solar, celdas solares y sistema de adquisición de datos.

2.1 MAPAS DE IRRADIANDIA SOLAR

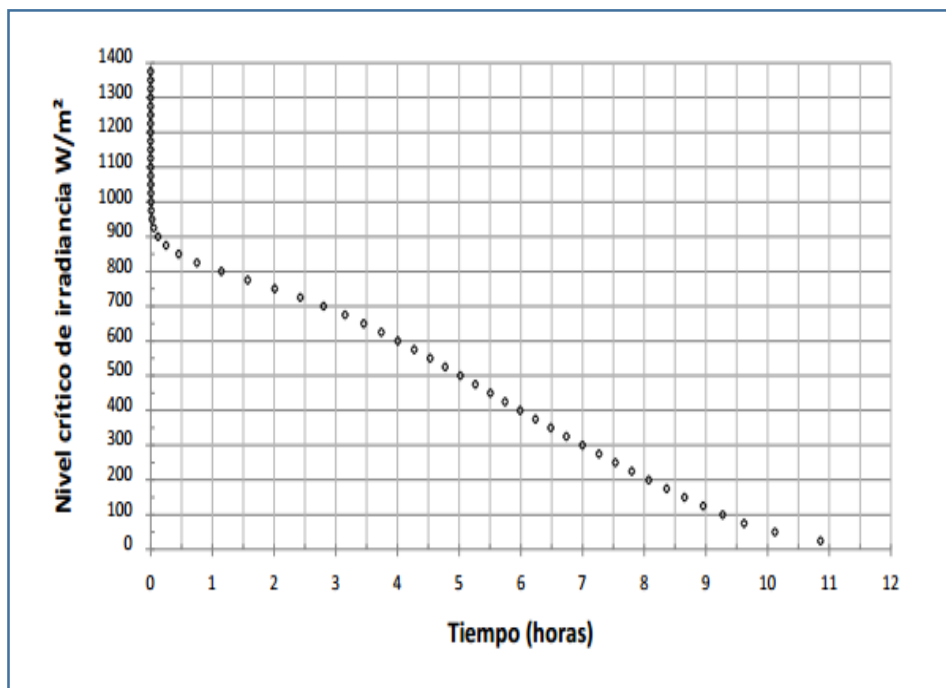
La estimación de la energía solar disponible de cierto lugar, de una forma estadística, se puede realizar a partir de las curvas de frecuencia acumulada de la irradiancia solar global promedio durante al menos un ciclo climatológico. Las curvas de frecuencia acumulada se definen como aquellas que representan la frecuencia, en términos del número de horas promedio, con la que la irradiancia global incidente es mayor o igual a cierto nivel crítico I_c [6].

Para construir las curvas de frecuencia acumulada de la irradiancia se parte de la siguiente manera:

Los valores máximos de irradiancia esperados no superan los 1400 (W/m^2) en superficie. Este rango de energía (0-1400 W/m^2) se subdivide en niveles críticos de acuerdo con el interés práctico que se tenga para el aprovechamiento de la energía solar. Una vez hecha esta subdivisión, se procede a contar el número de veces que la irradiancia, minuto a minuto, se ubicó dentro de los intervalos de los niveles críticos. Con el resultado de éste cálculo, las curvas de frecuencia acumulada (CFA), para cada mes del año y para el sitio de observación, se representan en una

gráfica donde la ordenada es el eje de la irradiancia (W/m^2 .) subdividido en tantos intervalos como niveles críticos se tengan y la abscisa es el eje en donde se representa el tiempo en que la irradiancia se ubicó dentro del intervalo del nivel crítico a lo largo del día, durante periodos de 1 minuto desde que sale el Sol hasta que se oculta [6]. Ver figura 2.

Figura 1. Curva de Frecuencia Acumulada (ejemplo)



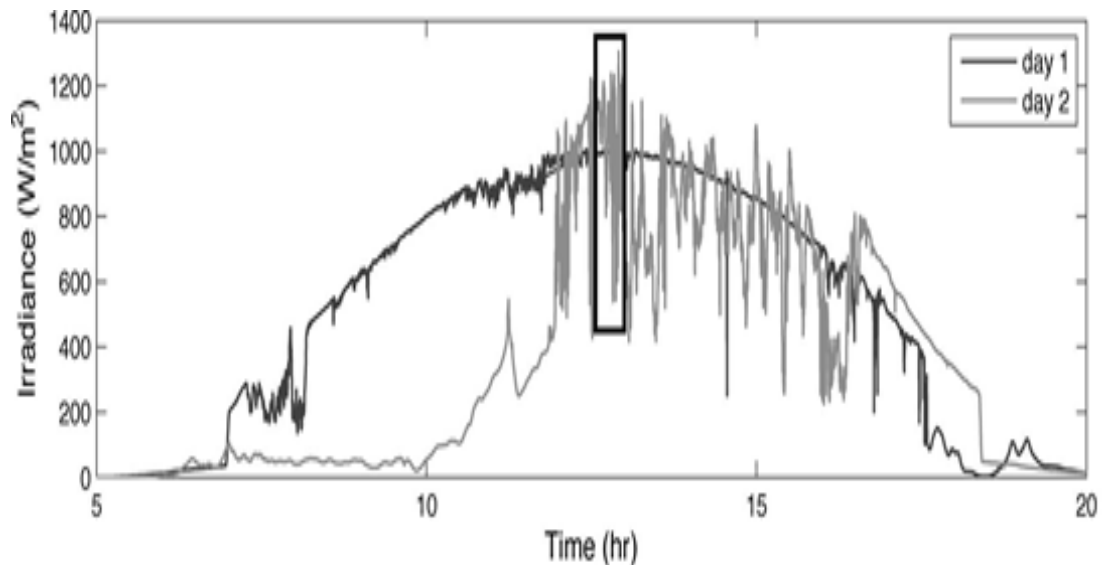
Fuente: Geofísica UNAM, 2015 [7]

En la figura 1 se muestran unos datos de irradiancia durante dos días consecutivos en junio de 2007. Los datos fueron medidos en un techo del cuadrilátero de ingeniería en la Universidad de Princeton. Irradiación es más errática en el segundo día debido al cambio rápido por la nubosidad dispersa. La parte inferior de la figura 3 proporciona una vista detallada de los datos de irradiancia sobre una ventana de 25 min entre las 12:34 y 12:59 A.M., de 20 de junio de 2007 (día 2). Este intervalo

de tiempo es elegido porque incluye cambios de irradiancia rápido, y en una ventana de 25-min es posible ver la respuesta del controlador para cambios de irradiancia individuales.

Es útil considerar la respuesta dinámica de cada método a paso de varios cambios en la irradiancia. Además de representar a una peor, los cambios de irradiancia de paso proporcionan una distorsión controlada para comparar los resultados del seguimiento de cada método [6].

Figura 2. irradiancia durante dos días en junio Datos de en Princeton, NJ



Fuente: Steven L. Brunton, Clarence W. Rowley, Sanjeev R. Kulkarni, Fellow, IEEE, and Charles Clarkson, 2010 [6]

Luego a partir de la información que se encuentra en estas curvas (figura2), se asocia a locaciones espaciales de tal forma que las medidas promediadas tomadas representan la variación de la irradiancia solar en un determinado punto dentro de la geografía; Esto es pasar de una medida de W/m^2 (vatio por metro cuadrado) en

la mayoría de los casos, a una representación en diferentes tipos de colores y tonalidades como se puede observar en la figura 4.

En Colombia, la información disponible sobre irradiancia solar es el resultado de una sinergia entre el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios ambientales, IDEAM, y la Unidad de Planeación Minero Energética, UPME, que aportan sus recursos técnicos y administrativos dentro de un convenio, firmado en diciembre del año 2002, para desarrollar actividades conjuntas a fin de favorecer el desarrollo y aprovechamiento de las fuentes de energía alternativas y renovables en Colombia.

El primer resultado del convenio se obtuvo con la elaboración y publicación de una segunda versión del Atlas de Radiación Solar de Colombia.

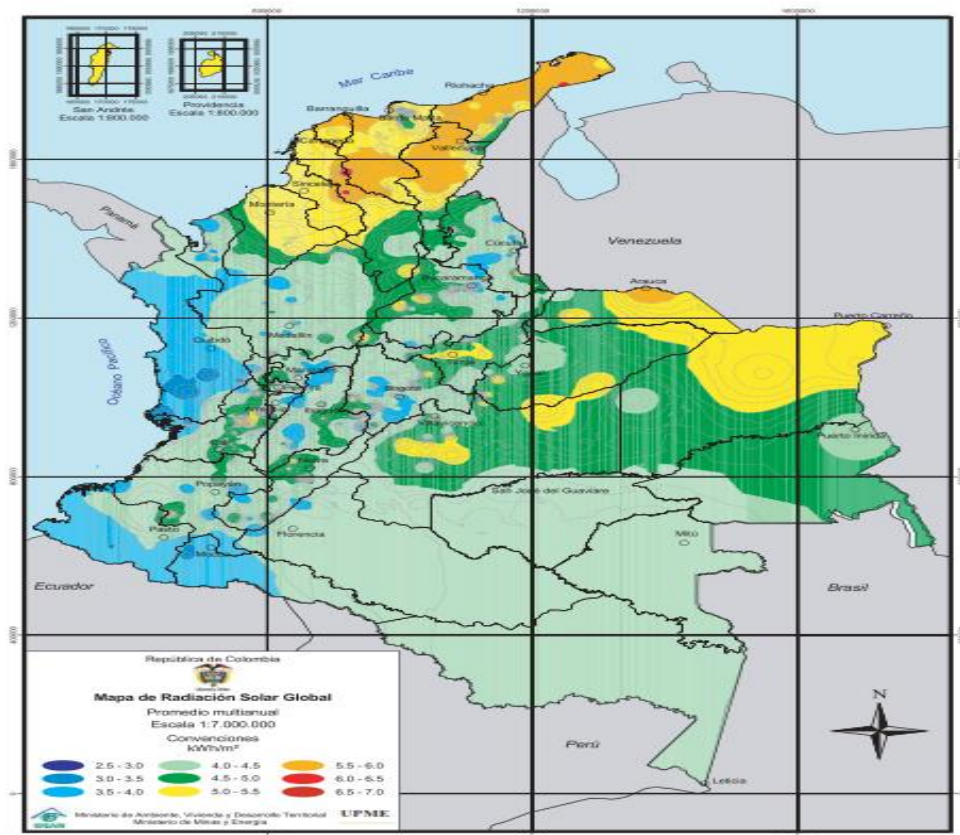
El valor suministrado corresponde al número de horas que en promedio durante un día de cada mes o año se puede el Sol observar en el cielo. Con relación a los trabajos anteriores, los nuevos mapas han permitido una mayor resolución y calidad con una escala de (1:7.000.000) aunque todavía en una forma macro por tal caso en zonas puntuales la información puede variar, debido al incremento y mejoras de la información base, teniendo en cuenta principalmente elementos de la topografía del país, lo cual se puede observar en el comportamiento de las isosuperficies que reflejan la existencia de la cordillera andina [8].

Una colección de 13 mapas – uno para cada mes del año y uno promedio anual (mapa tomado como ejemplo), ilustra una aproximación de promedios anuales, diarios de la cantidad de energía de radiación solar que incide por metro cuadrado de superficie horizontal sobre el territorio colombiano.

Es conveniente advertir que no es recomendable utilizar la información en zonas de alta montaña donde no se poseen mediciones directas. La medida a la intensidad se indica en el mapa mediante convenciones de colores desde el azul oscuro hasta el rojo oscuro. La unidad de la energía utilizada corresponde al kilovatio hora (equivalente a 3600 kilo-julios). En estos mapas se observa la influencia de las cordilleras y de las zonas planas, encontrándose que la distribución de los rangos de valores de la radiación solar refleja la existencia de las cordilleras.

A manera de ejemplo la figura 3, muestra uno de los 13 mapas a los que se tienen acceso, este es el promedio final de todos los meses del año [9].

Figura 2. Mapa promedio multianual de radiación solar en Colombia

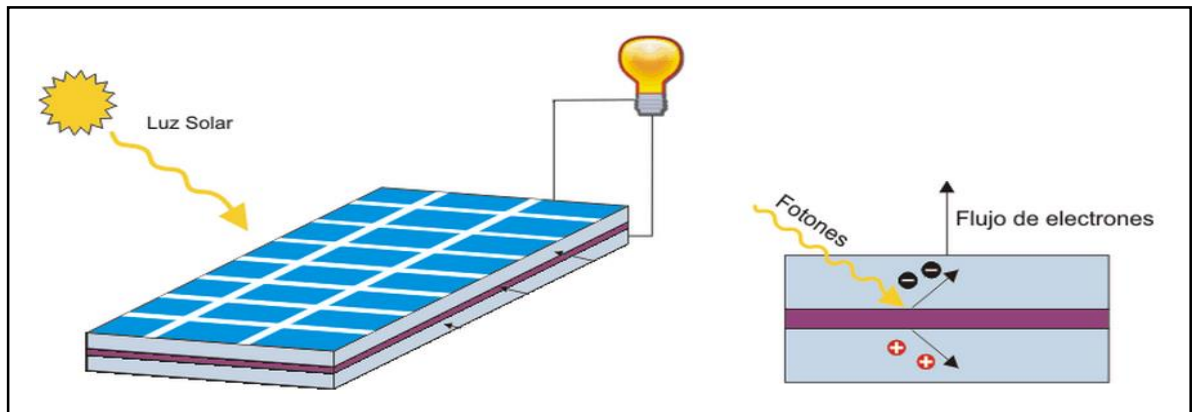


Fuente: Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, 2005 [9]

2.2 CELDAS SOLARES

Las celdas solares son dispositivos en los que la luz del sol libera cargas eléctricas para que se puedan mover libremente en un semiconductor y fluir en última instancia, a través de una carga eléctrica, tal como una bombilla o un motor. El fenómeno de la inducción de corrientes eléctricas por efectos de la luz se conoce como el efecto fotovoltaico [10]. La conversión de energía fotovoltaica en las celdas solares se compone de dos pasos esenciales: Absorción de la luz y generación de energía eléctrica [11]. El efecto fotovoltaico, consiste en convertir la luz solar en electricidad y se produce en materiales conocidos como semiconductores. La conductividad de estos materiales puede ser modificada para generar una corriente eléctrica con cargas negativas, positivas o ambas [12]. Ver figura 4.

Figura 3. Efecto fotovoltaico celda solar

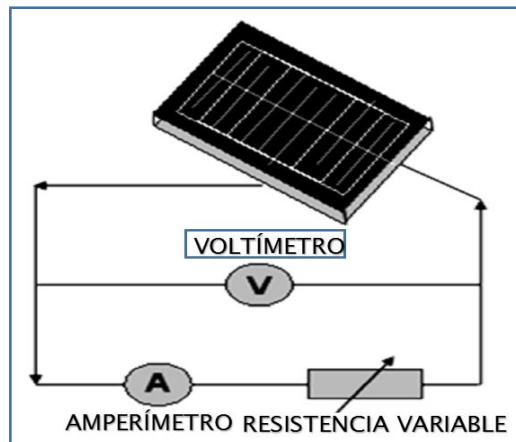


Fuente: Textos científicos, 2015 [13]

2.2.1 Caracterización de celdas solares. La forma como generalmente se determina el funcionamiento de una celda solar es a través de medidas de la corriente en función del voltaje de polarización, tanto bajo condiciones de iluminación como en oscuro. Parámetros tales como corriente de cortocircuito (I_{sc}),

voltaje de circuito abierto (V_{oc}), resistencia serie (R_s), eficiencia (η) y otros, pueden ser obtenidos de tales medidas. A partir del conocimiento de estos parámetros, se puede tener información relacionada con los factores que afectan la corriente y el voltaje de los dispositivos [14]. De otro lado, sistemas de medida de la característica I-V permiten hacer en forma automática un diagnóstico rápido y confiable del comportamiento de los módulos fotovoltaicos en un determinado proceso [15]. Las principales características se obtienen a partir de un circuito básico como se muestra en la figura 5.

Figura 4. Circuito para determinar las características de una celda solar

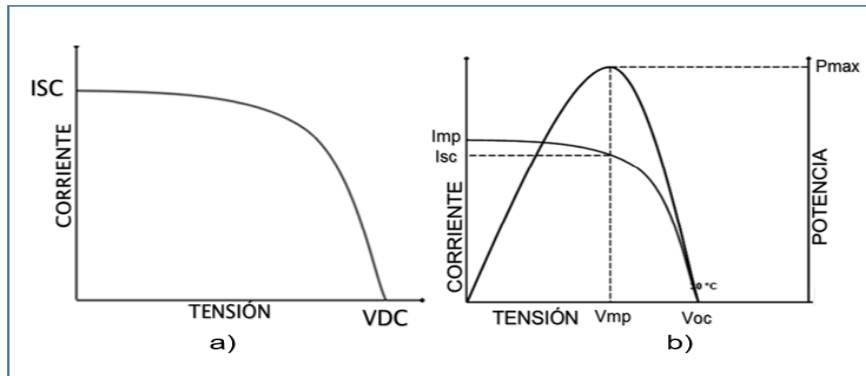


Fuente: USAC TRICENTENARIA universidad de San Carlos de Guatemala, 2012 [16]

La respectiva curva I-V (corriente- tensión) puede ser obtenida exponiendo la celda solar a una radiación solar constante y midiendo la corriente de cortocircuito (I_{sc}) y el voltaje (VDC) correspondiente a través de la celda. Ver figura 6a. Otra característica fundamental es la tensión de circuito abierto (V_{oc}) que junto a la corriente de corto circuito (I_{sc}) permiten calcular la potencia producida por una celda solar que depende del punto de operación a lo largo de la curva I – V (corriente-tensión). Ver figura 6b.

Cada celda bajo cierta radiación solar y una temperatura ambiente, tiene sus propios valores para I_{sc} y V_{oc} . [16]

Figura 6. Curvas características celdas solares. a) Curva corriente-tensión (I-V) celdas solares, b) Corriente y potencia en función de la tensión



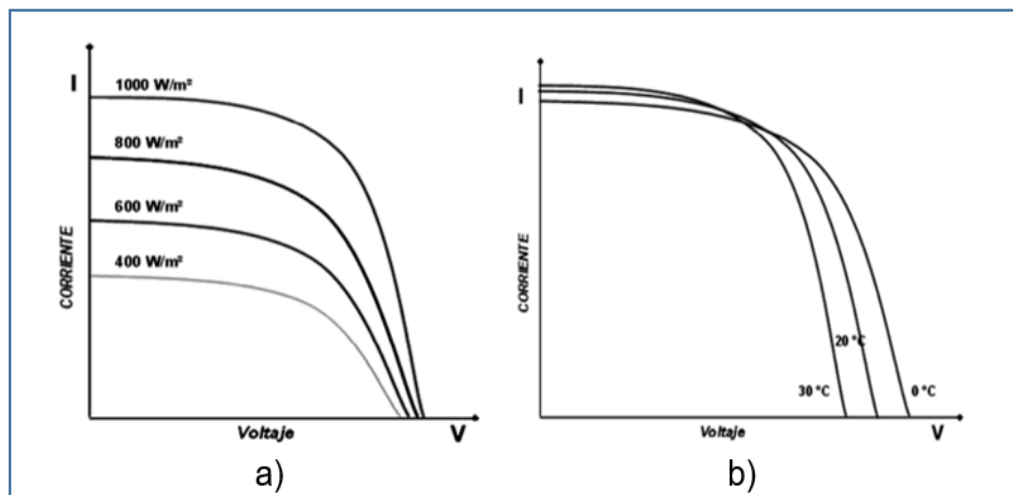
Fuente: USAC TRICENTENARIA universidad de San Carlos de Guatemala, 2012 [16].

En la figura 6b se puede observar que solamente en un punto a lo largo de la curva I-V se produce la máxima potencia ($P_{m\acute{a}x}$) respecto a valores correspondientes de corriente y voltaje llamados I_{mp} y V_{mp} . En el diseño de sistemas fotovoltaicos es importante asegurarse que las celdas solares operen en el punto en el cual se obtiene la máxima potencia, con el fin de usar esta información para ajustar de manera dinámica y en tiempo real, la carga para que se transfiera siempre la máxima potencia posible, a pesar de las variaciones de incidencia de luz que se produzcan [16].

2.2.2 Eficiencia de conversión. Es una de las principales características de las celdas solares, la cual indica la cantidad de energía solar que la celda es capaz de convertir a energía eléctrica. La eficiencia de conversión es afectada principalmente, por la intensidad de luz y la temperatura.

La intensidad de la radiación solar recibida por las celdas solares no suele ser constante. La salida de una celda solar bajo diferentes intensidades de luz se muestra en la figura 7a. Cabe notar que el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) se mantiene casi constante y no cambia con la intensidad de la luz, pero la corriente de cortocircuito (I_{sc}) varía casi linealmente con la radiación recibida. [16]

Figura 7. Parámetros de la eficiencia de conversión en una celda solar a) Efecto de diferentes radiaciones solares. b) Efecto de la temperatura en celdas solares



Fuente: USAC TRICENTENARIA universidad de San Carlos de Guatemala, 2012 [16]

Las celdas solares están expuestas por lo general a temperaturas diferentes. Para estudiar la eficiencia de una celda solar en diferentes ambientes, es esencial tomar en cuenta el efecto de la temperatura.

Generalmente, el voltaje de circuito abierto (V_{oc}) decrece con el incremento de la temperatura y la corriente de cortocircuito (I_{sc}) se incrementa levemente como se muestra en la figura 7b. [16]

2.3 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS (SAD)

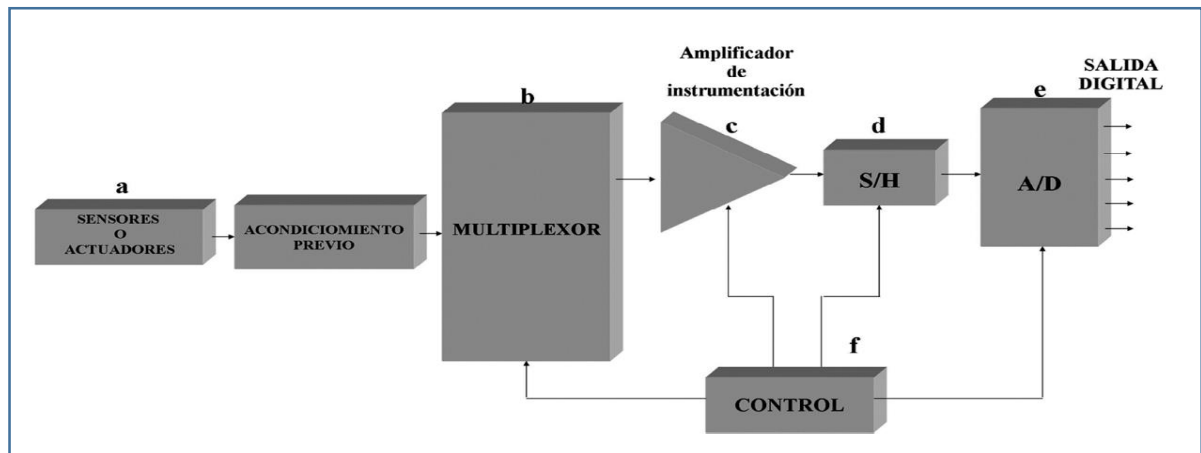
En la actualidad, el desarrollo de la electrónica ha permitido la creación de sistemas inteligentes capaces de resolver los problemas respecto al monitoreo y control de procesos, llamados sistemas de adquisición de datos.

Un SAD es un equipo que permite tomar señales físicas del entorno y convertirlas en datos que se pueden procesar, obtenidos básicamente de dos maneras:

- A partir de la medición directa de cantidades eléctricas, que pueden incluir voltajes de corriente directa (cd) y alterna (ca), frecuencia, resistencia entre otras.
- Señales que se originan directamente de transductores, como galgas extensiométricas y termopares entre otros. [16]

Un Sistema de Adquisición de Datos no es más que un equipo electrónico cuya función es el control o simplemente el registro de una o varias variables de un proceso cualquiera, como ejemplo una estructura general se observa en la figura 8.

