

DISEÑO Y PUESTA A PUNTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL PARA LA
COMPARACIÓN DE DIFERENTES SENSORES Y MÉTODOS PARA
DETERMINAR LA RADIACIÓN SOLAR

CRISTIAN JAVIER RUIZ ALVAREZ

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2017

DISEÑO Y PUESTA A PUNTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL PARA LA
COMPARACIÓN DE DIFERENTES SENSORES Y MÉTODOS PARA
DETERMINAR LA RADIACIÓN SOLAR

CRISTIAN JAVIER RUIZ ALVAREZ

Trabajo de Grado para adquirir el título de
Ingeniero Mecánico

Director

JULIAN ERNESTO JARAMILLO IBARRA

PhD. Ingeniería Mecánica

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICO MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2017

DEDICATORIA

A Dios

Por concederme la salud

E iluminar mi camino en aquellos momentos donde mi inspiración no pudo

Por orientarme y colmar mi vida de bendiciones

A mi padre Jorge y mi madre Patricia

Por el arduo trabajo para edificar y conservar nuestro hogar,

Por su apoyo incondicional a mis estudios

Porque con su ejemplo y lecciones me han forjado como una persona útil a la sociedad

Pero más que nada, por su infinito amor y comprensión

A mis hermanos Oscar y Sergio

Para que este trabajo los motive a cumplir sus sueños

Y a concluir todos aquellos procesos que aún están inconclusos

AGRADECIMIENTOS

A mi hermano **CRISTHIAN FERNANDO ROJAS CRISTANCHO**, coautor del presente trabajo, y a quien deseo de todo corazón cumpla sus objetivos en Francia. Que dios ilumine y colme de éxitos su camino y el de su familia.

A mi compañero Jorge Mario Illidge Araujo, por su incansable apoyo durante mi ausencia y a quien debo gran parte de este logro.

“O doutor” Gerson Trujillo Navarro por sus enseñanzas durante mi estadía en Brasil, por alentarme a viajar y conocer el mundo, por su colaboración en la redacción de este documento.

A la empresa metalmecánica “Industria Metalmaq I.M” y al técnico Marlon Barbosa por su buena disposición y excelente trabajo.

A mi tío Pacho, por sus erudiciones y apoyo constante en mi proceso