Figura 8. Diagrama de bloques de un SAD básico



Fuente: USAC TRICENTENARIA universidad de San Carlos de Guatemala, 2012 [16]

El SAD mostrado en la figura 9 se compone de los siguientes elementos:

- Sensores o transductores: Convierten la variable física a medir en señal eléctrica, por lo general requiere de un acondicionamiento previo.
- Multiplexor: Selecciona la señal de entrada que va a ser tratada. En el caso de varias señales.
- Amplificador de instrumentación: Amplifica la señal de entrada del SAD para acoplarse al convertidor A/D (ADC) consiguiendo de esta forma la máxima resolución.
- S&H (*Sample & Hold*, muestreo y retención): Toma la muestra del canal seleccionado (*sample*) y la mantiene (*hold*) durante el tiempo que dura la conversión. Por lo general los ADC ya contienen este módulo.
- ADC (Convertidor A/D): Realiza la conversión analógica/digital, proporcionando un código digital de salida que representa el valor de la muestra adquirida en cada momento.
- Control: Circuito encargado de controlar todo el flujo de datos entre los distintos bloques incluyendo la temporización de las conversiones del bloque A/D (ADC). Como ejemplo los microcontroladores.

Además, un SAD se caracteriza por los siguientes parámetros, que son básicamente: Número de canales que depende del número de señales a adquirir, Exactitud de la conversión que viene dada por los circuitos utilizados, es decir, multiplexores, amplificadores, muestreo-retención (S/H) y ADC y finalmente la velocidad de muestreo (*throughput rate*) que especifica la velocidad a la que el SAD puede adquirir y almacenar muestras de las entradas. Las muestras pertenecerán a un único canal o a varios, según la configuración [16].

3. ANTECEDENTES

Para el caso específico de la energía solar, la estimación de la irradiancia en una zona determinada es de vital importancia para su efectivo aprovechamiento. Estudiar éste comportamiento en un lugar determinado juega un papel primordial en el diseño de sistemas para el uso de la energía solar. Años atrás estos estudios se realizaban de forma manual; donde las bases de datos se obtenían por un operario o usuario que observaba el proceso y registraba las mediciones, es decir, no se contaba con un sistema de adquisición de datos no se contaba con una automatización del proceso, que eliminará la actividad presencial del sujeto a tiempo completo para realizar estas acciones [17]. En la actualidad estos procesos de observación han avanzado y han sido automatizados, llegando a modelos o dispositivos capaces de realizar un seguimiento autónomo de la radiación solar, estaciones meteorológicas completas con transmisión de datos y medición de diversas variables atmosféricas, prototipos basados en sistemas de control y automatizados donde solo se requiere la presencia de una persona parcialmente, donde existen bases de datos a partir de procesos más eficientes, más confiables y además existe una variada gama de dispositivos enfocados en procesos de medición de la irradiancia solar desde un solarímetro casero hasta prototipos más complejos y costosos [18]. Por ejemplo, actualmente la Universidad Industrial de Santander y algunas de sus sedes cuentan con estaciones meteorológicas que permiten obtener datos de irradiancia solar, basados en sistemas fotovoltaicos (FV) que miden la radiación en la superficie horizontal y cuentan con un sistema de adquisición y transferencia de datos. Pero gran parte de estos dispositivos miden la radiación solar en un plano horizontal, aunque existen otros basados en superficies inclinadas, perpendiculares a la intensidad solar y algunos prototipos curvos por ejemplo los basados en esferas de cristal que enfocan en mayor proporción los rayos solares hacia una superficie plana o panel solar [18]. A nivel mundial, las

adquisiciones de estos datos se realizan vía satélite (actinógrafos) y también a partir de información meteorológica ya disponible, pero carecen de una buena resolución en zonas denominadas no interconectadas (ZNI) donde la mayoría de los sistemas se basan también en la medición de la radiación solar en la superficie horizontal [19]. La medida de la radiación solar incidente sobre la tierra se realiza comúnmente mediante un instrumento metrológico llamado pirómetro o solarímetro. [19]

Colombia es un país que se caracteriza por su riqueza natural y diversidad en las condiciones climáticas de sus regiones por lo cual podemos encontrar lugares donde sería de gran utilidad ésta medida. Es privilegiada también con una gran cantidad de radiación solar durante la mayor parte del año principalmente en la región Caribe, que en promedio recibe 5.5 KWh/m² durante 5 horas diarias. Ésta ventaja natural sobre otros países permite la generación de energías limpias por medio de métodos de recolección solar [9].

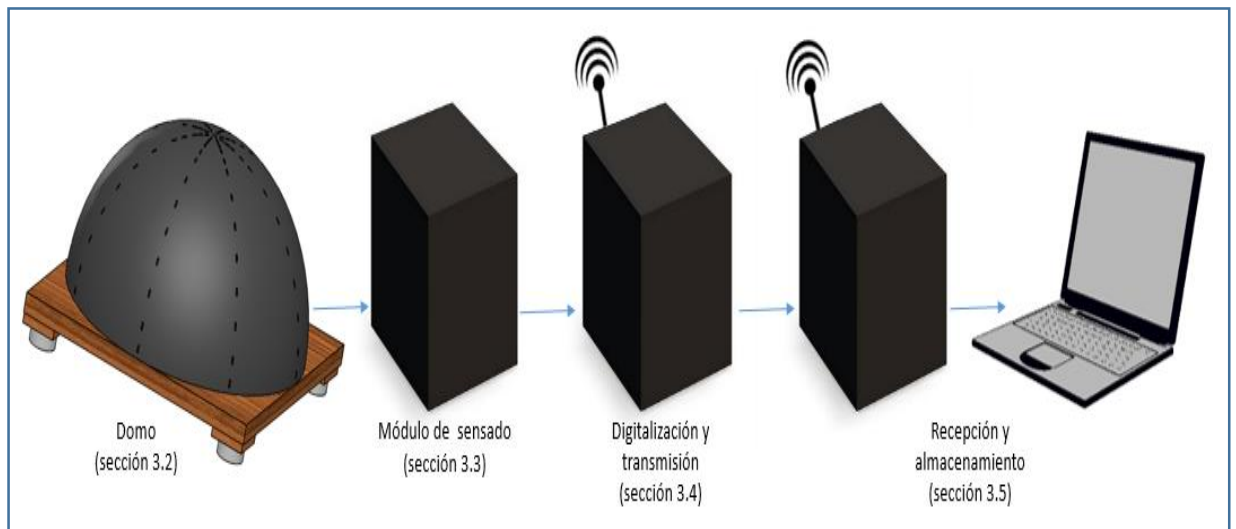
El desarrollo de la energía fotovoltaica requiere conseguir, con unos costos razonables, que los elementos de la instalación alcancen unos rendimientos energéticos elevados. En la actualidad hay tecnologías consideradas para la producción de electricidad solar por vía fotovoltaica basada en el uso de módulos fotovoltaicos planos y curvos, que incorporan celdas de silicio, ya sea monocristalino o policristalino, o ya sea módulos fotovoltaicos de alta concentración, éstos últimos siendo los más modernos y en los que se necesita mucha menos cantidad de silicio para las celdas, pero son más costosos. La diferencia del sistema propuesto en el presente documento se basa en el funcionamiento asociado no a un módulo fotovoltaico plano y la medición de la irradiancia solar horizontalmente, sino a la medición de la irradiancia en función de la inclinación y orientación de varias celdas solares distribuidas uniformemente en un domo para detectar las zonas de mayor incidencia de radiación solar en cualquier lugar.

De acuerdo a lo anterior, en este documento de investigación se muestra la solución de tres problemas principales dentro del diseño del sistema: Inicialmente establecer las especificaciones de diseño, basadas en parámetros requeridos como por ejemplo incertidumbre, precisión, costo, tamaño, entre otros. La siguiente fase comprende la solución al diseño estructural del arreglo de celdas solares el cual implicaría el tipo, la organización, ubicación y selección de materiales y por último la obtención o adquisición de datos que requeriría la selección del tipo de SAD (sistema de adquisición de datos) de acuerdo a las especificaciones establecidas en las fases anteriormente mencionadas.

4. DISEÑO DEL PROTOTIPO

En el presente proyecto de grado se muestra el diseño de un sistema para la medición de la irradiancia solar en cualquier lugar mediante un arreglo estructural de celdas solares en un domo semiesférico. El sistema consiste en una estructura formada por un arreglo de celdas solares orientadas con cierta inclinación y posición fija de tal manera que abarque el recorrido de la incidencia de la luz solar, posteriormente se conectará a un sistema de adquisición de datos para el sensado y almacenamiento de la información medida por estas celdas, ya sea de tensión, corriente o potencia. Como disposición final estos datos podrán ser transmitidos a un computador donde son leídos y visualizados mediante una interfaz gráfica o programa de simulación. Tanto el diseño básico del sistema, como del prototipo se pueden observar de manera general en la figura 9. Los diferentes módulos y componentes se describen a continuación.

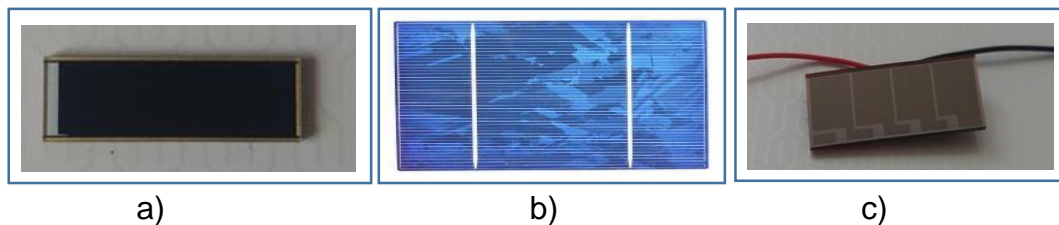
Figura 5. Esquema básico del diseño del sistema propuesto



4.1 SELECCIÓN DE CELDA SOLAR

En esta sección se discuten las características, selección y arreglo de las celdas solares utilizadas para la medición de irradiancia solar. Teniendo en cuenta una de las diferentes características y prestaciones de las celdas solares según la fabricación, eficiencia, disponibilidad y tamaño, se estudiaron tres tipos de celda: monocristalinas, policristalinas, y de silicio amorfo (ver figura 10). De acuerdo a las necesidades del diseño, se preseleccionó un modelo de celda de cada tipo. Los diferentes tipos de celdas se describen a continuación y la Tabla 1 muestra una comparación de sus características.

Figura 6. a) Monocristalina b) Policristalina c) Amorfa



A. celda solar de silicio monocristalina

Es una de las más eficientes por su fabricación con silicio de alta pureza (estructura atómica ordenada) presentando alrededor de 24% de eficiencia de conversión de potencia en laboratorio y del 15% al 18% comercializada, son más elaboradas, trabajan mejor en condiciones de poca luz y altas temperaturas. Ver figura 10a.

B. celda solar de silicio policristalina

El segundo tipo de celdas, son de silicio policristalino tienen una estructura atómica no tan ordenada como el monocristalino, una menor eficiencia de conversión de

potencia del 12% al 14%, un menor rendimiento, un poco menos costosas y un menor ciclo de vida útil. Ver figura 10b.

C. celda solar de silicio amorfo

Por último, se estudió el tipo de celda de silicio amorfo, es una de las celdas menos elaboradas comparada con las anteriores, su fabricación es sencilla, presenta una eficiencia de conversión no mayor al 10%, son las más económicas, de menor tiempo de vida útil comparada con las anteriores. Ver figura 10c.

Tabla 1. Comparación de las características diferentes tipos de celdas solares

Tipo de celda	fabricación	Eficiencia	Costo	Tamaño
Monocristalina kxob22-12x1	Cristalización a partir de silicio puro. Estructura atómica ordenada	22%	2.05 (dólares)	22MM X 7MM
Policristalina	Las células policristalinas se fabrican a partir del silicio metalúrgico distintas estructuras cristalinas.	12-15%	4 (dólares)	52MM X19MM
Amorfa AM-1456CA	Fabricación basada en la colocación de fina capa de amorfo (no cristalino) de silicio sobre una amplia variedad de superficies.	Depende de su exposición a la luz y de la temperatura y longitud de onda.	1.86 (dólares)	25MM X 10MM

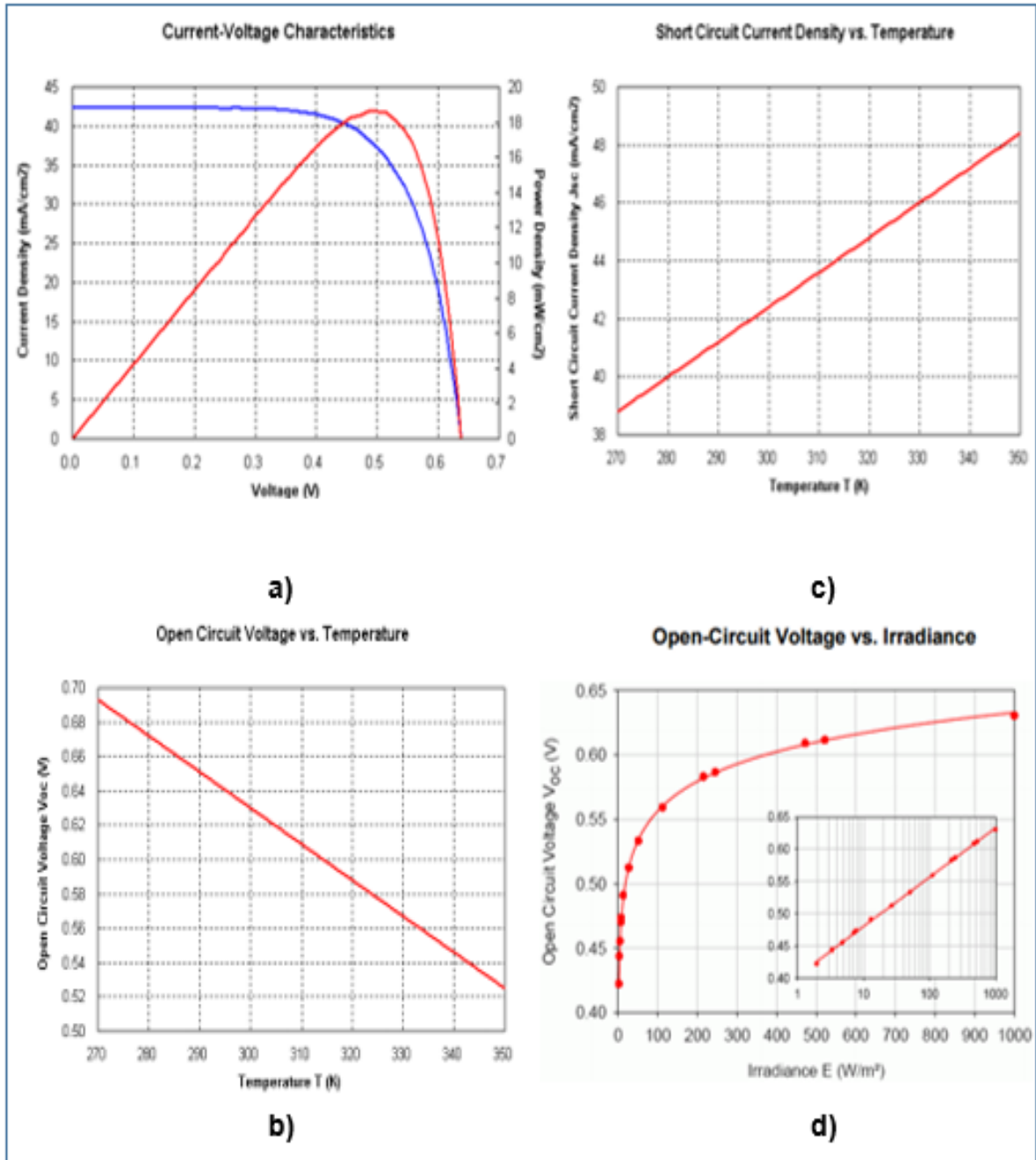
Para el diseño del sistema propuesto se seleccionó finalmente la celda solar de tipo monocristalino de referencia KXOB22-12X1 del fabricante IXYS (ver figura 10a).

Se seleccionaron parámetros basados en el rendimiento, eficiencia de conversión de potencia, parámetros de tensión y corriente necesarios para la alimentación del sistema, vida útil de trabajo, menor degradación, condiciones de trabajo en ausencia de luz y altas temperaturas y, finalmente, por su disposición y asequibilidad, ya que de punto de partida se fijó el menor tamaño posible y el menor coste de producción. Lo detalles técnicos y curvas características de este modelo de celda se muestran en la tabla 2, y la figura 11, respectivamente.

Tabla 1. Datos técnicos celda solar KXOB22-12X1

KXOB22-12X1 DEL FABRICANTE IXYS	
(Voc) Tensión de circuito abierto	630 mV
(Icc) Corriente de corto circuito	50 mA
(Vmpp) Tensión máxima pico	501 mV
(Impp) Corriente máxima pico	44.6 mA
(Pmpp) Máximo pico de potencia	18.6 mW/cm ²
(η) Eficiencia de la celda solar	22 %
(Tmpp) Temperatura máximo pico	220± 3 °C
(T) Temperatura constante	200 °C /1min.

Figura 11. Curvas características celda solar KXOB22-12X1. a) Curva característica corriente-tensión-potencia. b) Tensión de circuito abierto vs temperatura. c) Corriente de corto circuito vs temperatura. d) tensión de circuito abierto vs irradiancia



Fuente: IXYS, 2015 [21]

4.2 DISEÑO ESTRUCTURAL DEL DOMO

Debido al desplazamiento del sol, el cual varía 15 grados cada hora, y sus movimientos durante las diferentes épocas del año, las celdas solares reciben más o menos radiación, según su orientación e inclinación. Por lo tanto, se decide hacer un diseño en forma de cúpula que cubra todos los ángulos posibles y abarque el recorrido del sol en todas las direcciones de tal manera que sea funcional tanto en lugares donde se cuente con estaciones climáticas, como en aquellos donde no se cuenta con ellas. Como se ve en la figura 12, el sol va recorriendo la distribución semiesférica y se va captando la radiación solar en todas las direcciones posibles donde cada celda solar se encuentra ubicada a cierta inclinación y en cierta orientación, se considera diseñar el domo de tal manera que cuente con la mayor resolución posible cubriendo el mayor rango de ángulos relevantes en los cuales se logre ver los cambios significativos de irradiancia a medida que el sol se mueve.

Figura 12. Corte transversal domo en Solidworks

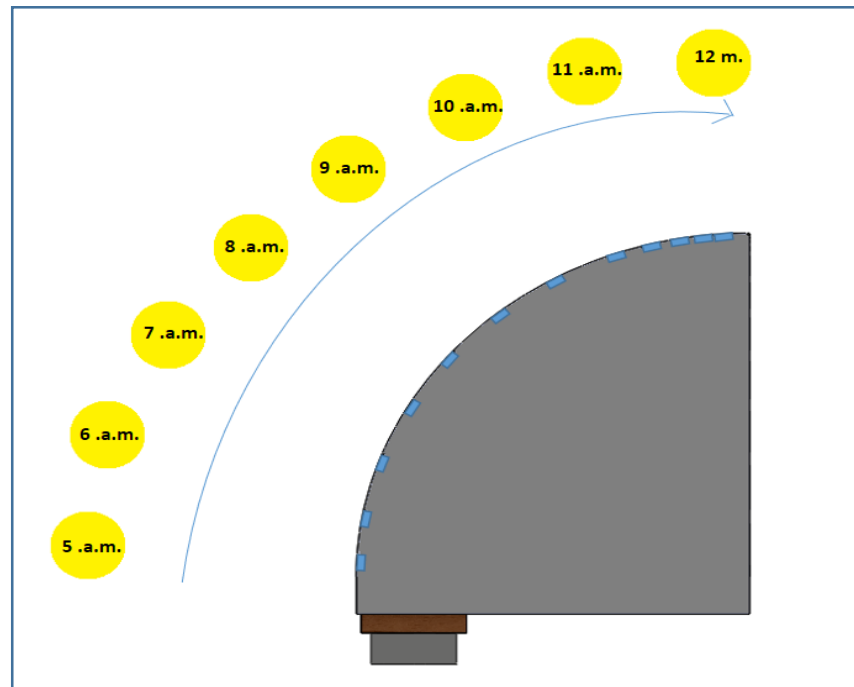
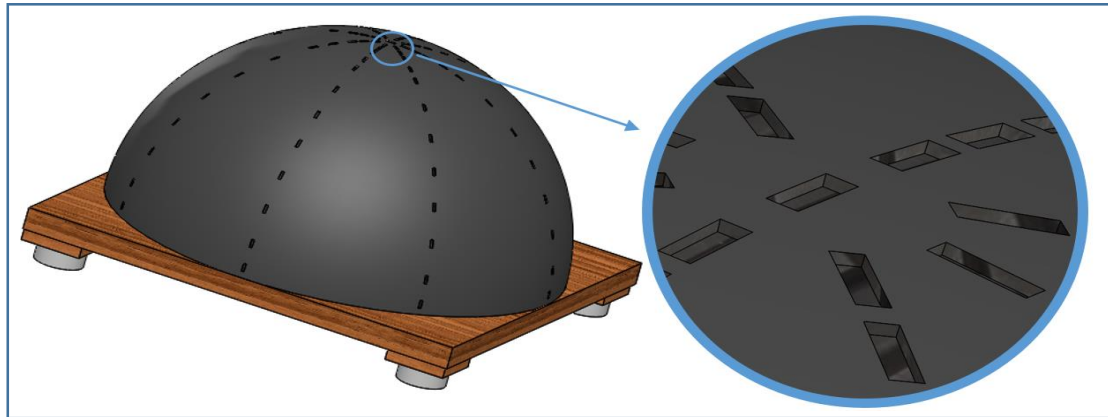


Figura 13. Diseño del domo en Solidworks



Para el diseño del sistema se realizó un modelo en el software Solidworks (figura 13) basado en una semiesfera con cavidades rectangulares distribuidas en toda su superficie a una profundidad de 2 milímetros y espaciadas según la distribución analizada en la sección 3.2.1, además el domo cuenta con una base donde puede ser modificado su nivel horizontal con el fin de encontrar manualmente la mejor inclinación o si se requiere asegurar que el prototipo se encuentre totalmente nivelado con la superficie en donde se ubique. Dentro del modelo se observan irregularidades en la superficie de cada orificio rectangular debido a la forma esférica pero no es inconveniente ya que la celda se ubicará a cierto ángulo con respecto a la distribución que se le da cada 15 grados debido al cambio o movimiento del sol, ya que su respectivo movimiento es de 15 grados cada hora.

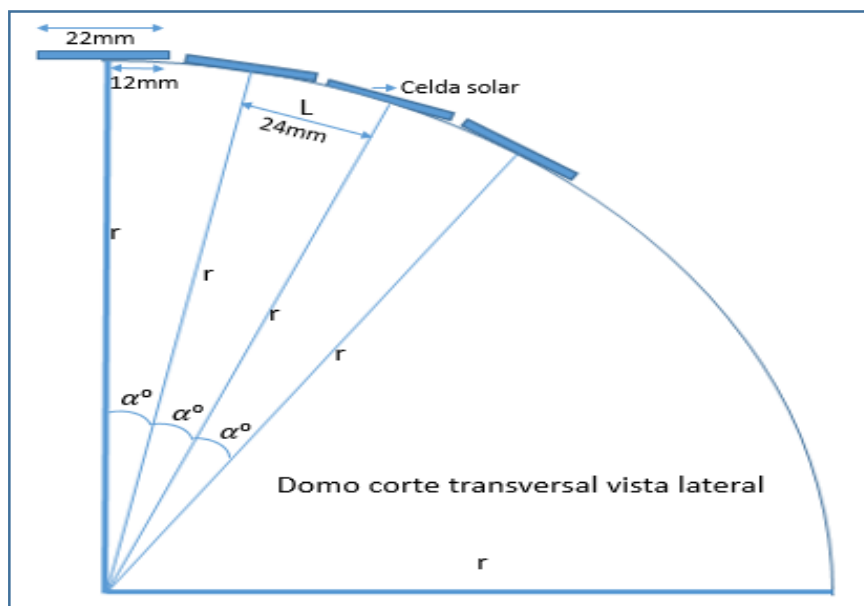
Teniendo en cuenta la importancia de la medición de la irradiancia solar en el área metropolitana Bucaramanga Santander, donde se realizará la toma de medidas a partir de un ángulo de 7 grados, y que cada panel tenga cierto ángulo de inclinación como mínimo para la autoeliminación de residuos por la lluvia. En este trabajo se consideraron dos tipos de distribuciones teniendo en cuenta la forma semiesférica a tratar, la primera distribución cuenta con la ubicación de las celdas solares

teniendo en cuenta sus dimensiones a lo largo y su segunda ubicación a lo ancho como se explica a continuación.

Para el diseño de los respectivos modelos se realizaron los cálculos necesarios teniendo en cuenta los parámetros establecidos y los requerimientos de diseño, como lo son: mínimo costo, mínimo tamaño posible abarcando la mayor resolución, y disponibilidad de elementos, en fin, un diseño sencillo, eficiente y capaz de captar la radiación solar según la orientación e inclinación de las celdas solares distribuidas sobre la superficie del domo. Para el caso de las pruebas preliminares, se tomó la distribución con 5 celdas igualmente espaciadas entre sí como se observa en la figura 31 y figura 33, capítulo 4.

4.2.1 DISTRIBUCIÓN ESPACIAL DE CELDAS

Figura 7. Distribución de celdas solares a lo largo (vista lateral de celda solar en su lado más largo)



Para la distribución espacial se realizaron los respectivos cálculos para la adecuada ubicación de cada celda solar según las dimensiones y tamaño de ésta. Se establecieron tres posibles casos o distribuciones sobre el domo, haciendo referencia a la ubicación de las celdas solares según su forma rectangular, cuyas medidas son 22mm x 7mm x 2mm.

De la figura 14 se puede observar el análisis geométrico de las medidas y ángulos relacionados para calcular el número de celdas y el tamaño del domo necesario para distribuir ese número de celdas sobre su superficie, según el caso de distribución espacial. Las formulas obtenidas a partir del análisis de la figura 14 son:

$$L = \frac{\pi * r * \alpha}{180}, \quad (1)$$
$$\text{sen}(\alpha) = \frac{L}{r}, \quad (2)$$
$$p = 2 * \pi * L, \quad (3)$$

dónde: L= Longitud de arco o arco

r = Radio circunferencia

p= Perímetro

α = Ángulo de inclinación

La selección de los tres casos se basó en la ubicación de las celdas solares a lo largo y lo ancho partiendo de la cúspide, el caso 1 y 2 corresponden a la ubicación según el largo de la celda solar y el caso 3 corresponde al ancho. Ver figura 15.

Figura 15. Casos de distribución de las celdas solares sobre el domo. a) Caso 1: 8 líneas, cada una de 12 celdas ubicadas a lo largo. b) Caso 2: 16 líneas, cada una de 12 celdas ubicadas a lo largo. c) Caso 3: 8 líneas, cada una de 12 celdas ubicadas a lo ancho

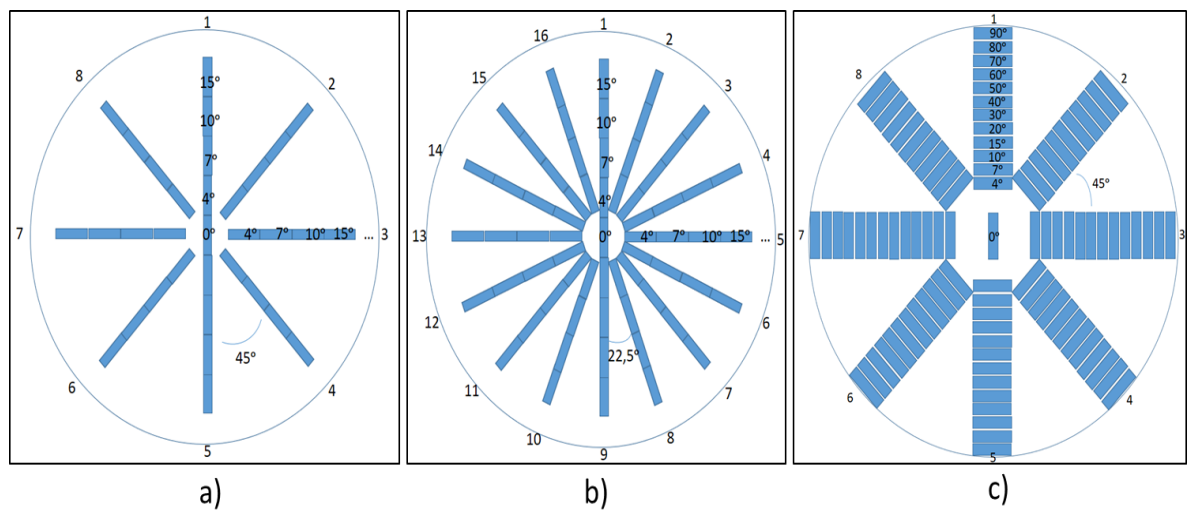


Figura 8. Vista superior cúspide del domo

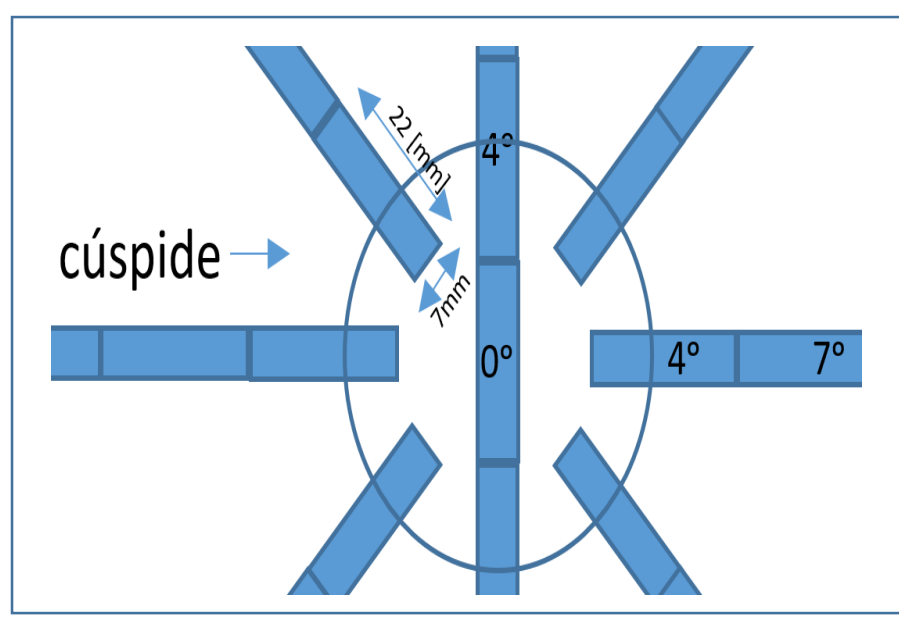


Tabla 3. Características de los 3 casos planteados

	Caso 1	Caso 2	Caso 3
Líneas de distribución	8	16	8
Angulo de separación entre líneas de distribución	45°	22, 5°	45°
Número de celdas solares por cada línea de distribución	12	12	12
Número de celdas solares por radio (anillo)	8	16	8
Barrido angular en cada línea de distribución	0°, 4°, 7°, 10°, 15°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80°, 90°.	0°, 4°, 7°, 10°, 15°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80°, 90°.	0°, 4°, 7°, 10°, 15°, 20°, 30°, 40°, 50°, 60°, 70°, 80°, 90°.
Perímetro cúspide	120 [mm]	240 [mm]	240 [mm]
Radio	458,36[mm]	547,47[mm]	547,47[mm]
Número de celdas totales	97	193	97

Para cada caso se consideraron dos condiciones. Como primera condición se tuvo en cuenta el *perímetro de la cúspide*, ya que el ancho de la celda limita las líneas de distribución desde la cúspide hasta la base del domo. Por ejemplo, para el caso 1, las celdas se ubican a lo largo, es decir se halla el perímetro formado por la suma del ancho de las 8 celdas y el espacio entre ellas dando un total de 120 [mm] de diámetro (ver figura 15a). La segunda condición fue hallar el *radio del domo* si se ubica una celda solar 4 grados a partir de la celda central (ver figura 16).

Ya establecidas las dos condiciones de diseño se procede a hallar las variables correspondientes a partir de las ecuaciones (1), (2) y (3). Las especificaciones geométricas obtenidas para cada diseño se muestran en la tabla 3. Los casos 1 y 2 resultan ser modelos más precisos en cuanto a distribución espacial, tal como se observa de manera general en la tabla 3. Esto se debe a que el domo contiene el mayor número de celdas y a su vez mantiene el menor tamaño posible con una mayor resolución.

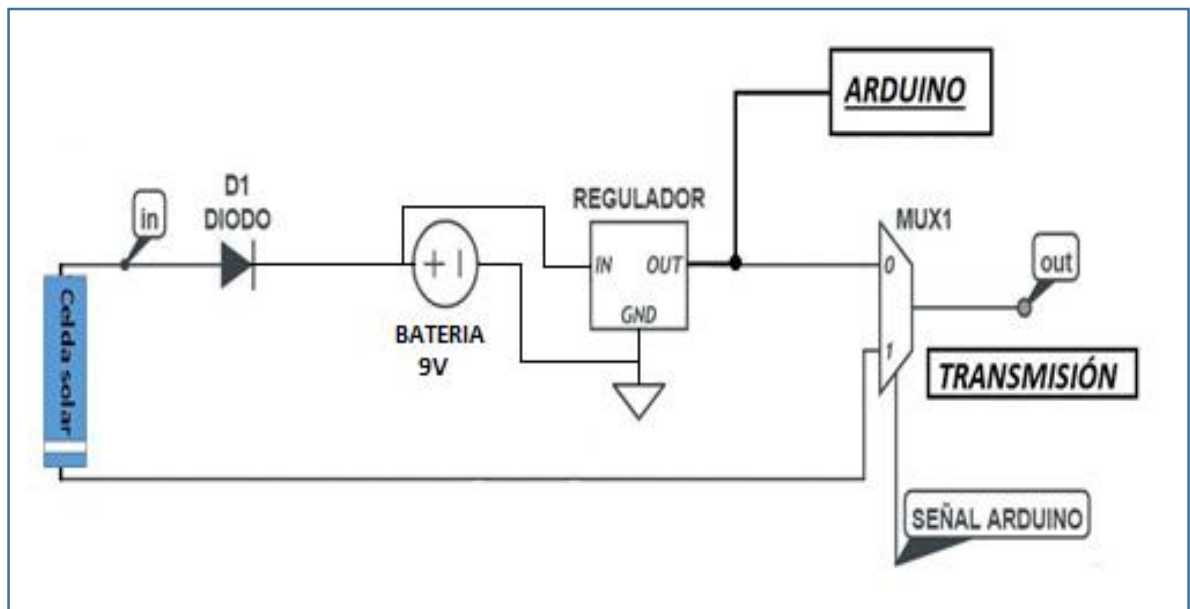
Cabe resaltar que por el número de celdas y la limitación en el número de entradas analógicas del módulo de sensado, se debe tener en cuenta la relación beneficio costo del diseño, así, que para una mayor resolución o número de celdas, se debe tener en cuenta el costo de las celdas y que para el módulo de adquisición de datos se requiere el uso de más multiplexores analógicos, como se explica en la sección 3.3.4; así como también un mayor tamaño del área del domo.

4.3 MÓDULO DE SENSADO

El proceso de sensado consiste en la medición de la tensión proveniente de la celda solar que pasa a través de un multiplexor analógico para las diversas señales de

tensión y va directamente al arduino, dentro del proceso de sensado se tiene en cuenta el diodo de protección para la batería con el fin de evitar su descarga, la batería como fuente de alimentación, el regulador de tensión para la alimentación de los Arduino uno y finalmente el envío de datos. Ver figura 17.

Figura 9. Módulo de sensado

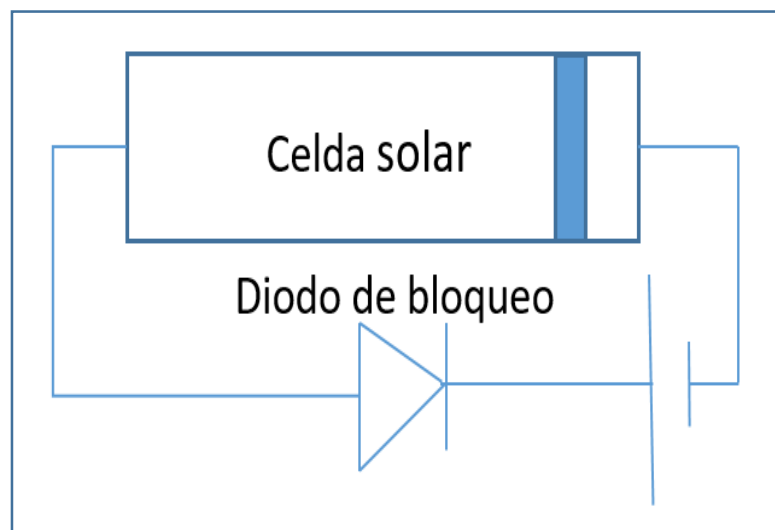


La irradiancia solar es la potencia que incide sobre la tierra y está dada en W/m^2 y una de las maneras para determinarla en cualquier lugar a partir de una celda solar, es con la caracterización de su tensión y corriente. La irradiancia solar en el prototipo planteado se mide a partir de una medida patrón, que en nuestro caso será la estación meteorológica Vantage Pro2 ubicada el edificio investigaciones del parque Guatiguará en Piedecuesta. Figura 39.

En paralelo a la celda solar se tendrá una resistencia de precisión con valor de 5,12 ohm y de esta se medirá la tensión e indirectamente se calculará la corriente con la ley de Ohm. A esta medida se tendrá asociada la temperatura de la celda. Con estos tres datos se buscará en la tabla la respectiva irradiancia solar teniendo como principal dato la tensión.

4.3.1 Diodo de Bloqueo. Son los diodos utilizados para evitar la descarga de la batería en los momentos donde no exista sol o también cuando exista sombra sobre las celdas, en esta ocasión el flujo de la corriente es en dirección contraria debido al diferencial de tensión en los bornes de la batería. Ver figura 18.

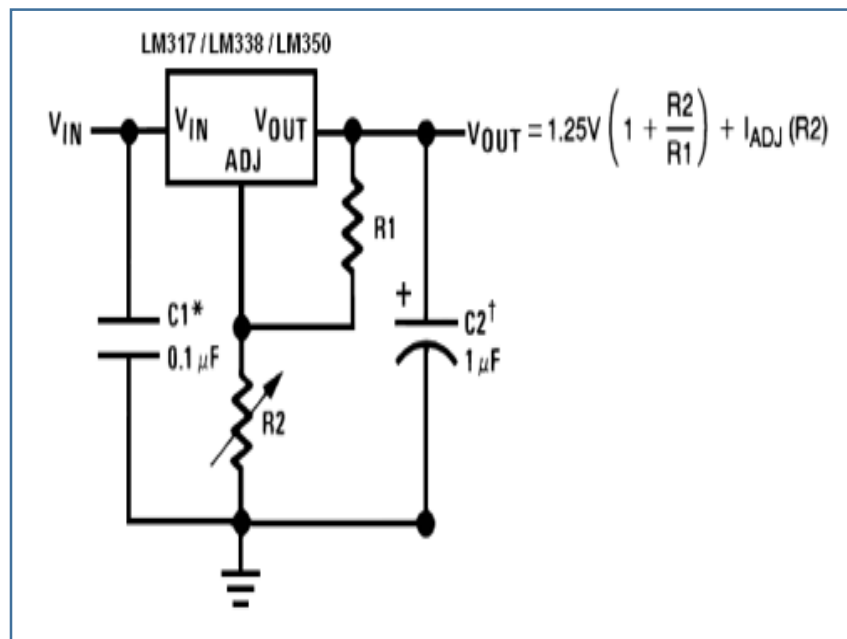
Figura 18. Instalación diodo de bloqueo



Este diodo es muy importante en nuestro proyecto ya que la batería es la que da la energía para que funcione el sistema en primera instancia en cuanto a la medida directa y su transmisión de datos.

4.3.2 Regulador de tensión. Para la alimentación del dispositivo, y con el fin de que se destaque por ser un prototipo stand-alone, se realiza la regulación de tensión a partir de una batería de 9 [v] recargable, obteniendo 5 voltios constantes a la salida para alimentar el arduino UNO, ubicado dentro del domo. El esquema del circuito para la regulación de tensión se puede observar en la figura 19.

Figura 10. Regulador de tensión



Fuente: Proyectos Electrónicos, 2008 [22]

4.3.3 Sensado de tensión. El sensado de tensión es realizado mediante un microcontrolador Arduino UNO (figura 20), conectando la salida del multiplexor directamente a sus entradas analógicas para las pruebas preliminares (ver sección tal), se utilizó un prototipo que consta de 5 celdas solares. El nivel de tensión máximo recibido por cada celda es de 630 mv aproximadamente y no presenta ningún posible daño a las entradas o pines del dispositivo. El diseño general del

prototipo consta de varias celdas distribuidas en toda la superficie del domo por lo que se requieren más entradas analógicas. Por tal motivo se implementa un multiplexor analógico de tensión con el fin de utilizar un número mayor de celdas solares y leer el valor de tensión de cada celda de manera individual.

La tarjeta Arduino UNO es una placa de desarrollo electrónica con un microcontrolador programable de la marca Atmel, que dispone de 14 pines digitales para transmitir o recibir señales de 0-5v. Cada pin puede suministrar hasta 40mA.

También tiene 6 pines analógicos que trasladan las señales a un conversor analógico/digital de 10 bits. Las especificaciones técnicas de esta tarjeta, se encuentran en la tabla 4.

Figura 11. tarjeta de desarrollo Arduino UNO.

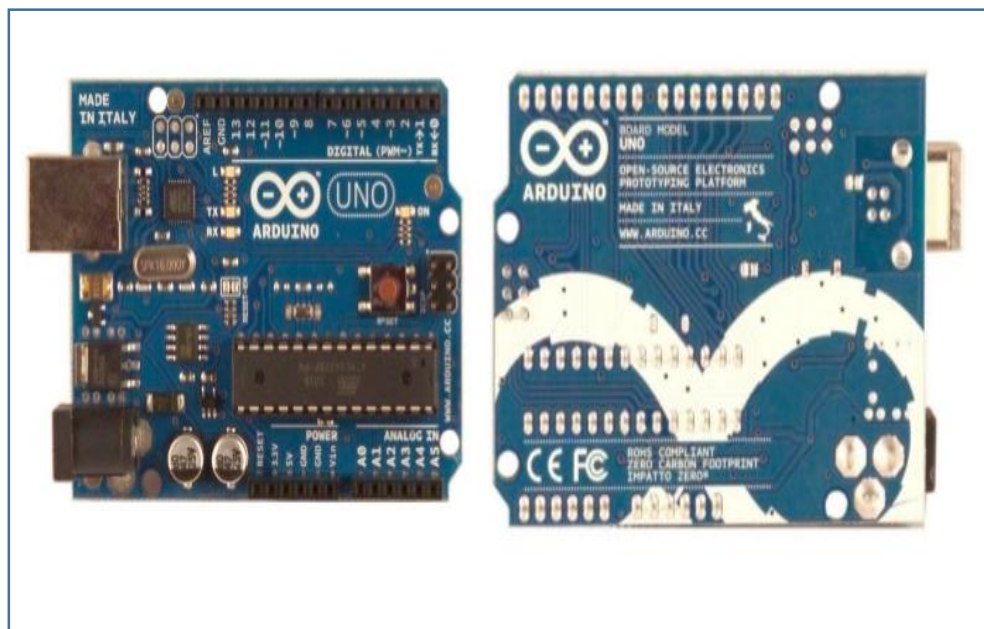


Tabla 4. Especificaciones técnicas tarjeta Arduino UNO

Microcontrolador	ATmega328
Voltaje	5V
Voltaje de entrada	7-12V
Voltaje de entrada (límites)	6-20V
Digital I/O	14 pines digitales (6 son salida PWM)
Entradas analógicas	6 entradas
Corriente DC para I/O Pin	40Ma
Corriente DC para 3,3V Pin	50Ma
Memoria flash	32KB (0,5 KB utilizados en arranque)
Velocidad de reloj	16MHz
SRAM	2KB (ATmega328) de los cuales 0.5 KB son utilizados para el arranque
EEPROM	1 KB (ATmega328)

Fuente: Pansch, Christian [23]

Se realizó el código respectivo en la interfaz de Arduino donde se realiza la lectura de los pines analógicos con el fin de sensar directamente la tensión proveniente del pin positivo de la celda solar. El código se vincula a la interfaz PLX DAQ con el fin de realizar la toma en tiempo real, ir tabulando en Excel e ir graficando al mismo tiempo. El código correspondiente se puede observar en el anexo 1.

4.3.4 Multiplexor analógico. Se seleccionó el MUX/DEMUX analógico HCF4051BE. Existen otros como el 74HC4067, CD4067, y el HEF4051B dependiendo del número de canales analógicos y especificaciones técnicas requeridas, en este caso se cuenta con 8 canales analógicos es decir 8 celdas solares que pueden ser utilizadas en la distribución estructural del prototipo. El multiplexor es un dispositivo que permite conectar varias señales analógicas, a una sola salida. El mismo consiste en un interruptor selector controlado que realiza un barrido en tiempo entregando la lectura en cada pin de selección actuando como un *switch* que me interconecta cada entrada analógica. Con el uso del multiplexor se hace posible la lectura de varias celdas.

En la tabla 5 están las especificaciones técnicas de dos multiplexores mencionados, con el fin de comparar sus características de donde se obtuvo la información para la adecuada selección.

Como principales características de selección que se tuvieron en cuenta están: El tiempo de estabilización; la exactitud de transferencia, que consiste en el error de entrada a salida como porcentaje de la entrada; la velocidad de conmutación, que consiste en la velocidad máxima a la que el multiplexor puede conmutar de canal a canal a su exactitud de transferencia especificada (la velocidad de conmutación se determina por el tiempo de estabilización); el cruce, que es el porcentaje de señal transferida desde un canal desconectado y finalmente el rango de tensión, la diferencia entre los valores máximo y mínimo de tensión que el multiplexor puede aceptar a su entrada. Finalmente, hay que tener en cuenta la resistencia de entrada en el caso que la impedancia del circuito sea de un valor considerablemente elevado. En la tabla 6 se pueden observar las recomendaciones de operación.

Tabla 2. Características técnicas mux/demux 74HC4067 y HEF4051B

74HC4067					HEF4051B				
Parámetro	Cond.	Min	Max	Unid	Parámetro	Cond.	Min	Max	Unid.
(V_{cc})		-0.5	+11.0	V	(V_{cc})		-0.5	+18.0	V
(I_{sw}) corriente de switch	VSW = -0.5V a VCC + 0.5 V	-	±25	mA	(I_{sw}) corriente de switch	VSW = -0.5V a VCC + 0.5 V	-0.5	Vdd+0.5	V
(I_{cc})		-	+50	mA	(I_{cc})		-	+10	mA
(I_{gnd}) Corriente de tierra		-50mA	-	mA	(I_{gnd}) Corriente de tierra		-	-50	mA
(T_{stg}) Temperatura de almacenamiento		-65	+150	°C	(T_{stg}) Temperatura de almacenamiento		-65	+150	°C
(P_{tot}) Potencia de disipación total	Tamb = -40 °C a +125 °C	-	500	mW	(P_{tot}) Potencia de disipación total		-40	+125	°C
(P_{dis}) Potencia de disipación	Por interruptor	-	100	mW	(P_{dis}) Potencia de disipación	Por salida	-	100	mW

Fuente: NXP Semiconductors, 2015 [24] [25]

Se seleccionó el multiplexor analógico HCF4051BE, por condiciones de operación, costo, disponibilidad inmediata; pero con una limitación en cuanto al número de canales. Esto se soluciona realizando la conexión de otro o más multiplexores de tal manera que se obtenga 16 o más canales de entrada.

Tabla 6. Características técnicas mux/demux seleccionado HCF4051BE

HFC4051BE			
Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
(V_{dd})	Tensión de alimentación	-0.5 a +22	V
(V_i)	Tensión de entrada	-0.5 a VDD + 0.5	V
(I_i)	Corriente de entrada	± 10	mA
(P_D)	Disipación de energía	500(1)	mW
	Disipación de energía por transistor de salida	100	mW
(T_{op})	Temperatura de operación	-55 a +125	°C

Fuente: STMicroelectronics, 2013 [27]

Tabla 3. Recomendaciones de operación mux/demux HCF4051BE

HFC4051BE			
Símbolo	Parámetro	Valor	Unidad
(V_{dd})	Tensión de alimentación	3 a 20	V
(V_i)	Tensión de entrada	0 a VDD	V
(T_{op})	Temp. De operación	-55 a 125	°C

Fuente: STMicroelectronics, 2013 [27]

Para la programación del multiplexor y puesta en funcionamiento se realizó el código respectivo en Arduino UNO, utilizando el mux analógico HCF4051BE de 8 entradas o canales, en donde se realiza la lectura de las 8 entradas analógicas con 3 señales de control respectivamente para la selección de cada entrada, el código se caracteriza por contener un ciclo *for* y el multiplexado de 8 señales realizando un conteo de 0 a 7, que son las respectivas señales, y tomándolas con un delay de un segundo. Además, para su elección hay que tener en cuenta la resistencia de entrada en el caso que la impedancia del circuito sea de un valor considerablemente elevado. Ver anexo 2.

Según las distribuciones espaciales de las celdas solares consideradas en la sección 5.2.1, y debido al requerimiento de un gran número de éstas, es indispensable utilizar un número correspondiente de multiplexores, ya que el arduino UNO sólo cuenta con 6 entradas analógicas y en el diseño se requieren 97 o 193 celdas, según sea el caso. Entonces, partiendo del modelo o distribución seleccionado, en los casos 1 y 2 se tendrían los esquemas presentados en la figura 21 y 22.

Figura 21. Adecuación de multiplexores para todas las celdas solares utilizadas en el caso 1

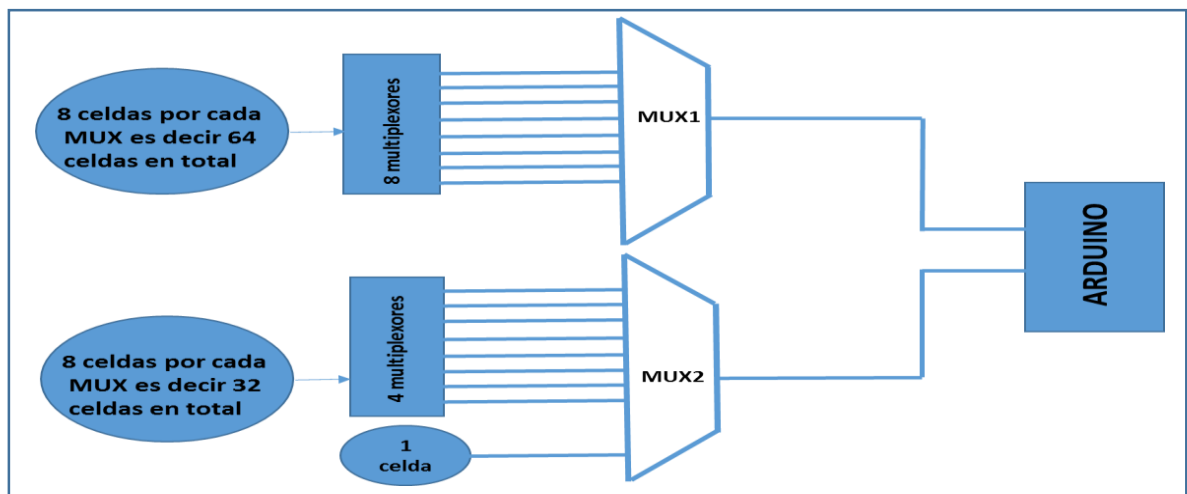
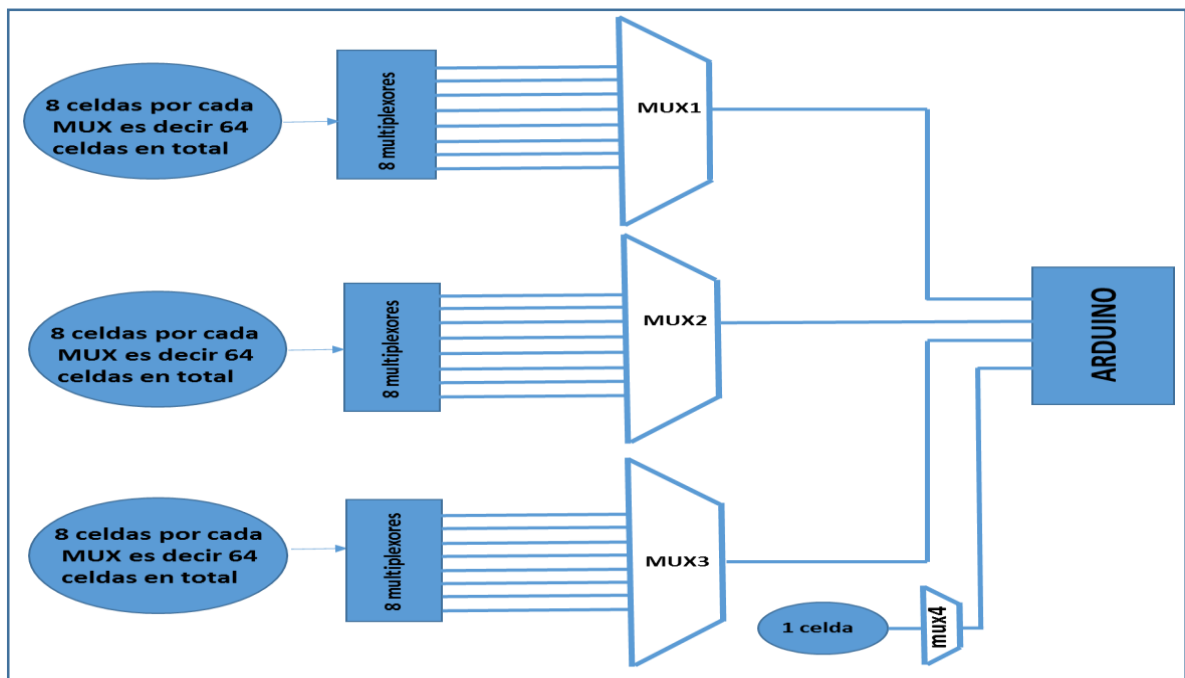


Figura 22. Adecuación de multiplexores para todas las celdas solares utilizadas en el caso 2



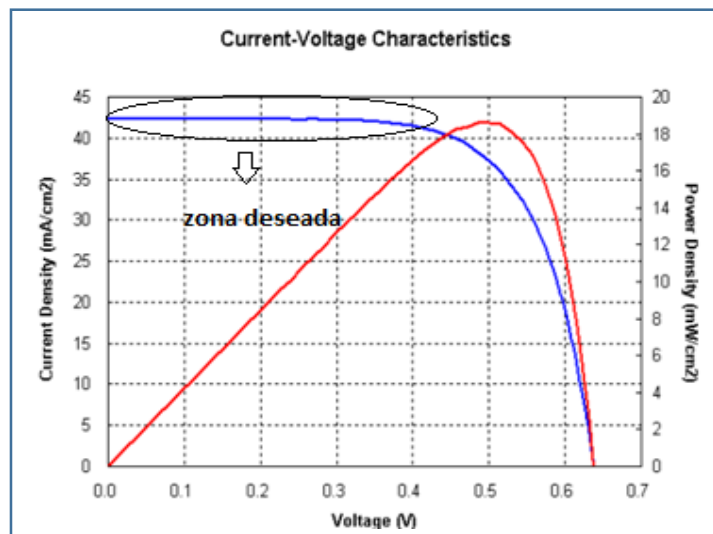
Para la adecuación de los multiplexores en el caso 1 se tuvieron en cuenta 8 celdas por radio, en 12 diferentes inclinaciones (ver sección 5.2.1), es decir 96 celdas en total distribuidas en todo el domo, más la celda central para un total de 97 celdas solares. Como cada multiplexor analógico tiene 8 entradas entonces se requeriría un total de 14 multiplexores (Ver figura 21).

Para el caso 2 se tiene un total de 16 celdas por anillo (radio) y los mismos 12 grados de distribución, es decir, 192 celdas más la celda central, para un total de 193 celdas solares distribuidas en el domo, por lo cual se requiere un total de 28 multiplexores analógicos. Es decir, el doble comparado con el caso 1. (Ver figura 22).

4.3.5 Sensado de corriente. Para obtener la corriente que genera la celda solar, la medición se realiza de manera indirecta y para eso se utilizó una carga de 5,12 ohm en paralelo previamente caracterizada y medida (ver sección 4), teniendo en cuenta que el valor de esta carga hace que se trabaje en un punto determinado dentro de las curvas características de la celda solar. Para esto, se realizaron pruebas preliminares (ver sección IV) para establecer la curva de corriente vs tensión en consecuencia.

La carga fue escogida satisfaciendo los puntos críticos que son, tensión de circuito abierto y corriente de corto circuito. Se establece la carga fija, determinando el valor de tal manera que se trabaje dentro de una zona constante de corriente en la curva de corriente vs tensión dada por el fabricante que (figura 23) y realizada también en pruebas preliminares. La zona constante hace referencia justo a la zona antes de alcanzar su punto crítico o punto de descendencia en la curva.

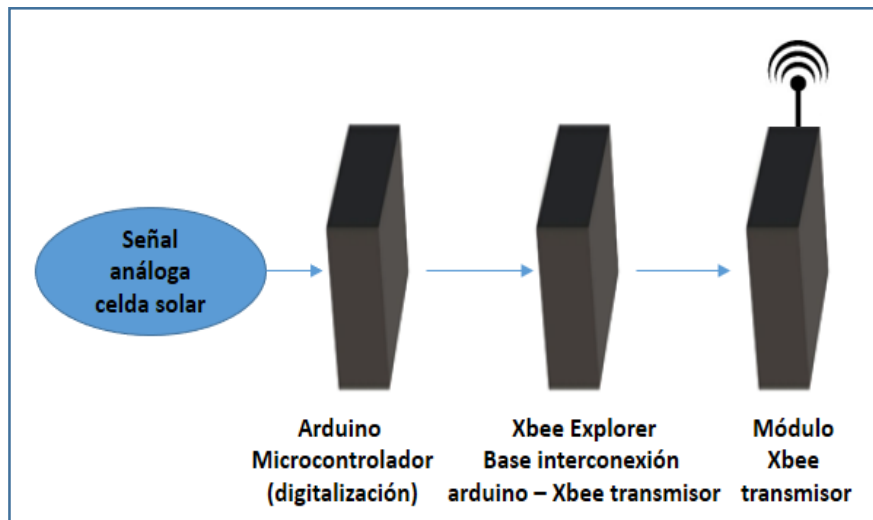
Figura 23. Zona deseada curva característica corriente vs tensión



Fuente: adaptado de: IXYS [21]

4.4 DIGITALIZACIÓN Y TRANSMISIÓN

Figura 12. Módulo de digitalización y transmisión



Para dar resultados satisfactorios es necesario la digitalización y la transmisión de los datos y posteriormente ser leídos, observados e interpretados.

Al realizar la adquisición de datos es necesario la transmisión de ellos al destino donde queremos tener la información. En nuestro sistema, utilizamos la transmisión mediante los módulos Xbee. En la figura 24 se observa el esquema general del proceso de digitalización y transmisión.

4.4.1 Digitalización. La digitalización se realiza mediante el microcontrolador del Arduino UNO, tomando los valores análogos de tensión y llevándolos a su representación digital. Es decir, se toma el valor de tensión o de corriente, se cuantifica la señal y le asigna un valor.

En general hay tres cosas que son importantes saber sobre un ADC:

- La resolución del convertidor
- El tiempo de conversión y la frecuencia de muestreo
- El rango de trabajo

Las principales características de la tarjeta Arduino UNO se pueden observar en la tabla 4 de la sección 4.3.3.

Después de la adquisición de los datos mediante el arreglo de celdas solares, estos son transmitidos al computador, dispositivo en el cual se visualiza y almacenan los datos. Para este proceso fue utilizado el software PLX-DAQ en Excel, donde se organizaron los datos en una tabla de varias columnas, tensión, corriente, potencia e irradiancia solar. El software PLX-DAQ es una aplicación gratuita de parallax que permite al microcontrolador interactuar con una hoja de cálculo de Excel [28]. Con la ayuda de esta aplicación podemos tener los datos de tensión que llegan al computador directamente en una hoja de Excel.

4.4.2 Transmisión. Una vez la tarjeta arduino UNO tenga los datos procedentes del sensado, procederá a ejecutar el programa ya cargado en él y transmitirá los datos por medio de los módulos de comunicación XBEE a un computador ubicado en otro lugar.

Tanto la tarjeta Arduino como el módulo XBEE transmisor necesitan alimentación. La tarjeta arduino se alimentará con 5V con una fuente externa y el módulo XBEE con la salida 3,3 [V] del mismo arduino.

4.4.2.1. Módulo de conexión Xbee Explorer. El módulo de comunicación Xbee Explorer (ver figura 25) es una base para realizar la conexión entre los módulos Xbee y el computador donde se configuran, para que uno sea el receptor y el otro transmisor. Para que el receptor esté conectado al computador, es necesario una tarjeta especial llamada Xbee Explorer.

Figura 13. Módulo de conexión Xbee Explorer



4.4.2.2 Módulos Xbee Pro XBP 24-AWI-001. Son dispositivos capaces de comunicarse de forma inalámbrica a una frecuencia de 2,4GHz, utilizando un protocolo de red llamado IEEE 802.15.4 (la base de Zigbee). Fabricado por Digi (Maxstream) de alta potencia de salida (60mW) alcanzando hasta unos 1,6 Km de línea vista. (Ver figura 26)

Figura 14. Módulos Xbee pro s1, transmisor y receptor

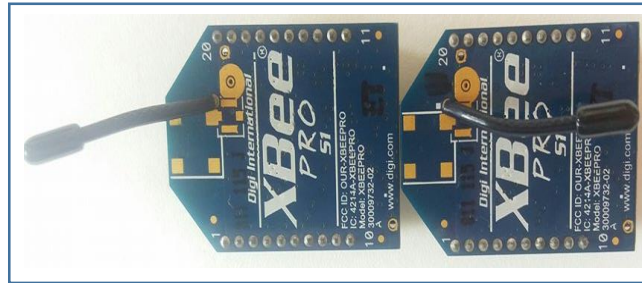


Tabla 8. Características técnicas módulos Xbee Pro s1

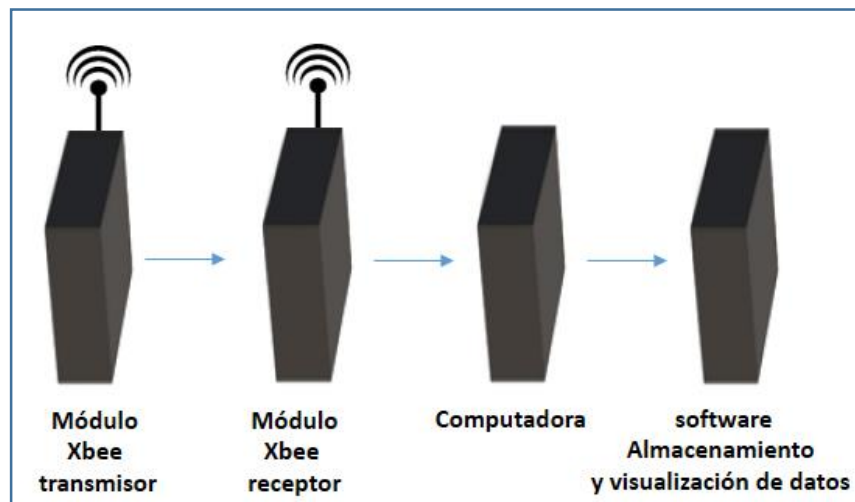
Alimentación	3,3V @ 215mA
Máximo velocidad de datos	250kbps
Potencia de salida	60mW(+18dBm)
Alcance	1500 metros aprox.
Antena integrada e interfaz serial
Certificado FCC	
Pines	6 pines ADC de 10-bit, 8 pines digitales IO
Encriptación	128-bit
Consumo	<50 mA en funcionamiento

4.4.2.3 Configuración de los módulos Xbee Pro. Para realizar la configuración de los módulos Xbee Pro, tal que uno sea el transmisor y el otro el receptor, es necesario utilizar el software llamado DIGI XCTU. Primero se conectan los módulos al computador, después dentro este software se elige el puerto utilizado, luego se

realiza el reconocimiento del módulo y se selecciona, al dar clic sobre la imagen del módulo despliega varias opciones de configuración, luego para configurarlos se escriben los números que aparecen escritos en el módulo Xbee que hace referencia a un número serial que traen por defeco de fábrica para su interconexión. Finalmente, por medio de la interfaz hyper terminal se realizaron las pruebas de transmisión y recepción previas.

4.5 RECEPCIÓN Y ALMACENAMIENTO

Figura 15. Módulo de digitalización y transmisión



De manera general, como se observa en la figura 27, se tiene la recepción y almacenamiento de los datos. Para la recepción y almacenamiento se utiliza una pareja de módulos Xbee pro s1 y el respectivo almacenamiento en el computador mediante el software Excel, PLX-DAQ, software encargado de tabular y graficar en tiempo real los datos transmitidos.

4.5.1 Recepción. Para la recepción, el sistema tendrá un módulo Xbee Pro s1 conectado al arduino UNO y ese a su vez a un computador, el cual será el encargado de recibir los datos enviados por el módulo Xbee transmisor que estará conectado a otro Arduino UNO y el domo semiesférico de las celdas solares.

Se obtienen los datos en el computador y por medio de la ayuda del software PLX-DAQ se visualizan directamente en Excel para luego ser almacenados y posteriormente graficados.

4.5.2 Almacenamiento. Después de haber recibido los datos, el almacenamiento se realizará en un computador con la ayuda del software Excel en el cual se observarán todos los datos necesarios, teniendo la posibilidad de ver tabulados los datos de tensión, corriente, potencia e irradiancia solar.

En Excel se podrá graficar cualquiera de las combinaciones y por su puesto la que más nos interesa la irradiancia solar con respecto al tiempo.

4.4 COSTOS DE ELABORACIÓN DEL PROTOTIPO GENERAL

Para los costos de elaboración se tuvo en cuenta los diferentes modelos de prototipos tanto el experimental como los propuestos, con el fin de comparar y tener un diseño completo, basados en uno de los requisitos principales de diseño que es el bajo costo de implementación. A continuación, se presentan 3 tablas

correspondientes a cada caso, y los costos tanto de elaboración como de materiales.

Tabla 9. Costos diseño prototipo experimental de 5 celdas

MATERIALES	COSTO (Unidad)	CANTIDAD	COSTO
Domo semiesférico (Poliestireno expandido icopor)	\$1.000	1	\$1.000
Celda solar de tipo monocristalina de referencia KXOB22-12X1	\$3.500	5	\$17.500
Arduino UNO	\$35.000	2	\$70.000
Multiplexor analógico HFC4051BE	\$1.500	1	\$1.500
Módulos Xbee Pro XBP 24- AWI-001	\$80.000	2	\$160.000
Módulo de conexión Xbee Explorer	\$22.000	1	\$22.000
Diodo de bloqueo	\$1.000	1	\$1.000
Regulado de tensión (5V)	\$5.000	1	\$5.000
Batería(9V) recargable DATA CELL	\$4.000	1	\$4.000
costo total del diseño	_____	_____	\$282.000

Según la tabla 9 y 10 de costos, el caso 2 respecto al caso 1, Tiene ventaja en cuanto a la mayor resolución en la toma de datos, conservando el mismo tamaño con una diferencia en el precio de \$352.500. Este costo se considera según los requerimientos del usuario y el fin de uso del prototipo que lo justifique.

Tabla 4. Diseño propuesto caso 1 (sección 4.2.1, figura 10a)

MATERIALES	COSTO (Unidad)	CANTIDAD	COSTO
Domo semiesférico acrílico	\$150.000	1	\$150.000
Celda solar monocristalina Referencia KXOB22-12X1	\$3.500	97	\$339.500
Arduino UNO	\$35.000	2	\$70.000
Multiplexor HFC4051BE	\$1.500	14	\$21.000
Módulos Xbee Pro XBP 24-AWI-001	\$80.000	2	\$160.000
Módulo Xbee Explorer	\$22.000	1	\$22.000
Diodo de bloqueo	\$1.000	1	\$1.000
Regulador de tensión(5V)	\$5.000	1	\$5.000
Batería 9V recargable	\$4.000	1	\$4.000
Costo total del diseño	_____	_____	\$772.500

Tabla 5. Diseño propuesto caso 2 (sección 4.2.1, figura 10b)

MATERIALES	COSTO INDIVIDUAL	CANTIDAD	COSTO
Domo semiesférico acrílico	\$150.000	1	\$150.000
celda solar monocristalina Referencia KXOB22-12X1	\$3.500	193	\$675.500
Arduino UNO	\$35.000	2	\$70.000
Multiplexor HFC4051BE	\$1.500	25	\$37.500
Módulos Xbee Pro XBP 24-AWI-001	\$80.000	2	\$160.000
Módulo de conexión Xbee Explorer	\$22.000	1	\$22.000
Diodo de bloqueo	\$1.000	1	\$1.000
Regulado de tensión(5V)	\$5.000	1	\$5.000
Batería(9V) recargable	\$4.000	1	\$4.000
Costo total del diseño	_____	_____	\$1'125.000

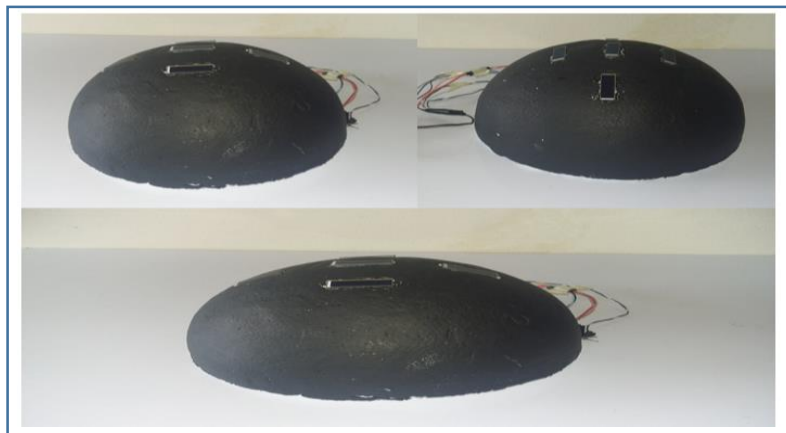
5. PRUEBAS PRELIMINARES

Las pruebas preliminares se realizaron en base al arreglo de 5 celdas solares distribuidas sobre un domo de poliestireno expandido,. Cuenta con cinco orificios a una profundidad de 2 milímetros y separados entre sí 2 cm, en donde van incrustadas las celdas abarcando la mayoría de los ángulos del recorrido solar. La distribución se realizó en 180 grados ubicando el prototipo de tal manera que se tome el desplazamiento de este a oeste y de norte a sur, con cinco celdas uniformemente distribuidas.

Se construyeron dos modelos experimentales según la distribución de las celdas solares, el prototipo experimental 1 con 5 celdas de norte a sur y de este a oeste y el prototipo experimental 2 conformado por 5 celdas distribuidas de este a oeste.

5.1 PROTOTIPO EXPERIMENTAL 1

Figura 28. Imagen prototipo experimental de 5 celdas



El prototipo experimental 1, construido como se ve en la figura 28, tiene 5 celdas distribuidas sobre su superficie semiesférica a una distancia de 2 cm entre si y ubicadas a un ángulo de 15 grados una respecto a la otra partiendo de la celda central a cero grados.

Si bien los diseños considerados en secciones anteriores constan de un mayor número de celdas, el objetivo de este prototipo es la verificación experimental de los diferentes módulos del sistema, la prueba de resolución para la realización de mapeos, y la comparación de datos.

5.1.1 Esquema general. A continuación, se observa el montaje experimental de todos los módulos del sistema, y el correspondiente esquema de conexión. (ver figura 29 y 30).

Figura 16. Foto de montaje general de medición del prototipo 1

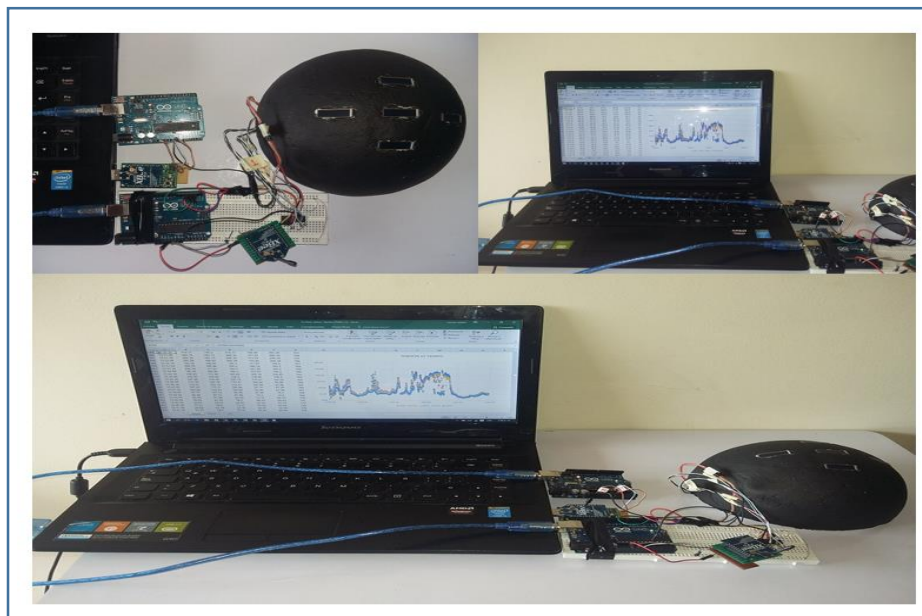
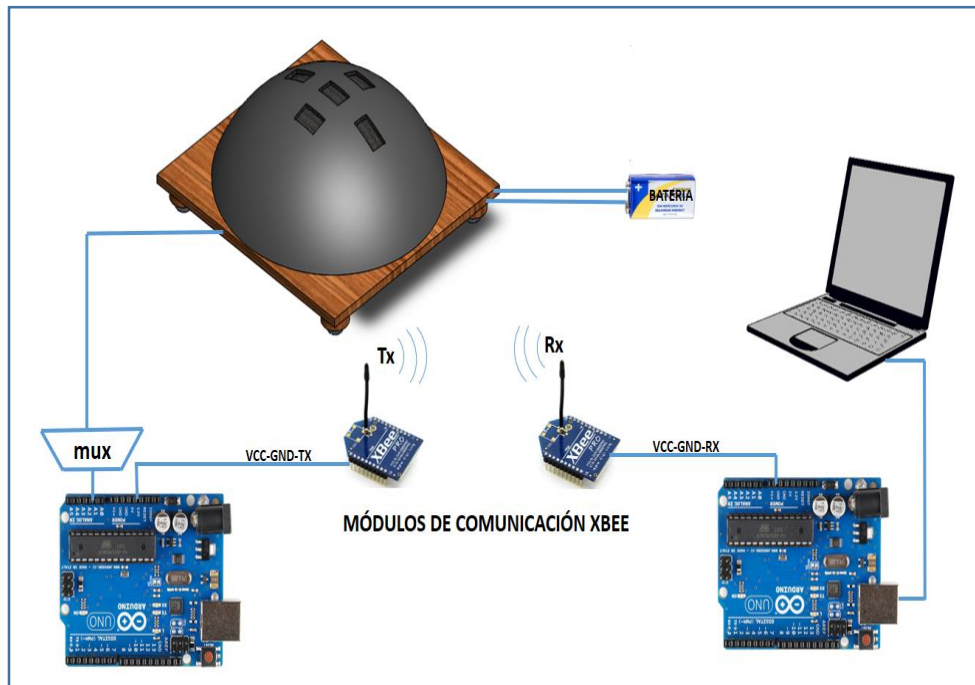
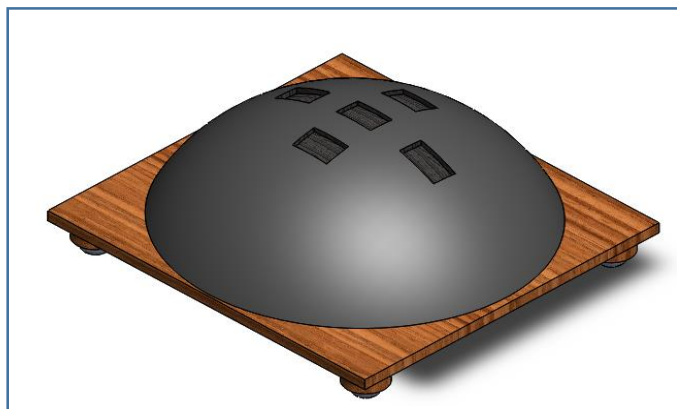


Figura 30. Esquema general de medición del prototipo 1



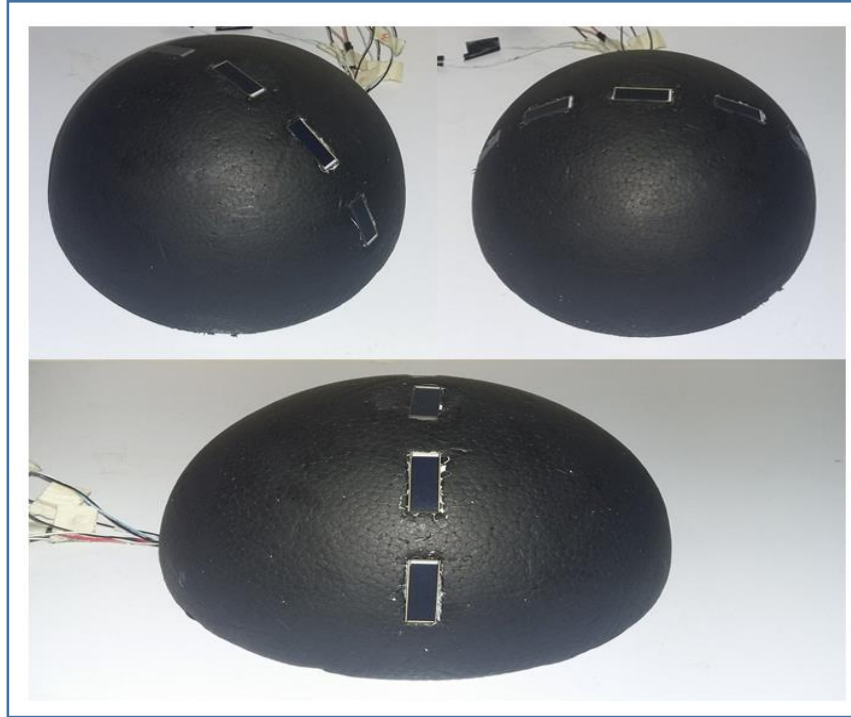
5.1.2 Esquema del domo prototipo 1. En la figura 31 se diseñó el modelo del domo para pruebas, en el software solidworks.

Figura 17. Esquema del domo para el prototipo 1



5.1 PROTOTIPO EXPERIMENTAL 2

Figura 32. Imagen prototipo experimental de 5 celdas



El prototipo experimental 2, construido como se ve en la figura 32, tiene 5 celdas distribuidas sobre su superficie semiesférica a una distancia de 2 cm entre si y ubicadas a un ángulo de 30 grados una respecto a la otra partiendo de la celda central a cero grados a lo largo de la línea horizontal de 180 grados.

5.2.1 Esquema del domo prototipo 2. En la figura 33 se diseñó el modelo del domo para pruebas en el software solidworks.

Figura 33. Esquema del domo para el prototipo 2

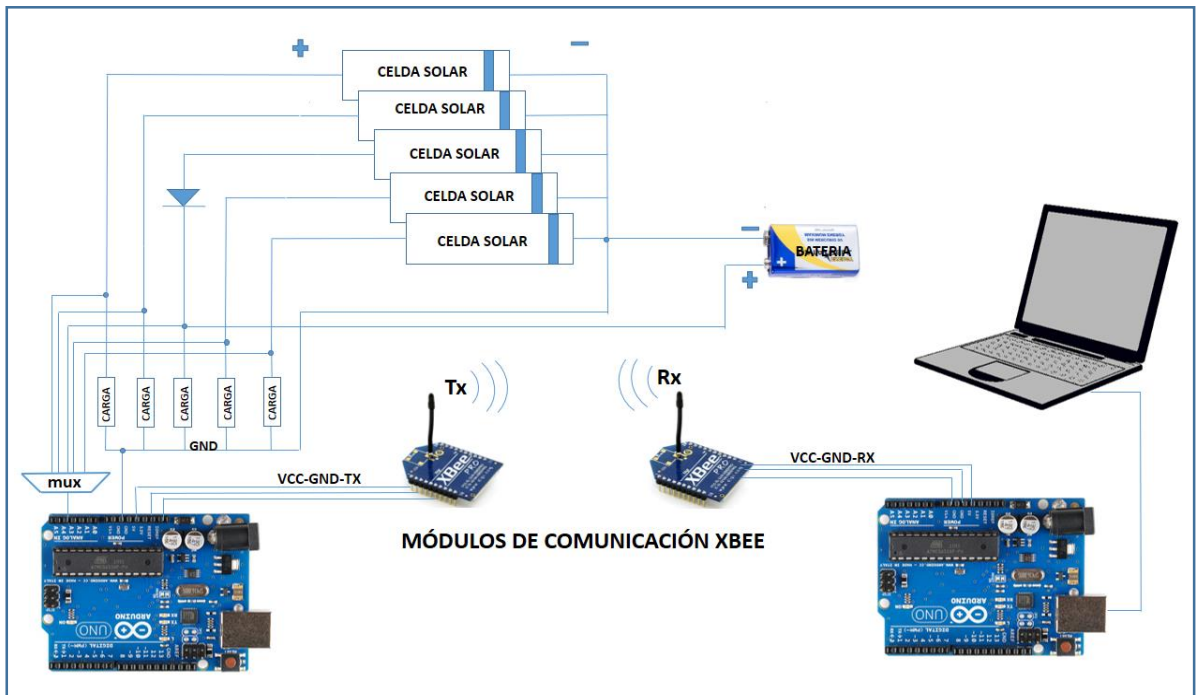


5.2 ESQUEMA DE CONEXIÓN GENERAL PARA LOS MODELOS EXPERIMENTALES

El esquema general de conexión presenta de forma específica el esquemático de la interconexión entre los diferentes elementos de los dos prototipos experimentales. (Ver figura 34).

Los módulos principales son: arreglo de celdas solares con su respectiva carga, multiplexor, tarjetas arduino, módulos de comunicación, batería o alimentación, almacenamiento de datos y visualización de datos (computadora).

Figura 18. Esquema conexión general



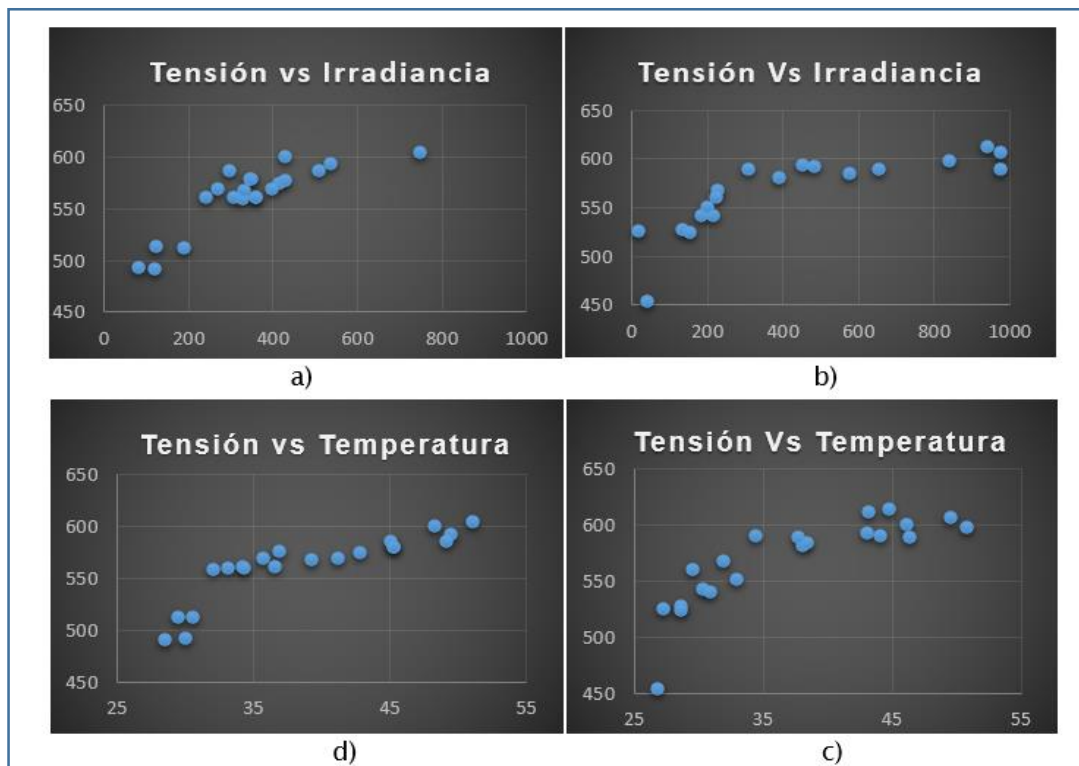
5.3 CARACTERIZACIÓN DE LA CELDA SOLAR

La celda solar se caracterizó con el fin de comprobar los datos proporcionados por el fabricante tales como, tensión de circuito abierto, corriente de corto circuito, temperatura, entre otras. También se obtuvo las curvas características de cada una de ellas respecto a la irradiancia, las cuales proporcionan información importante para el diseño del prototipo entre las más importantes están las limitantes, rangos de trabajo, temperaturas críticas y parámetros de diseño.

Para la respectiva caracterización se realizó el montaje mostrado en la figura 29, sección 4.4.2.

5.4.1 Prueba de temperatura y tensión. Durante los días miércoles 29 y jueves 30 de junio respectivamente (ver figuras 36 y 37) se realizaron pruebas a la celda obteniendo datos de temperatura y tensión de circuito abierto, con el objetivo de conocer los rangos de temperatura en el cual podría operar el sistema de medida. se obtuvo temperaturas desde 26,9 °C hasta 50,8 °C con media aritmética de 34,32 °C, se obtuvo una tensión de circuito abierto (V_{oc}) de 615,7 [mV] y una corriente de corto circuito (I_{cc}) de 48,4 [mA], también se tuvo en cuenta los datos de irradiancia solar y temperatura ambiente tomados por la estación meteorológica Davis Vantage pro2. Figura 39.

Figura 35. a) Tensión de circuito abierto vs irradiancia del día miercoles. b) Tensión de circuito abierto vs irradiancia día jueves. c) Tensión de circuito abierto vs temperatura día miercoles. d) Tensión de circuito abierto vs temperatura día jueves



Las gráficas obtenidas en la figura 35 son similares a la que proporciona el fabricante (ver figura 11), podemos observar que a medida que la irradiancia aumenta la tensión también aumenta; excepto en los momentos que aparece una nube o sombra.

Al comparar los datos podemos observar los siguientes aspectos:

1. La mínima tensión para el fabricante es aproximadamente 425 [mV] y para nuestra medida experimental fue de 405 [mV].
2. La tensión para la irradiancia 1000 del fabricante es aproximadamente de 630 [mV] y para nuestra medida experimental fue de 615,7 [mV].
3. Al realizar los porcentajes de error con varios datos observados en la gráfica del fabricante tomada como teórica y los datos tomados experimentalmente nos resulta un error promedio de 4,78%.

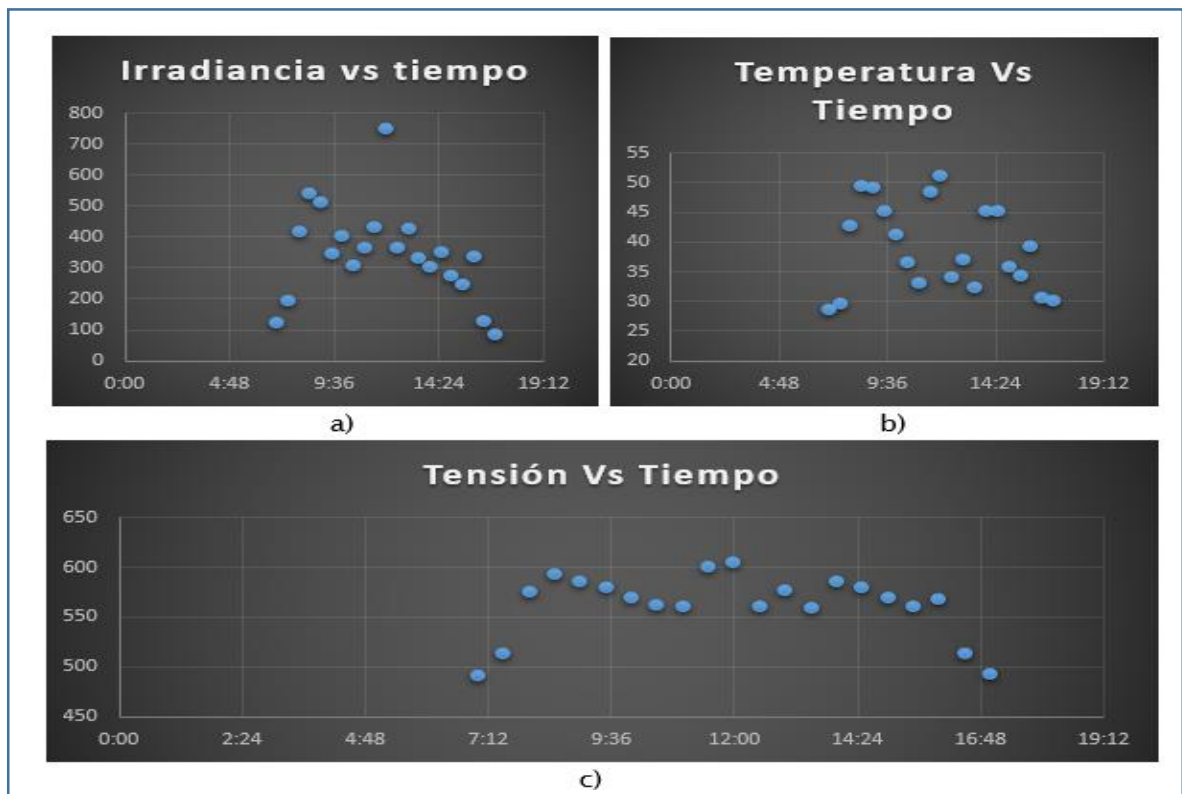
La gráfica obtenida experimentalmente presenta un comportamiento muy similar a la proporcionada por el fabricante, aunque tiene ciertas desviaciones debido a las variaciones climáticas y otros factores que alteran la medida.

Al ver las gráficas de tensión vs temperatura obtenidas, con respecto a la que nos brinda el fabricante (ver figura 11b, sección 4.1) se observa que son totalmente distintas; mientras en la gráfica del fabricante la tensión baja con respecto a la temperatura con comportamiento lineal para nuestras medidas experimentales la tensión aumenta hasta un límite de 50 °C a partir de allí la tensión de circuito abierto empieza a disminuir.

Las gráficas obtenidas fueron tomadas durante dos días distintos, de 7 am a 5pm, encontrando temperaturas desde 26°C hasta 50°C. De acuerdo a estas medidas solo es posible argumentar que la tensión aumenta con respecto a la temperatura.

Encontramos que la gráfica solo es aceptable para temperaturas menores a 50°C y a temperaturas mas elevadas la tensión empieza a disminuir. Sin embargo, para el caso de la zona donde se realizaron las medidas, en el municipio de Piedecuesta-Bucaramanga, es poco probable que la temperatura sea tan alta para tenerlo en cuenta.

Figura 19. a) Gráfica irradiancia vs tiempo. b) Gráfica temperatura vs tiempo. c) Gráfica tensión vs tiempo



Durante un día se puede encontrar variaciones de irradiancias solares al igual que la temperatura y la tensión, en las tres gráficas podemos reconocer un mismo patrón, el cual nos muestra que la tensión e irradiancia empieza a aumentar su valor a medida que pasa el tiempo hasta llegar a un valor máximo cerca del mediodía y luego empieza a disminuir hasta caer la tarde. La figura 36(a) representa claramente el patrón mencionado.

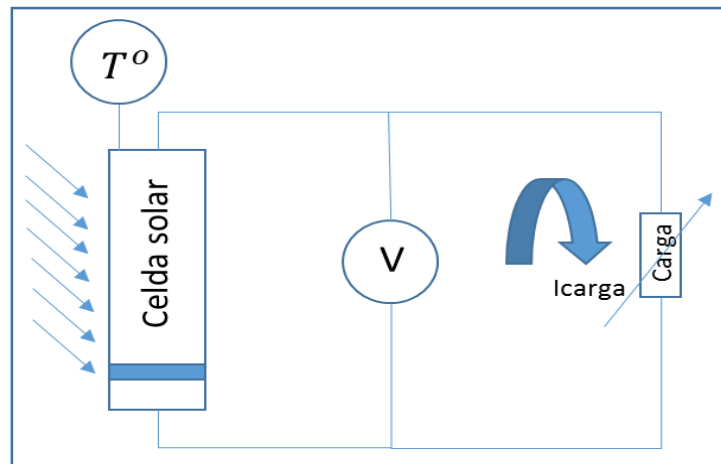
En algunas ocasiones puede que exista cambios y se encuentre valores máximos en una hora distinta, pero se puede notar en que la mayor irradiancia que se de en ese día es menor a la que se pueda dar en un día soleado; esto se presenta en un día nublado o lluvioso. También puede que en el mismo día se presenten variaciones como en la figura 36(b) que es cuando existen varias nubes en la trayectoria del sol.

En la figura 36(c) se observa que el máximo valor lo encontramos justo al medio día, la tensión oscila, pero idealmente se espera gráficamente la forma de una campana.

5.4.2 Prueba para la selección de la resistencia en zona deseada (figura 24, sección 5.3.5). Esta prueba se realizó durante un día empezando a las 7am y terminando a las 7pm, tomando datos de corriente, tensión y temperatura en la celda con intervalos de media hora, obteniendo en total 21 graficas, llegando a la caracterización de la celda con cargas que van desde 0 ohm hasta 2880 ohm. Se tendrán curvas de corriente vs tensión de diferentes resistencias y se observará el comportamiento con el fin de escoger una carga específica con la cual se realizará el sistema de medición. Durante la prueba también se tendrá la medida de

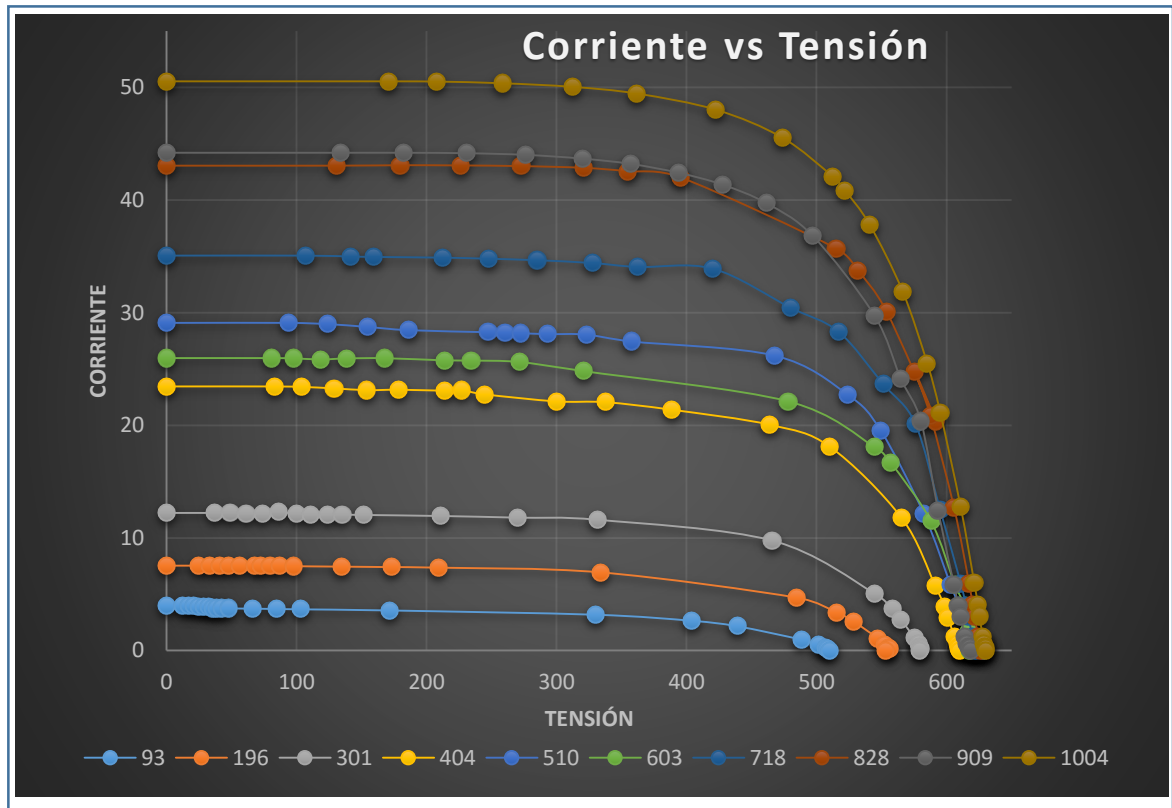
irradiancia solar que toma la estación meteorológica Davis Vantage Pro2, que se encuentra instalada en la terraza del edificio de investigaciones, en el parque tecnológico Guatiguará de Piedecuesta figura 39. El circuito de medida es el mostrado en la figura 37.

Figura 20. Circuito para medición caracterización curvas de irradiancia



5.4.3 Prueba de obtención de curvas de corriente vs tensión a partir de un arreglo de diferentes valores de resistencias. Durante esta prueba se obtuvieron graficas de corriente vs tensión para diferentes irradiancias y en la figura 38 se muestran algunas de las más representativas y significativas. Esta prueba fue realizada el día 7 de julio del 2016. En la gráfica podemos observar que para resistencias comprendidas entre 0 y 10 ohms la corriente que proporciona la celda es prácticamente la misma y después va cayendo al punto de tensión de circuito abierto para resistencias mayores, teniendo una corriente prácticamente cero en 2000 ohm.

Figura 38. Curvas de corriente vs Tensión a diferentes valores de irradiancia



El arreglo de resistencias comprendía los valores de resistencias (ohms): 2.5, 3.5, 4.5, 5.5, 6.6, 7.6, 8.6, 9.6, 10.6, 12.1, 17.1, 22.3, 27.4, 47.1, 102.7, 151.1, 201.4, 499.1, 996.8, 1999.8, 2991.8. Las medidas de tensión y corriente fueron tomadas en aproximadamente 50 segundos para abarcar todos los valores de resistencias y la medida de irradiancia solar fue tomada por la estación meteorológica Vantage Pro2 cada minuto.

De las diferentes curvas se observó un rango de 0 a 10 ohms donde la curva permanece constante y del cual se pudo elegir una resistencia, por disponibilidad se obtuvo una resistencia de precisión de 5,12 ohm.

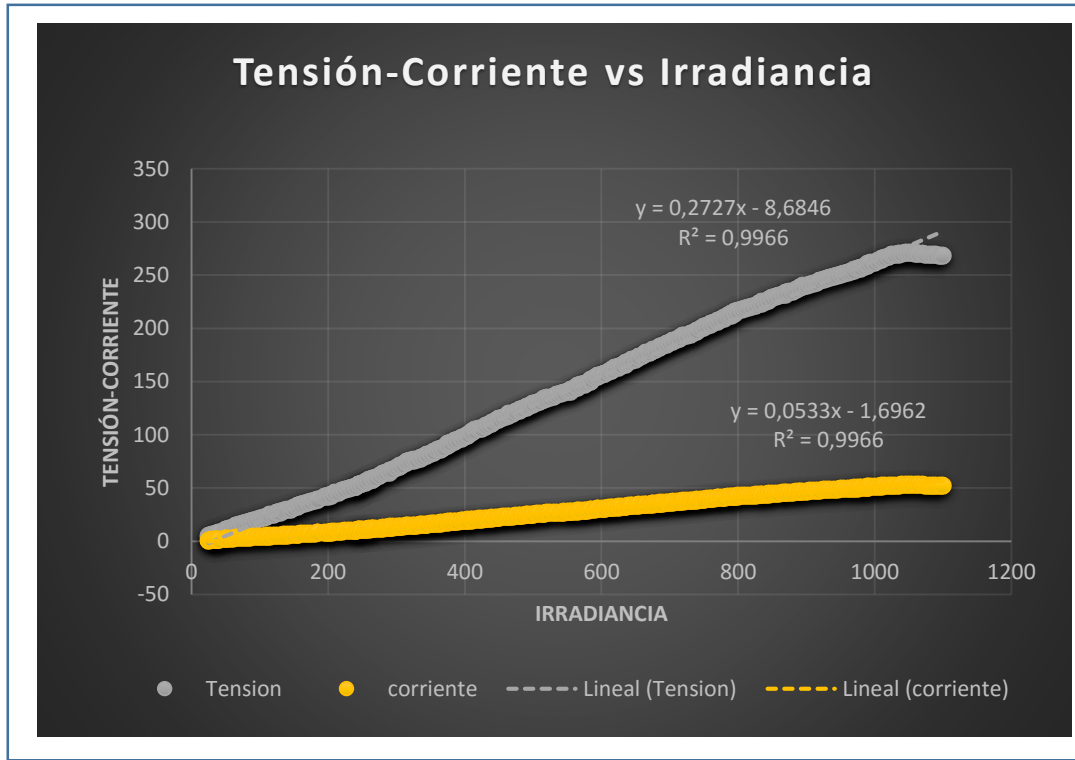
5.4.4 Caracterización de la tensión vs irradiancia con la resistencia seleccionada de 5,12 Ω . Para la caracterización de la tensión y corriente con respecto a la irradiancia a una respectiva temperatura se tomaron datos durante varios días con la necesidad de tener una tabla que satisfaga una buena aproximación. Se documentaron 286 datos empezando en una irradiancia de 25 hasta llegar a 1100 con intervalos de 5, para tener estos datos en una tabla se aproximaron los datos al más cercano múltiplo de 5, los datos de irradiancia se tomaron con la ayuda de la estación meteorológica Vantage Pro2 ubicada en la sede Guatiguará de la Universidad Industrial de Santander. Ver figura 39. El software de la mencionada estación permite la toma de datos en un intervalo mínimo de 1 dato por minuto dentro de las características esta la medición de la radiación solar, temperatura, velocidad del viento, pronóstico de lluvia entre otros.

Figura 39. Estación meteorológica DAVIS VANTAGE PRO2



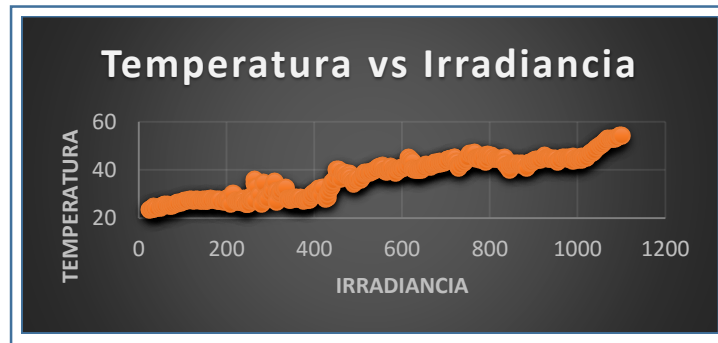
Se realizó la toma de 3 mediciones por minuto para obtener una mayor resolución y proximidad a la medida real, tomando datos de tensión, temperatura e irradiancia solar. Esta tabla se puede observar en el anexo 3 y la representación gráfica en la figura 40.

Figura 21. Caracterización tensión-corriente vs irradiancia



En la figura 40 se observa el comportamiento de tensión medida en la celda solar con respecto a la irradiancia solar. Cuya curva se caracterizó con el fin de que al momento de obtener la información de la mayor irradiancia solar simplemente el usuario se limite a observar la tabla y los datos obtenidos en el momento y por medio de la tabla del anexo 3 o la figura 40 obtenga a partir del dato de tensión un dato de irradiancia correspondiente y se concluya en qué lugar, en cual celda y en qué dirección se está obteniendo la mayor irradiancia solar en cualquier momento del día u hora del día. ver anexo 1. Además, encontramos también el comportamiento de corriente respecto a la irradiancia que muestra un comportamiento similar lineal.

Figura 41. Temperatura vs irradiancia



Como se observa en la figura 41 a medida que la irradiancia aumenta la temperatura también aumenta, dejando claro que en ocasiones se observan variaciones a causa de la presencia de un sombreado u ocurre el paso de una nube o sombra. El cambio de temperatura se hace lento respecto a la variación de la radiación depende de la sensibilidad del instrumento, pero aun así cuando se tiene un aumento de temperatura el proceso por lo general es lento lo mismo que al disminuir la temperatura, en ocasiones el material base tiende a actuar como aislante de la temperatura y adquiere también un calentamiento y como las celdas están sobre este tipo de material presentan también una pequeña variación.

5.3 RESULTADOS DE LA MEDICIÓN DE IRRADIANCIA SOLAR A PARTIR DE LOS PROTOTIPOS EXPERIMENTALES 1 Y 2

La interpretación de datos se realizará por medio de Excel con el software PLXDAQ que se encarga de graficar en tiempo real los datos tomados por el sensor provenientes del pin de lectura del ARDUINO UNO, este software tabula en tiempo real los datos tomados y grafica cada uno de ellos permitiendo observar el comportamiento de la corriente, tensión, potencia e irradiancia en cada una de las celdas solares. Además, se realiza un mapeo con los datos obtenidos con la ayuda

de MATLAB, este mapeo permite visualizar el recorrido solar o el valor de irradiancia en cada una de las 5 celdas del prototipo, es decir, permite visualizar mediante gráficas cómo varía el comportamiento de irradiancia solar durante el día dando información de cual celda y en qué hora específica se cuenta con la mayor intensidad de irradiancia solar.

5.5.1 Prototipo experimental 1. A continuación, se observa las gráficas de la prueba realizada con el prototipo experimental 1 como se muestra en la figura 42, los datos de la figura 43 corresponden a una prueba realizada durante del día aproximadamente desde las 7 am hasta las 5 pm en la sede Guatigará de la universidad industrial de Santander, los datos de tensión fueron transmitidos y recibidos, mediante el software PLX-DAQ en EXCEL, se tabuló y graficó en tiempo real los datos recibidos de cada celda solar en un intervalo de 30 segundos, se tomaron alrededor de 1000 datos durante la prueba.

Figura 42. Distribución celdas solares prototipo experimental 1

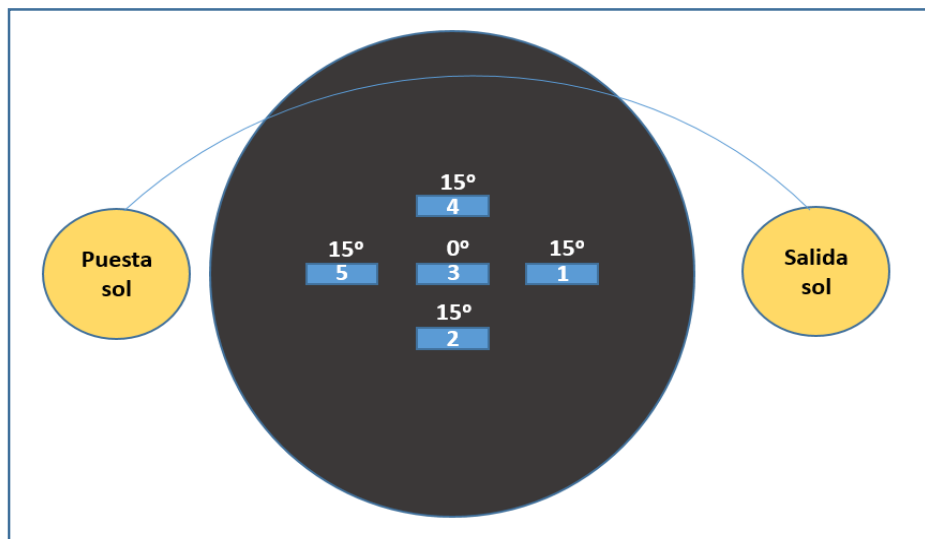
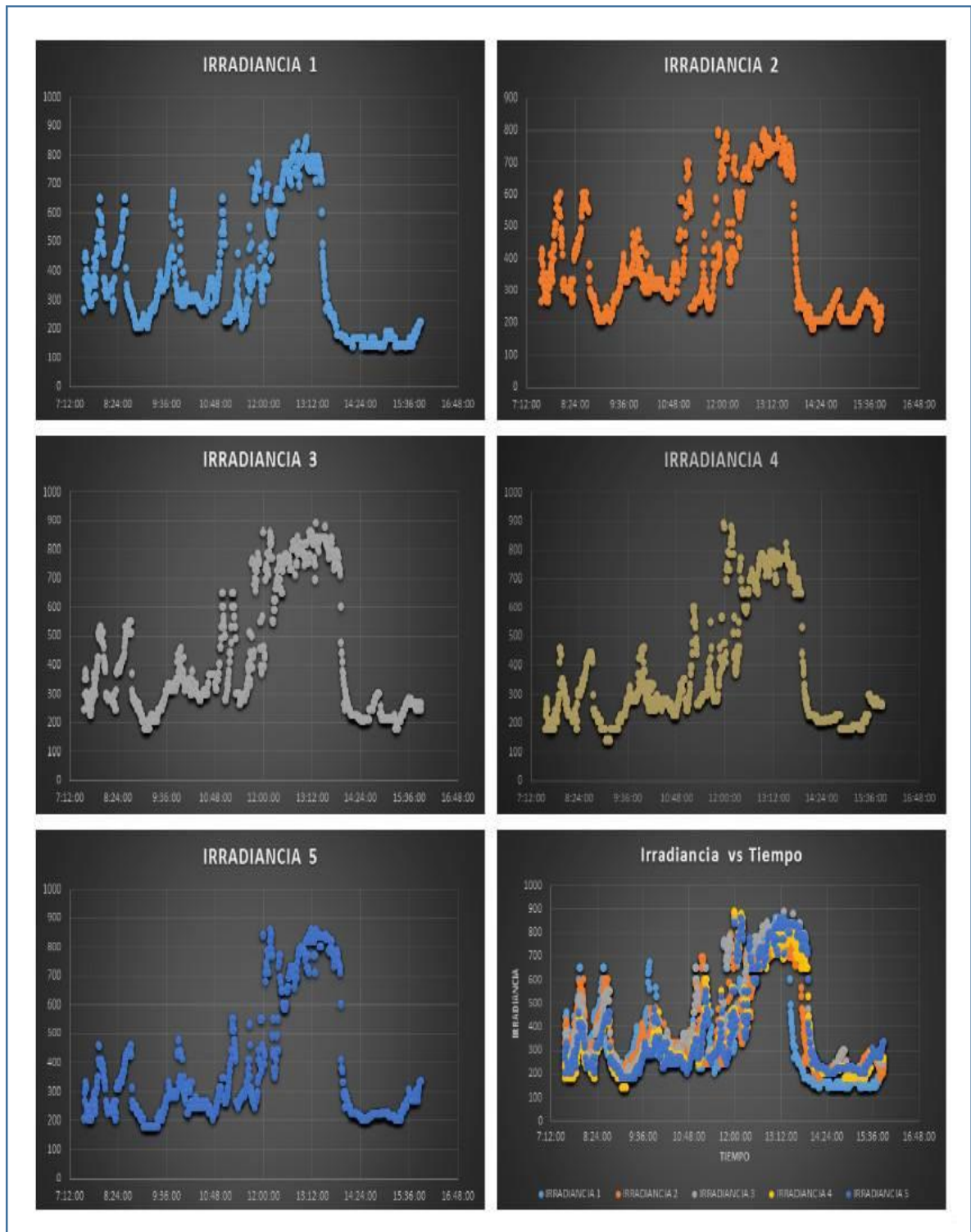


Figura 43. Gráficas de irradiancia vs tiempo prueba prototipo 1



De la prueba realizada se obtiene el dato de tensión de cada celda, para asociar este dato de tensión a su correspondiente en irradiancia se utiliza la tabla caracterizada que se encuentra en el anexo 3 con la cual se puede comparar y asociar un dato de tensión a un dato de irradiancia correspondiente.

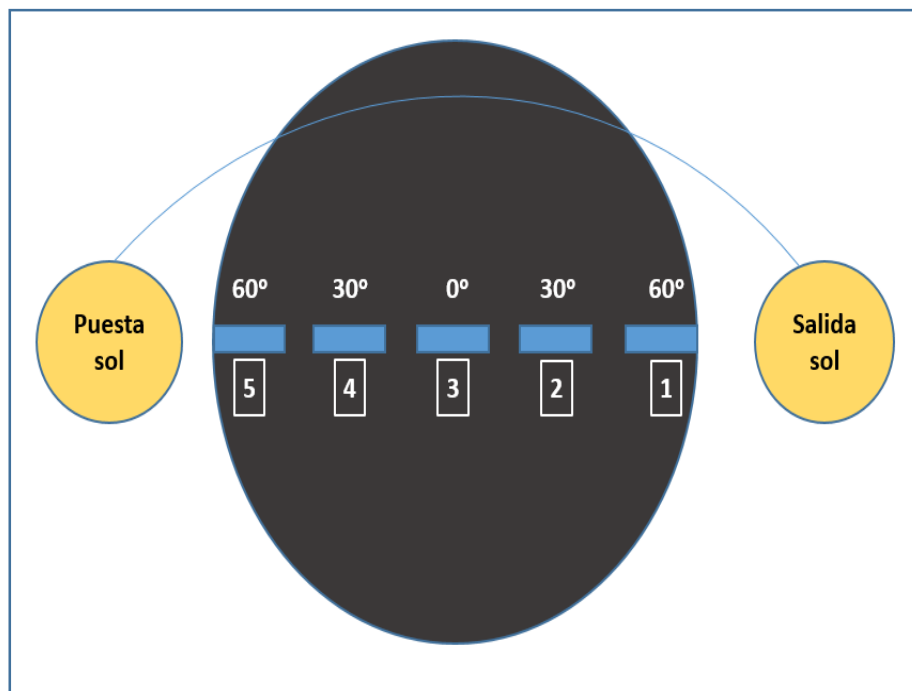
Por medio de la interfaz PLX-DAQ en Excel donde tabulan y grafican los datos en tiempo real se puede observar a qué hora del día se presenta el mayor dato de tensión, es decir el mayor dato de irradiancia solar, en que celda se presentó y con qué orientación e inclinación.

Con los datos y las gráficas de la figura 43 se comprueba el comportamiento esperado donde inicialmente en horas de la mañana la celda 1 recibe mayor irradiancia en comparación con la celda 5, y viceversa en horas de la puesta del sol, en la parte central conformada por las celdas 2,3 y 4 se observa esperen pequeñas variaciones sin embargo la celda 3 prevalece en promedio manteniendo el mayor dato de irradiancia solar, la celda 2 y 4 presentan un comportamiento similar.

En este caso el máximo de valor de irradiancia durante el día de prueba fue de 890 $[W/m^2]$ dados por la tercera y cuarta celda del arreglo experimental, y el promedio de mayor irradiancia solar fue de 375,415 $[W/m^2]$ dado por la celda tres ubicada a cero grados, es decir la celda central.

5.5.2 Prototipo experimental 2. La prueba con este prototipo se realizó de manera similar que el anterior caso, pero con una distribución de las celdas solares como se observa en la figura 44.

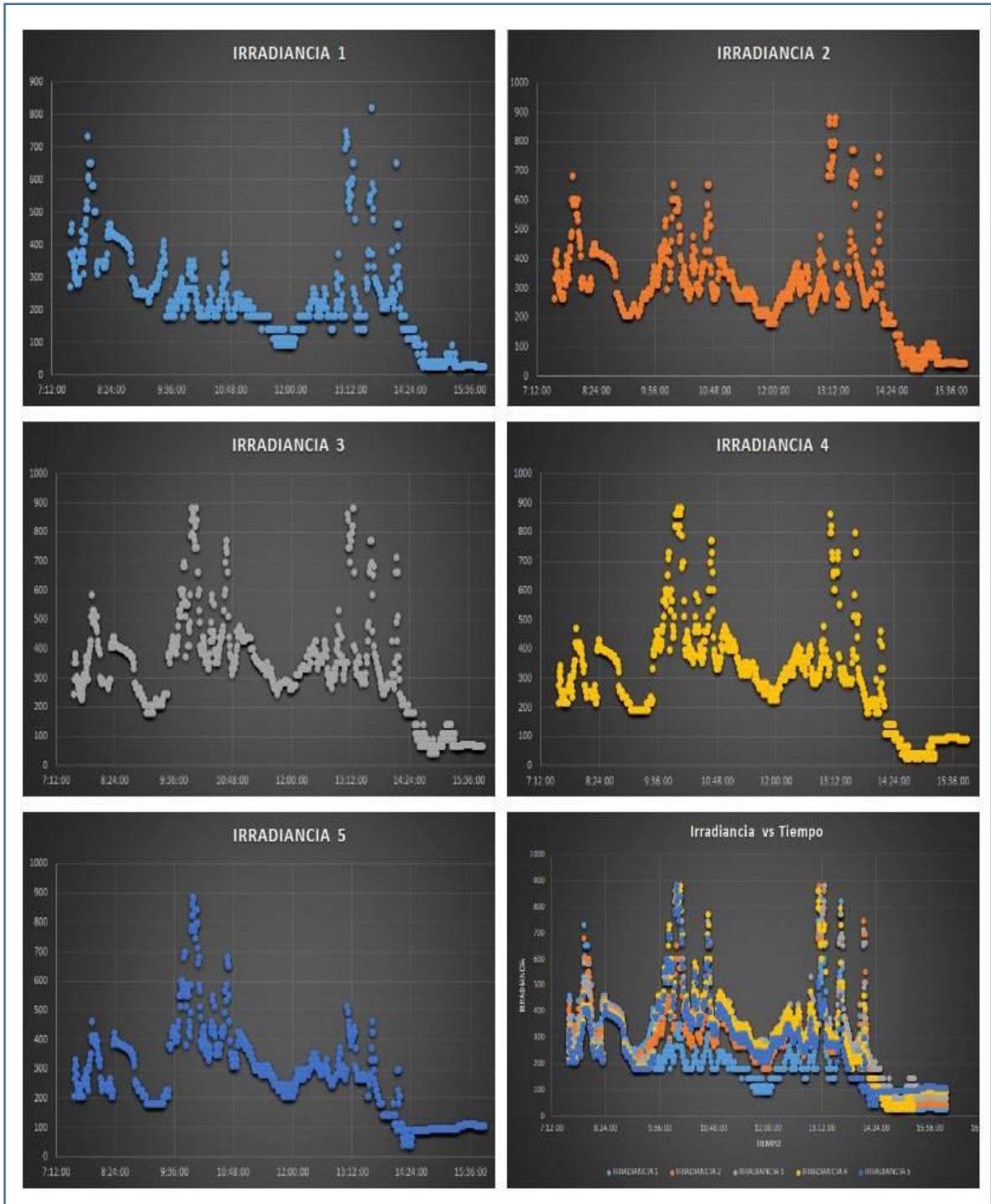
Figura 22. Distribución celdas solares prototipo experimental 2



Con los datos obtenidos y las gráficas de la figura 45 se comprueba también el comportamiento esperado para este prototipo donde inicialmente en horas de la mañana la celda 1 recibe mayor irradiancia en comparación con la celda 5, y viceversa en horas de la puesta del sol, lo mismo sucede en la comparación de la celda 2 con la 4, la celda central prevalece en promedio manteniendo el mayor dato de irradiancia solar.

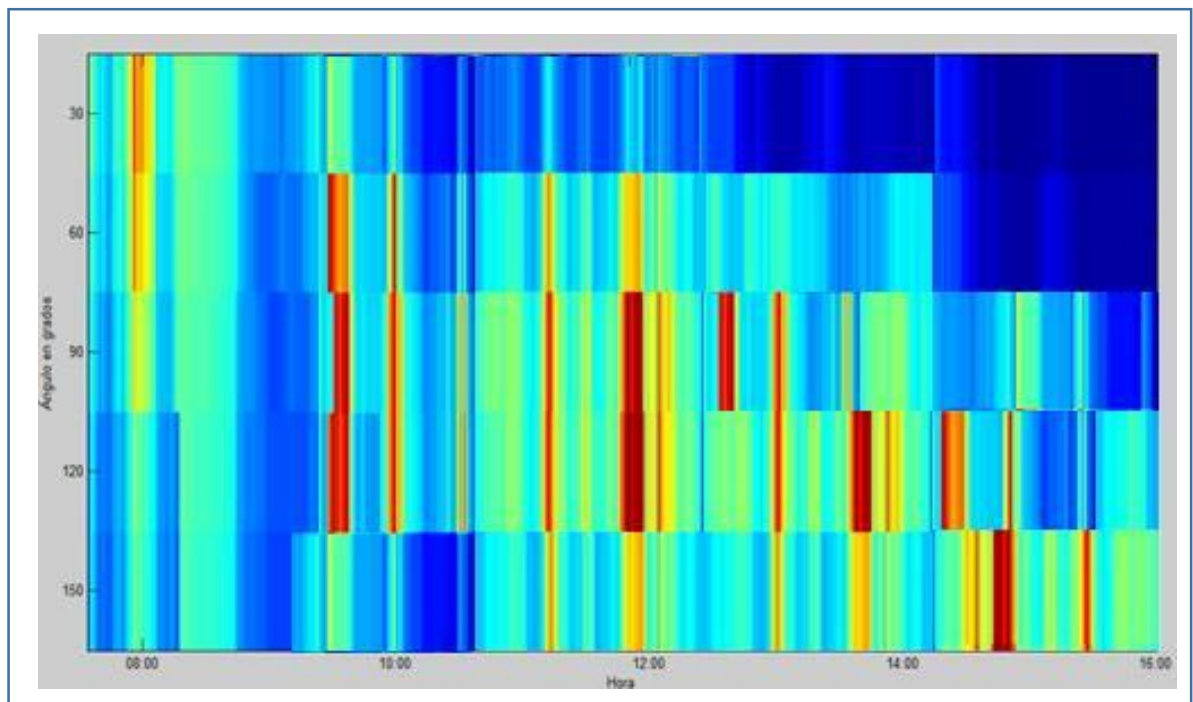
En este caso el máximo de valor de irradiancia durante el día de prueba fue de 885 $[W/m^2]$ dados por la tercera celda del arreglo experimental es decir la celda central, y el promedio de mayor irradiancia solar fue de 320,014 $[W/m^2]$ también dado por la misma celda.

Figura 45. Gráficas de irradiancia vs tiempo prueba prototipo 2



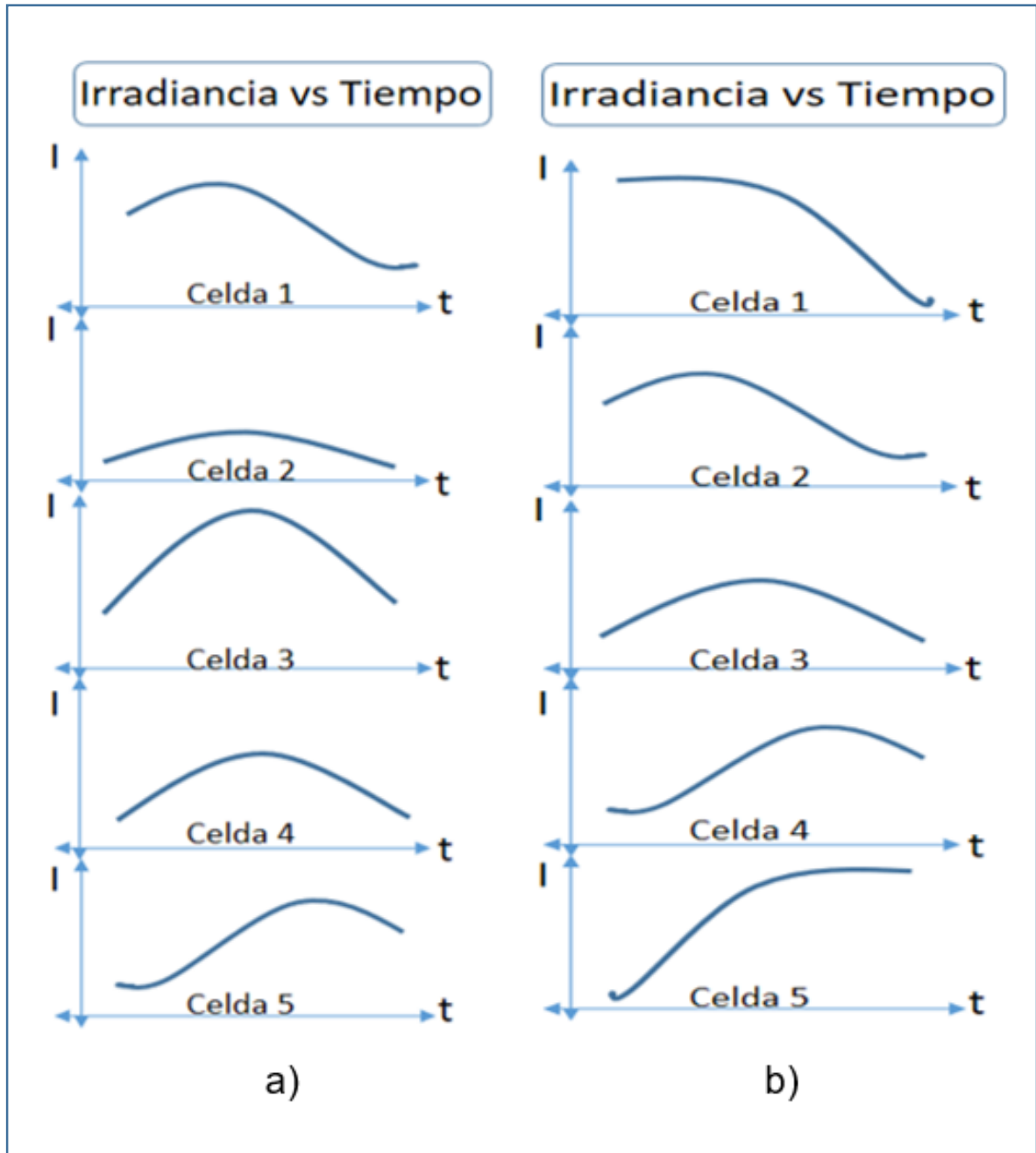
Para comprobar el comportamiento característico de la irradiancia respecto al tiempo, se realizó un mapeo en Matlab, donde se muestra con un barrido de colores la intensidad de radiación solar que recibió cada celda a lo largo del día (Ver figura 46). En las horas de la mañana como se esperaba la celda 1, 2 y 3 reciben en mayor proporción parte de la irradiancia, cerca del medio día la celda 3,4 reciben mayor irradiancia comparado con las celdas 1, 2 y 5, y finalmente cerca de la puesta del sol en horas de la tarde se recibe mayor intensidad solar en las celdas 4 y 5, después de la puesta de sol aparecen inactivas todas las celdas debido a baja intensidad de radiación solar. se debe tener en cuenta la variabilidad de los datos ya que el día en que se realizó la medición, presentó en horas de la tarde intervalos de lluvia y nubosidad.

Figura 46. Simulación en Matlab obtención del espectro o irradiancia solar respecto al tiempo



5.5.3 Comparación de prototipos experimentales 1 y 2

Figura 47. Curvas características idealizadas del comportamiento de irradiancia. a) Prototipo experimental 1. b) Prototipo experimental 2.



En la figura 47 se observa el comportamiento esperado o idealizado de los prototipos planteados, la diferencia entre ambos modelos radica en la resolución de la medida, es decir, en la orientación e inclinación de cada una de las celdas solares.

Con el enfoque principal del prototipo 1, se puede detectar solar con dos grados de libertad. Es decir, de este a oeste y de norte a sur, dependiendo de la época del año donde el sol toma cierta ruta sobre la tierra, según, si es solsticio de verano, equinoccio o solsticio de invierno. Por tal motivo la celda 2 con respecto a la celda 4 del prototipo1 detectará más o menos irradiancia.

El prototipo 2 está enfocado en la detección de la irradiancia solar describiendo un patrón durante la medición, con el cual se puede observar el cambio de radiación solar a medida que pasa el tiempo. Describe un comportamiento más lineal debido a la distribución de las celdas solares.

6. FUENTES DE ERROR

Durante la toma de datos se encontraron factores que afectan en cierta parte la obtención de un dato no erróneo o que no presente desviación respecto a la medida esperada. Factores como sincronización de medida, velocidad del viento, humedad, sombras, cambios drásticos de temperatura, niveles críticos o máximos de temperatura, ubicación del prototipo, nivelación del terreno base, entre otros, teniendo en cuenta que ambos instrumentos miden la radiación global, es decir al radiación directa más la radiación difusa. Dentro de los principales aspectos de medición donde se encontró error en la medida fue:

Tabla 12. Porcentaje de error pruebas realizadas

Porcentaje de error pruebas de medición	
Prototipo experimental vs. Estación meteorológica Davis Vantage por2.	Presenta un porcentaje de error del 0,89% en la medición de irradiancia.
Uso de multiplexor vs. Uso sin multiplexor	Presenta un porcentaje de error del 1,2% en la medición de tensión.
Arduino vs. Multímetro fluke 179 lab. Sede Guatiguará	Presenta un porcentaje de error del 1.39% en la medición de tensión.

El prototipo tiene una sensibilidad de medición de irradiancia de 5 [W/m^2], durante la medición se realizaron tomas con intervalos múltiplos de cinco donde se aproximaba el valor más cercano, por ejemplo, una irradiancia de 583 [W/m^2] se aproximaba a 585 [W/m^2]. Ver tabla del anexo 3.

7. ESTUDIO DE PATENTABILIDAD

Actualmente los dispositivos que miden la irradiancia solar o potencia de la luz solar, dando medidas de radiación directa, radiación difusa o ambos aspectos como la radiación global son llamados Así:

- a) Piranómetro: Mide radiación solar global.
- b) Pirheliómetro: Mide la radiación solar directa.
- c) Actinógrafo o piranógrafo: Mide la radiación solar global, directa y difusa.

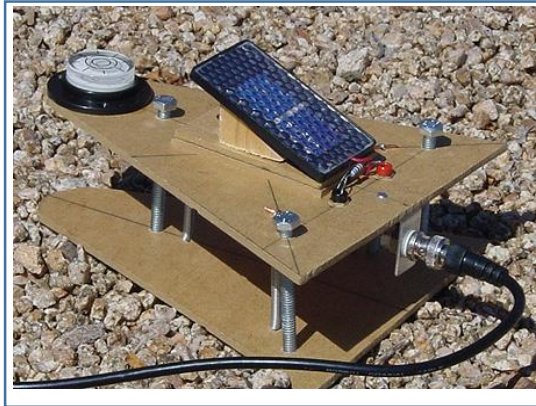
Existen algunos dispositivos basados en sensores de termopila que utilizan un termopar, pero son muy costosos y dentro de la familia de los piranómetros menos costosos están los de "efecto de fotovoltaicos", tales como sensores que utilizan una pequeña célula de silicio.

1. Como primer sistema de medición similar al presente proyecto de investigación es el encontrado en la página de internet "consulente energía" [20].

Consiste en un Piranómetro de efecto fotovoltaico muy simple y se puede hacer con unos veinte euros, ya que se trata de comprar muchas células fotovoltaicas pequeñas del tamaño de unos pocos centímetros que se venden en línea, como se muestra en la figura 48. De hecho, la célula PV, produce una corriente proporcional a la radiación que los golpea, así que puede medir esta corriente directamente con un probador o el voltaje a través de una resistencia de 500 ohm, que debe dar 0,1-0,2 V en su totalidad la luz

del sol. La celda, simplemente está sobre la madera de manera que se puede colocar en paralelo al suelo (si se desea medir la radiación solar, que se define como un valor medido en un plano horizontal) o tal vez paralela a un verdadero panel fotovoltaico y de su propia instalación doméstica (con el fin de medir la potencia en W / m^2 "vista", precisamente por su sistema). [20]

Figura 48. Piranómetro plano fotovoltaico



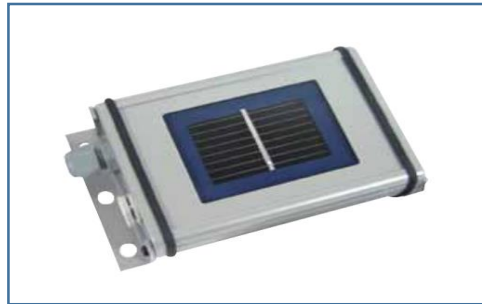
Fuente: Consultante energía, 2009 [20]

2. Un segundo dispositivo es el encontrado en "KACO" (ver figura 49) que es un sensor solar que se utiliza para el control profesional de una instalación fotovoltaica. La irradiancia medida se puede utilizar para determinar el rendimiento esperado de un sistema fotovoltaico, que luego puede ser comparado con el rendimiento real.

Los sensores Si-12TC utilizan un solar monocristalino de células (de la empresa Schott Solar), que es operado por una baja impedancia resistor en el corto circuito. Todos los sensores están equipados con compensación de temperatura activa. Esto significa que la precisión de la medición se incrementa con la ayuda de un sensor de temperatura especial que va

alojado en la parte trasera de la célula solar. Cada sensor individual se calibra con un piranómetro y es un proceso que tiene que hacerse con regularidad.

Figura 49. Sensor de irradiación “Kaco



Fuente: kaco-newenergy [29]

La célula laminada se integra en una carcasa de aluminio con recubrimiento de polvo. [29]

3. Otro ejemplo es el del grupo de investigación GIDER de argentina, Hasta hace pocos meses, los valores de radiación solar difusa del norte argentino se debían obtener con programas de simulación. Ahora será posible obtener los valores reales mediante un equipo desarrollado por investigadores de la Universidad Nacional del Nordeste. Esos valores son de utilidad para el desarrollo de tecnologías relacionadas con los paneles fotovoltaicos, los calefones y las cocinas solares, entre otros dispositivos. los investigadores de GIDER han construido un solarímetro (ver figura 50) que mide lo que se conoce como radiación solar difusa. se le colocó una cinta metálica tipo parasol, que le da sombra permanentemente al sensor y mide de esta manera la radiación solar difusa.

El instrumento se encuentra instalado sobre un muro a 15 metros de altura en el Departamento de Termodinámica de la Facultad de Ingeniería.

Los valores medidos de radiación difusa, así como también los de radiación solar total, se graban y almacenan en una PC cada 10 minutos, siendo la unidad de medida de ambas magnitudes el watt/m² (cantidad de energía por unidad de área). Este equipo se colocó en mayo de 2010 y estuvo en período de prueba y calibración hasta febrero de 2011, y a partir de allí empezó a medir en forma confiable [30].

Figura 50. Proyecto solarímetro grupo GIDER

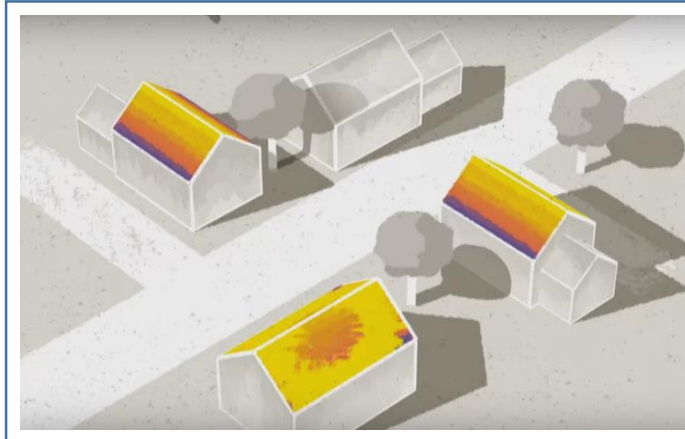


Fuente: Divulgación y cultura científica Iberoamericana [30]

4. También se lanzó el proyecto SUNROOF (ver figura 51) por google que tiene como objetivo mostrar los beneficios de instalar paneles solares en los tejados, basado en el potencial de google Maps, sistema de posicionamiento global y satélites; aprovechando el beneficio de la tecnología existente este proyecto ya está en funcionamiento en pequeñas regiones de estados unidos, el proyecto busca proporcionar información a todas las personas,

busca el ahorro de energía y disminuir las emisiones de carbono y financiar el mayor parque solar en África. [31]

Figura 51. Proyecto SUNROOF de GOOGLE



Fuente: FAYERWAYER [31]

Proyecto SUNROOF calcula la cantidad de luz solar que llega a los techos en un año. Se tiene en cuenta:

- Base de datos de Google de imágenes aéreas y mapas
- Modelado en 3D del techo
- Las sombras proyectadas por las estructuras y los árboles cercanos
- Todas las posibles posiciones del sol en el transcurso de un año

Patrones históricos de nubes y temperatura que podrían afectar a la producción de energía solar. [32] El objetivo de google es ayudar a conocer la cantidad de energía solar que podrías utilizar en tu casa, y por qué no, ofrecer un instalador o empresa recomendada para esa instalación. [33]

Con estos datos, SUNROOF recomienda el tamaño de instalación que se debe montar en casa para poder generar el 100% de tu consumo de electricidad con energía solar para calcular los costes y poder saber de una forma sencilla si es rentable o no. [33]

5. Existen además proyectos similares al de google uno destacado en Chile denominado proyecto Mapdwell, La herramienta analiza la exposición solar de los techos de tu ciudad e identificar cuáles son los mejores puntos para instalar paneles solares y generar energía. Es abierta y gratuita, cualquier vecino puede identificar si su techo es un buen polo para generar energía y aprovechar la cogeneración, donde los dueños de casa podrán producir energía renovable desde paneles solares, eólicos u otros, y ocupar dicha energía para autoconsumo o inyectarla a la red recibiendo un pago por parte de los distribuidores del sistema eléctrico [34]

6. En México se crea también una nueva tecnología que calculará la radiación solar en vialidades con potencial uso en autos eléctricos basado en google Maps. [35]

Cada uno de los proyectos mencionados están basados sistemas de control, de GPS, sin ningún dispositivo como tal de medida como el que actualmente estamos realizando o si cuentan con el dispositivo, se diferencia en gran medida con el propuesto.

8. DISCUSIONES Y CONCLUSIONES

- Este trabajo presenta el diseño de un dispositivo capaz de medir la irradiancia solar según la inclinación y orientación de las celdas solares sobre un domo; capaz de detectar la mayor medida de irradiancia en cierta celda solar del domo, bajo ciertas condiciones, en determinada hora y en cualquier lugar. Se logró realizar el diseño como se esperaba, un diseño eficiente, sencillo y económico.
- En este trabajo se propone una nueva forma de emplear las celdas solares para la estimación de la irradiancia solar en un lugar determinado utilizando materiales de fácil adquisición. Este nuevo método permite no sólo conocer el mayor valor de irradiancia, sino emplearse en estudios de aprovechamiento energético y en estudios de impacto global como por ejemplo el calentamiento global. La intensidad de luz que emite el sol, la dirección en el cual es mayor y en qué momento, es necesario tenerla en cuenta para su mayor aprovechamiento y fabricación de instrumentos más eficientes.
- El sistema de adquisición de datos, junto a la transmisión con los módulos Xbee del prototipo diseñado, facilita la medición de la irradiancia solar y la comunicación en cualquier lugar que se requiera. Además de que el dispositivo cuenta con un sistema de manejo para cualquier tipo de usuario.
- En una celda solar su tensión y corriente varía con respecto a la temperatura e irradiancia solar. A medida que aumenta la temperatura aumenta su corriente de fuga y disminuye su tensión, al igual que en casos extremos de temperaturas

altas, la tensión de circuito abierto disminuye considerablemente y la corriente de corto circuito aumenta.

- Al utilizar una carga junto a la celda solar cambia la curva de corriente vs. tensión moviéndose dentro de los diferentes rangos de la curva característica, por lo tanto, se debe medir la carga y verificar que se esté trabajando en la zona de comportamiento lineal o constante para ser caracterizada correctamente. Al tener la carga caracterizada y seleccionada podemos asegurar el correcto funcionamiento, comportamiento y podemos movernos en diferentes medidas de corriente y de tensión sin riesgo de tomar una medida errónea.
- Los dos modelos planteados para el diseño general del prototipo cubren dos requerimientos esenciales teniendo en cuenta cualquier tipo de región geográfica, es decir lugares donde presenten estaciones o no presenten, el caso 1 y caso 2 presenta una distribución ideal para estos escenarios y además presenta una resolución de medida optima barriendo los todos ángulos principales y las áreas optimas de medición.
- La diferencia del prototipo o sistema presentado, comparado con los existentes es que se enfoca en la detección de la mayor irradiancia solar en determinada dirección lo cual permite el mayor aprovechamiento de la energía solar en los puntos de mayor detección. Además, encontramos la sencilla fabricación del sistema, fácil manejo y reducidos costos.
- Durante la realización del diseño y las pruebas preliminares se pudo determinar que dar una medida exacta de irradiancia solar puede no ser tan importante, basta con dar una especificación de posición en el cual existe la mayor

irradiancia solar, he ahí donde se aprovecha de la mejor manera esta energía. Por tal motivo los porcentajes hallados en las pruebas realizadas no representan un problema significativo para el fin con el cual se diseñó el prototipo.

- La tabla elaborada en el anexo 3 permite al usuario del dispositivo determinar con facilidad que valor de irradiancia corresponde al respectivo valor de tensión que me entrega cada celda solar, es decir el sistema está caracterizado para asociar valores de tensión con valores de irradiancia en determinado tiempo.
- El prototipo permite realizar el mapeo de cualquier zona geográfica y establecer con precisión qué punto o celda solar está entregando el mayor dato de irradiancia solar y en qué dirección e inclinación se presenta, indispensable para la instalación de sistemas de aprovechamiento energético por ejemplo en parques solares y edificaciones.
- El prototipo diseñado tiene una resolución de medida de irradiancia de $5 [W/m^2]$ y abarca en total 12 rangos de ángulos de inclinación, aumentando la resolución de medida principalmente en la cúspide del domo.
- La comparación de los dos prototipos experimentales permite establecer los ángulos críticos donde la medida de irradiancia presente una variación significativa, tomar ángulos de 4 grados de diferencia, resulta ser buena resolución con una variación de irradiancia entre celda y celda de aproximadamente 2,75%, es decir un ángulo menor a 4 grados, resulta inútil ya que se estaría midiendo prácticamente el mismo dato por la distancia de separación entre las celdas, sobre todo en la cúspide del domo.

9. RECOMENDACIONES

- Inicialmente se realizó la medida de corriente con el sensor de corriente ACS714 que consta de un rango de corriente de +/- 5 [A], las pruebas con este sensor se hacen tediosas por tres razones: una es el costo de elaboración e implementación, la segunda razón es la resolución en la medida ya que se requerían mediciones para corrientes en el rango de los 50 [mA], y finalmente el multiplexado de corriente, el cual es costoso y representa un alto grado de dificultad y el proceso contaba con limitaciones para el sensado de corrientes de valores pequeños. Por tal motivo se recomienda el uso de un sensor con mayor resolución o sensibilidad, pero se debe tener en cuenta que el multiplexado se convierte en algo tedioso.
- Al realizar las medidas de tensión en la celda, se observó que para temperaturas mayores a 50°C la tensión empieza a caer. En nuestras mediciones esta variación no se tuvo en cuenta ya que, para el área de Bucaramanga, donde se realizaron las pruebas, es poco probable obtener esta temperatura en la celda.
- Durante las pruebas se observó que el material con el que estaba hecho el domo, absorbe calor y modifica las características de temperatura de cada celda, aumentando su temperatura considerablemente en comparación con una celda que este al aire libre, por ejemplo, sin base. Por esta razón es importante tener en cuenta en el diseño el tipo de material utilizado como base estructural tanto para soportar la intemperie como para que no modifique o afecte las características físicas de cada celda y por ende las mediciones o datos

obtenidos. Para el diseño se recomienda el uso de acrílico preferiblemente en color negro ya que este color refleja en menor proporción el espectro de luz solar.

- Tener en cuenta la resistencia interna de los instrumentos de medición. Durante las mediciones realizadas aparecieron incoherencias en la medida de corriente tomada, ya que no coincidía con lo esperado, se investigó a fondo y se encontró que los aparatos de medición contaban con una resistencia interna considerablemente alta la cual producía una caída de tensión y alteraba la toma de datos.
- El sistema propuesto puede presentar variaciones debido a la degradación de la celda y las temperaturas extremas. Se recomienda verificar o adecuar un sencillo sistema de ventilación para evitar el incremento de la temperatura y utilizar un tipo de celda más eficiente y que se degrade en menor proporción con respecto al tiempo.
- El software utilizado para la adquisición y visualización de los datos puede ser optimizado. Por ejemplo, si se trabaja con el mismo software en Excel PLX-DAQ, se recomienda realizar una modificación que permita al usuario simplificar la búsqueda del dato con mayor irradiancia a cierta hora si así se desea. Es decir, un comando o interfaz que permita al usuario introducir la hora del día y despliegue el dato de irradiancia en esa hora determinada de cada celda, y que además permita conocer el promedio de mayor irradiancia, en que celda se obtuvo, que inclinación y orientación presenta.
- Se recomienda realizar una aplicación móvil asociada al prototipo, con el fin de que permita al usuario interactuar en diversas facetas, tanto gráficamente como

asociar ubicaciones geográficas, en la detección y seguimiento GPS, transmisión directamente al celular, entre otras.

- En lugares donde la temperatura de la celda supere los 50 grados centígrados se recomienda implementar sistema de refrigeración, un ejemplo puede ser la disipación de calor por medio de tipos de pasta o papel la cual pueda ser aplicada dentro del orificio del domo donde se ubica la celda.

CITAS

- [1] MURCIA RODRÍGUEZ, Humberto, «Development of Solar Energy in Colombia and its Prospects,» *Revista de Ingeniería*, [En línea], 2008 nº28, pp. 83-89.
- [2] Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid, «Fundación de la Energía de la Comunidad de Madrid,» [En línea], Ciudad Madrid, 2009, [Consulta: 26 6 2015]. Disponible en: <https://www.fenercom.com/pdf/publicaciones/guia-de-la-energia-solar-fenercom.pdf>.
- [3] Colegio oficial de ingenieros de telecomunicación de andalucía occidental y ceuta (coitaoc) y la asociación de ingenieros de telecomunicación de andalucía occidental (asitano), «coitaoc y asitano,» [En línea]. 2002. [Consulta: 15 7 2015] Disponible en: http://www.coitaoc.org/files/estudios/energia_solar_fotovoltaica_2e5c69a6.pdf.
- [4] ARENAS, Danny Andres y ZAPATA, Steven Hodman, Libro interactivo sobre energía solar y sus aplicaciones, TECNÓLOGO EN ELECTRICIDAD, Pereira Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de tecnología programa de tecnología eléctrica, 2011.
- [5] GUEVARA VÁSQUEZ, Sixto, Estimación de la radiación solar. [En línea]. Lima, 2003, [Consulta: 17 8 2015], Disponible en: <http://www.bvsde.ops-oms.org/tecapro/documentos/miscela/iestimacionradiacion.pdf>.
- [6] STEVEN L. Brunton, CLARENCE W. Rowley, SANJEEV R. Kulkarni, and CHARLES. Clarkson. Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic

- Optimization Using Ripple-Based Extremum Seeking Control. [En línea]. 2010 Vol. 25 , nº 10, pp. 2531 - 2540, [Consulta: 13 11 2015] Disponible en: <http://faculty.washington.edu/sbrunton/papers/BrRoKuCI2010.pdf>.
- [7] ESTRADA GASCA, Claudio A. y ARANCIBIA BULNE. Camilo A. Las Energías Renovables: la Energía Solar y sus Aplicación. *Revista Digital Universitaria* 2010, Agosto, Vol.11, nº 10, pp. 1067-6079. [En línea]. Disponible en: http://www.geofisica.unam.mx/ors/energia_solar1.pdf. [Consulta: 24 6 2015].
- [8] Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, Mapas de brillo solar. [En línea]. Colombia, 2005. [Consulta: 14 2 2016]. Disponible en: http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/3-Mapas_Brillo_Solar.pdf.
- [9] Unidad de Planeación Minero Energética – UPME, Mapas de radiación solar. [En línea]. Colombia, 2005. [Consulta: 14 2 2016]. Disponible en: http://www.upme.gov.co/Docs/Atlas_Radiacion_Solar/3-Mapas_Radiación_Solar.pdf.
- [10] CHENMING Hu, RICHARD M. White, SOLAR CELLS From Basics to Advanced Systems, University of California, McGraw-Hill, 1983. (Series in Electrical Engineering).
- [11] CASTAÑER. Tom, Markvart and Luis, Principles of Solar Cell, Barcelona, España, 2013, pp. 3-621.
- [12] PEREDA SOTO. Isidro Elvis. Celdas fotovoltaicas en generación distribuida. Ingeniero Civil Industrial Mención Electricidad. Santiago de Chile. Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería 2005.
- [13] textos científicos, Celdas solares. [En línea]. 2005. [Consulta: 25 3 2016]. Disponible en: <http://www.textoscientificos.com/energia/celulas>.

- [14] W. T. Picciano, Energy Conversion. *ScienceDirect*, [En línea], 1969, Vol. 9, nº 1, pp. 7-12, 1969.
- [15] A. Nedungadi, A simple parameter measurement system for solar cells. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on*, [En línea] Vol. 1, nº 3, pp. 206-207, 1982.
- [16] TEZÉN IXCAJOC. Cristóbal. Propuesta para la implementación de un sistema de adquisición de datos basado en microcontrolador y su aplicación a paneles solares.
Ingeniero Electrónico. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, 2012.
- [17] CUSTODIO, García, E. Campos, Álvarez, J. Sebastián, PJ, Zárate, E. Andrés, Acosta, Pérez, LI, Treviño, Palacios, CG. Desarrollo de un sistema de adquisición de datos para medir temperatura y voltaje en celdas solares. *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal*. [En línea], 2004, vol. 40, nº 20, pp. 81-84.
- [18] AEMET AGENCIA ESTATAL DE METEOROLOGÍA. [sitio web]. [Consulta: 30 7 2016]. Disponible en: http://www.aemet.es/documentos/es/eltiempo/observacion/radiacion/Radiacion_Solar.pdf.
- [19] Unidad de Planeación Minero Energética – UPME. Sistema de informacion electrico colombiano zonas no interconectadas ZNI. [En línea]. [Consulta: 26 6 2016]. Disponible en: <http://www.upme.gov.co/zni/>.
- [20] CONSULENTE ENERGÍA 2009. [sitio web]. [Consulta: 12 5 2016]. Disponible en: <http://www.consulente-energia.com/ar-come-costruire-un-solarimetro-piranometro-fotovoltaico-calibrazione-solarimetro-faidate-con-cella-solare-watt-mq.html>.

- [21] IXYS CORPORATION, «IXOLARTM high efficiency solarbit kxob22-12x1,» [En línea]. [Consulta: 14 2 2016]. Disponible en: <http://ixapps.ixys.com/DataSheet/20110302-KXOB22-12X1-DATA-SHEET.pdf>.
- [22] Proyectos Electrónicos, Regulador de voltaje. 2008. [En línea]. [Consulta: 28 10 2015]. Disponible en: <http://proyectoselectronics.blogspot.com.co/2008/05/lm317-lm338-lm350-regulador-de-voltaje.html>.
- [23] Pansch. Christian, Arduino lab. [En línea]. [Consulta: 15 5 2016]. Disponible en: <http://www.menosmedia.org/spip.php?rubrique11..>
- [24] NXP Semiconductors. 74HC_HCT4067. [En línea]. [Consulta: 10 6 2016]. Disponible en: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/74HC_HCT4067.pdf.
- [25] NXP Semiconductors. HEF4051B. [En línea]. [Consulta: 10 5 2016]. Disponible en: http://www.nxp.com/documents/data_sheet/HEF4051B.pdf.
- [26] Radio-Antigua. HCF4051BE ST INTEGRATED CIRCUIT NOS 1PC. C163U10F140714. [En línea]. [Consulta: 10 6 2016]. Disponible en: http://radioantigua.com/index.php?main_page=advanced_search_result&search_in_description=1&keyword=HCF4051BE&x=0&y=0.
- [27] STMicroelectronics. HCF4051. [En línea]. [Consulta: 10 6 2016]. Disponible en: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/f3/ff/82/70/ff/24/4e/69/CD00000384.pdf/files/CD00000384.pdf/jcr:content/translations/en.CD00000384.pdf>.
- [28] OLIVER, Lorenzo M. Aprende Robotica/PLX-DAQ Data Adquisition for Excel. 2009. [En línea]. [Consulta: 5 6 2016]. Disponible en:

<http://www.aprenderobotica.com/group/adquisiciondedatos/forum/topics/plxd-aq-data-acquisition-for>.

- [29] kaco-newenergy. kaco. [En línea]. [Consulta: 20 6 2016]. Disponible en: <http://kaco-newenergy.com/es/>.
- [30] Divulgacion y cultura cientifica Iberoamericana. Buenos aires. [sitio web]. [Último acceso: 20 6 2016]. Disponible en: http://www.oei.es/divulgacioncientifica/noticias_794.htm.
- [31] FAYERWAYER. [Consulta: 20 6 2016]. [sitio web]. Disponible en: <https://www.fayerwayer.com/2015/08/google-lanza-nuevo-proyecto-que-mide-el-potencial-energetico-de-tu-techo/>.
- [32] About Project Sunroof. Boston. [sitio web]. [Consulta: 13 07 2016]. Disponible en: <https://www.google.com/get/sunroof/about/>.
- [33] Eco Inventos green technology. proyecto sunroof. [En línea]. [Consulta: 12 06 2016]. Disponible: <http://ecoinventos.com/proyecto-sunroof/>.
- [34] El Definido. Aterriza en Chile tecnología para medir el potencial solar de tu techo con un click,» [En línea]. [Consulta: 20 6 2016]. Disponible en: <http://www.eldefinido.cl/actualidad/mundo/3123/Aterriza-en-Chile-tecnologia-para-medir-el-potencial-solar-de-tu-techo-con-un-click/>.
- [35] Diario de Yucatan. Tecnología para medir el nivel de radiación del Sol. [En línea]. [Consulta: 20 6 2016]. Disponible en: <http://yucatan.com.mx/futuro/ingenio-mexicano-para-el-mundo>.
- [36] ALONSODUB Electronica & Computacion. Muxconexion. [En línea]. [Consulta: 10 6 2016]. Disponible en: <https://alonsodub.files.wordpress.com/2012/08/muxconexion.png>.

[37] DIGI. XCTU: Next Generation Configuration Platform for XBee. [En línea]. [Consulta: 23 11 2015]. Disponible en: <http://www.digi.com/blog/community/xctu-next-generation-configuration-platform-for-xbee/>.

BIBLIOGRAFÍA

A. Nedungadi, A simple parameter measurement system for solar cells. *Instrumentation and Measurement, IEEE Transactions on* , [En línea] Vol. 1, nº 3, pp. 206-207, 1982.

CASTAÑER. Tom, Markvart and Luis, Principles of Solar Cell, Barcelona, España, 2013, pp. 3-621.

CHENMING Hu, RICHARD M. White, SOLAR CELLS From Basics to Advanced Systems, University of California, McGraw-Hill, 1983. (Series in Electrical Engineering).

CUSTODIO, García, E. Campos, Álvarez, J. Sebastián, PJ, Zárata, E. Andrés, Acosta, Pérez, LI, Treviño, Palacios, CG. Desarrollo de un sistema de adquisición de datos para medir temperatura y voltaje en celdas solares. *Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal*. [En línea], 2004, vol. 40, nº 20, pp. 81-84.

MURCIA RODRÍGUEZ, Humberto, «Development of Solar Energy in Colombia and its Prospects,» *Revista de Ingeniería*, [En línea], 2008 nº28, pp. 83-89.

PEREDA SOTO. Isidro Elvis. Celdas fotovoltaicas en generación distribuida. Ingeniero Civil Industrial Mención Electricidad. Santiago de Chile. Pontificia Universidad Católica de Chile, Escuela de Ingeniería 2005.

STEVEN L. Brunton, CLARENCE W. Rowley, SANJEEV R. Kulkarni, and CHARLES. Clarkson. Maximum Power Point Tracking for Photovoltaic Optimization Using Ripple-Based Extremum Seeking Control. [En línea]. 2010 Vol. 25 , nº 10, pp. 2531 - 2540, [Consulta: 13 11 2015] Disponible en: <http://faculty.washington.edu/sbrunton/papers/BrRoKuCl2010.pdf>

TEZÉN IXCAJOC. Cristóbal. Propuesta para la implementación de un sistema de adquisición de datos basado en microcontrolador y su aplicación a paneles solares. Ingeniero Electrónico. Guatemala. Universidad de San Carlos de Guatemala Facultad de Ingeniería, Escuela de Ingeniería Mecánica Eléctrica, 2012.

W. T. Picciano, Energy Conversion. *ScienceDirect*, [En línea], 1969, Vol. 9, nº 1, pp. 7-12, 1969.

ANEXOS

ANEXO 1. Código sensado de tensión con interfaz de Excel y PLX DAQ

```
const int voltajeanalogo0 = A0;
float pin0 = 0;
float volt0;
int cuenta = 0; // variable para las líneas de Excel
int LABEL = 1;
void setup () {      // inicia el programa
Serial.begin(9600);
Serial.println("CLEARDATA");
Serial.println("LABEL, Hora, volt0, cuenta"); // nombres para las columnas
}
void loop(){
pin0 = analogRead(voltajeanalogo0);
volt0 = (5*pin0) /1023;
cuenta++; // incrementa cuenta en una cada vez
Serial.print("DATA, TIME,"); //inicia la impresión de datos
Serial.print(volt0);
Serial.print(",");
Serial.println(cuenta);
if (cuenta > 1000) //es para limitar los datos
{cuenta = 0;
Serial.println("ROW,SET,2");
}
delay (10000); // espera tanto tiempo
```

ANEXO 2. Código utilizado para la programación del multiplexor

```
int A0 = 0;
int A1 = 0;
int A2 = 0;
int multiplex[8];
void setup()
{
  pinMode(2, OUTPUT);
  pinMode(3, OUTPUT);
  pinMode(4, OUTPUT);
  Serial.begin(9600);
}
void loop()
{
  for(int count=0; count <= 7; count++)
  {
    A2 = bitRead(count,0);
    A1 = bitRead(count,1);
    A0 = bitRead(count,2);
    digitalWrite(2, A0);
    digitalWrite(3, A1);
    digitalWrite(4, A2);
    multiplex[count] = (analogRead(0)*(5000/1023));
    Serial.println(multiplex[count]);
    delay(1000);
  }
  Serial.println();
}
```

ANEXO 3. Tabla caracterización tensión vs irradiancia

Irradiancia [W/m ²]	Temperatura ambiente [°C]	Temperatura de la celda [°C]	Tensión [mV]	Corriente [mA] (R=5,12[Ω])
25	23	23,6	4,71	0,919921875
30	23	23,8	5,53	1,080078125
35	23	23,7	6,01	1,173828125
35	23	23,9	6,61	1,291015625
35	23	24,5	7,35	1,435546875
40	22	24,4	8,01	1,564453125
40	22	24,4	8,34	1,62890625
50	23	24,5	10,21	1,994140625
50	23	24,7	11,16	2,1796875
55	23	25,2	11,85	2,314453125
60	23	25,7	12,81	2,501953125
65	23	25,6	14,41	2,814453125
70	24	25,3	15,29	2,986328125
75	24	25,3	16,04	3,1328125
80	23	25,4	17,07	3,333984375
85	23	26	18,41	3,595703125
90	23	26,2	19,14	3,73828125
95	23	26,4	20,06	3,91796875
100	23	26,6	21,26	4,15234375
105	24	27	21,91	4,279296875
110	23	27,2	23,35	4,560546875
115	23	27,6	24,51	4,787109375
120	23,3	27,5	25,24	4,9296875
125	23,3	27,3	26,41	5,158203125

130	23,3	27,5	27,35	5,341796875
135	23,3	27,6	28,61	5,587890625
140	23,3	27,3	29,26	5,71484375
145	23,3	27,4	30,01	5,861328125
150	23	27,5	31,41	6,134765625
155	23	27,4	32,16	6,28125
155	23	27,4	32,91	6,427734375
160	23,1	27,5	34,21	6,681640625
165	23,1	27,8	35,15	6,865234375
170	23,1	27,7	36,11	7,052734375
175	23	27,7	37,51	7,326171875
180	23,6	27,4	38,31	7,482421875
185	23,6	27,1	39,14	7,64453125
185	23,6	27,4	39,31	7,677734375
195	23,6	26,8	41,51	8,107421875
200	23	27,6	41,93	8,189453125
200	23,7	28	42,83	8,365234375
205	23,7	27,8	43,22	8,44140625
205	23,7	27,8	43,83	8,560546875
210	23	26	45,45	8,876953125
215	23	30	45,92	8,96875
220	23	27	47,33	9,244140625
225	23	26,8	48,73	9,517578125
230	23	26,9	49,18	9,60546875
235	24	26,9	50,43	9,849609375
240	23	28	51,03	9,966796875
240	23	27,6	51,41	10,04101563
240	23	26,3	51,64	10,0859375

245	24	26,1	52,71	10,29492188
245	23	26,1	52,83	10,31835938
245	24	26	53,41	10,43164063
250	23	27,2	53,82	10,51171875
250	24	26,1	54,41	10,62695313
255	23	27,1	55,34	10,80859375
255	23	28,8	55,86	10,91015625
260	24	29,3	56,87	11,10742188
260	24	27,8	57,76	11,28125
265	24	27,2	58,11	11,34960938
265	24	34,2	58,37	11,40039063
265	24	36	59,16	11,5546875
270	23	32,9	60,11	11,74023438
275	23,6	29,5	61,16	11,9453125
280	23	26,1	63,11	12,32617188
285	23	34,4	64,16	12,53125
290	23	27,7	64,98	12,69140625
290	23,4	28,9	66,79	13,04492188
295	23,4	27,9	67,36	13,15625
300	23,4	30,3	69,07	13,49023438
305	23,4	32,8	70,11	13,69335938
305	23,4	31,9	70,46	13,76171875
310	23	35,3	71,65	13,99414063
315	23	31,2	73,53	14,36132813
315	23	26,9	74,73	14,59570313
320	23	30	75,51	14,74804688
325	23,5	31	76,03	14,84960938
325	23,5	31,6	76,51	14,94335938

330	23,5	32,1	77,04	15,046875
335	23,5	32,4	77,53	15,14257813
335	23,5	32,8	78,21	15,27539063
340	23,5	28	79,72	15,5703125
345	23	27,8	80,52	15,7265625
345	23	27,6	81,81	15,97851563
350	23	28,1	82,02	16,01953125
355	23	28,2	83,41	16,29101563
355	23	28,4	84,43	16,49023438
360	23	28,4	85,61	16,72070313
365	23	28	86,36	16,8671875
365	23	27,9	87,21	17,03320313
370	23	28,4	87,93	17,17382813
375	23	27,5	89,49	17,47851563
375	23	27,1	91,51	17,87304688
380	23	27,5	91,91	17,95117188
380	23	28	92,56	18,078125
385	23	27,8	93,31	18,22460938
385	23	27,6	94,41	18,43945313
390	23	27,6	95,11	18,57617188
395	23	28,7	96,31	18,81054688
395	23	29,7	97,68	19,078125
400	23	30,6	98,01	19,14257813
405	23	30,9	98,98	19,33203125
405	23	31,3	100,41	19,61132813
410	23	30	101,47	19,81835938
410	24	32,1	102,41	20,00195313
415	23	29,8	104,38	20,38671875

420	23	32,7	105,51	20,60742188
425	24	28,2	106,19	20,74023438
430	23	28,4	107,61	21,01757813
430	23	29,9	108,37	21,16601563
435	23	32	109,26	21,33984375
440	23	32,9	110,35	21,55273438
440	23	34,4	111,34	21,74609375
445	24	35,7	113,11	22,09179688
450	23	37	113,95	22,25585938
450	23,1	40	115,31	22,52148438
455	23	39,9	116,06	22,66796875
460	24,1	36,3	116,71	22,79492188
465	23	38,7	118,27	23,09960938
465	23	38,7	119,51	23,34179688
470	23	38,9	120,27	23,49023438
475	23	37,6	121,28	23,6875
480	24,1	38,6	122,58	23,94140625
480	23	37	123,37	24,09570313
485	23	36	124,58	24,33203125
490	23	35	125,11	24,43554688
490	22,8	34,5	126,38	24,68359375
495	23	35,2	127,61	24,92382813
500	23	36	128,53	25,10351563
500	23	36,7	129,51	25,29492188
505	23	36	130,54	25,49609375
510	24	37	131,21	25,62695313
515	24,2	38,6	132,62	25,90234375
515	24	38,7	133,47	26,06835938

520	23	38,8	134,31	26,23242188
525	22,7	39	135,18	26,40234375
530	23,7	39,3	136,21	26,60351563
535	23	39,6	137,71	26,89648438
540	22,8	40	138,81	27,11132813
545	24,2	41	139,36	27,21875
550	24,4	41,4	140,61	27,46289063
555	24,4	41,5	141,01	27,54101563
555	24,3	40,7	142,45	27,82226563
560	24,4	39,6	143,21	27,97070313
565	24,4	39,2	144,21	28,16601563
565	24	39,8	145,71	28,45898438
570	24	39,9	146,71	28,65429688
575	24	40	147,33	28,77539063
575	24,5	41,1	148,21	28,94726563
580	24,7	40,5	149,01	29,10351563
585	24,9	40,3	150,21	29,33789063
585	25,1	39	151,41	29,57226563
590	25	40	153,21	29,92382813
595	25,2	40,3	154,61	30,19726563
595	25,3	40	155,51	30,37304688
600	25,3	41	156,31	30,52929688
605	25	41	157,41	30,74414063
605	25,8	40,7	157,91	30,84179688
610	25,6	41,2	159,51	31,15429688
615	25,5	42,3	160,21	31,29101563
615	25,5	45	161,11	31,46679688
620	25,5	44	162,61	31,75976563

625	25,4	43,2	163,46	31,92578125
625	25,3	40,6	164,21	32,07226563
630	25,3	40,2	165,07	32,24023438
635	25,3	39,9	166,07	32,43554688
635	25,3	40,2	167,35	32,68554688
640	25,3	40,1	168,41	32,89257813
645	25,2	40,2	169,312	33,06875
645	25,2	41	170,24	33,25
650	25,2	41,1	171,01	33,40039063
655	25,2	42,2	172,33	33,65820313
655	25,2	41,7	173,21	33,83007813
660	25,2	41,8	174,43	34,06835938
665	25	41,9	176,54	34,48046875
665	25	41,5	176,66	34,50390625
670	25	42	177,16	34,6015625
675	25	42,3	178,81	34,92382813
675	25	43	179,35	35,02929688
680	25	43	180,31	35,21679688
685	25	43,2	181,46	35,44140625
685	25,4	42,7	182,71	35,68554688
690	26	42,8	183,26	35,79296875
695	25,4	43	184,36	36,0078125
695	25	43,4	185,31	36,19335938
700	25	43,2	186,25	36,37695313
705	25	44	187,61	36,64257813
705	25	44,3	188,24	36,765625
710	25	44,6	189,31	36,97460938
715	25	44,6	189,91	37,09179688

715	25	44,5	191,31	37,36523438
720	25	44,8	192,71	37,63867188
720	26	44,9	192,87	37,66992188
725	26	43,5	192,91	37,67773438
730	25	42,2	194,17	37,92382813
730	26	41	195,41	38,16601563
735	27	42	196,11	38,30273438
740	26	42,8	197,16	38,5078125
740	26	43	198,24	38,71875
745	26	43,7	199,51	38,96679688
750	26	44,6	200,23	39,10742188
750	26	45	201,41	39,33789063
755	26	46,6	202,36	39,5234375
760	26	46,6	203,21	39,68945313
760	26,3	46,3	204,46	39,93359375
765	26,7	47	205,21	40,08007813
770	26	45,2	206,65	40,36132813
770	27	44,7	207,21	40,47070313
775	27	44,9	208,45	40,71289063
780	27	45,6	209,01	40,82226563
780	27	44,4	210,37	41,08789063
785	27	45,8	211,61	41,33007813
790	28	46	212,37	41,47851563
790	28	43,2	213,52	41,703125
795	28	44,7	214,14	41,82421875
795	27	46,3	215,11	42,01367188
800	28	45,8	216,31	42,24804688
805	28	45,9	217,77	42,53320313

810	28	44,8	218,81	42,73632813
815	28	44,6	219,46	42,86328125
820	28	44,5	220,21	43,00976563
825	27	44,4	221,41	43,24414063
830	28	44,4	222,65	43,48632813
835	28	44,9	223,51	43,65429688
835	27	43	224,51	43,84960938
840	27	41,7	225,15	43,97460938
845	27	40	226,01	44,14257813
845	27	42	226,94	44,32421875
850	27	42,6	228,51	44,63085938
855	29	42,5	229,43	44,81054688
860	29	42,6	230,31	44,98242188
865	28	42,4	231,33	45,18164063
870	29	42,3	232,13	45,33789063
870	28,3	42,7	233,31	45,56835938
875	28,1	42,6	234,18	45,73828125
880	28	42,3	234,07	45,71679688
885	28	41	236,61	46,21289063
890	28	42,9	237,77	46,43945313
890	28	42,8	238,41	46,56445313
895	28	42,8	239,6	46,796875
900	28	43,9	239,91	46,85742188
905	28,4	44	241,16	47,1015625
910	28	44,3	242,41	47,34570313
915	29	44	243,27	47,51367188
920	29,5	45	244,41	47,73632813
925	29,4	45,8	245,41	47,93164063

930	30	45	246,43	48,13085938
935	30	44,8	247,31	48,30273438
940	30	44,6	248,61	48,55664063
945	29,6	44,5	249,28	48,6875
950	29	44,7	250,11	48,84960938
955	30	43,4	251,51	49,12304688
960	29	44,3	252,41	49,29882813
965	29	45	253,39	49,49023438
970	30	45,2	254,61	49,72851563
975	31	45,1	255,71	49,94335938
980	30	44,8	256,21	50,04101563
980	29,8	44,7	257,46	50,28515625
985	29,5	44,7	258,36	50,4609375
990	29,4	43,9	259,01	50,58789063
990	29,3	45,3	260,31	50,84179688
995	29	44,6	261,47	51,06835938
1000	29,8	44,1	261,54	51,08203125
1005	31	44,6	263,31	51,42773438
1010	31,2	44,3	264,63	51,68554688
1010	30	45,3	265,51	51,85742188
1015	30	45,2	266,56	52,0625
1020	31	44,9	267,25	52,19726563
1025	31	46,2	268,81	52,50195313
1030	31	46,9	269,12	52,5625
1035	31	47	269,71	52,67773438
1040	31	48,2	270,19	52,77148438
1045	32	49,2	270,81	52,89257813
1050	32	50,1	271,01	52,93164063

1055	32	50,6	270,81	52,89257813
1060	32	51,3	270,57	52,84570313
1065	32	52,1	270,21	52,77539063
1070	32	52,8	269,84	52,703125
1075	32	53,1	269,51	52,63867188
1080	32	52,9	269,37	52,61132813
1085	32	53,1	269,01	52,54101563
1090	32	53,5	268,81	52,50195313
1095	32	54,1	268,41	52,42382813
1100	32	54,3	268,24	52,390625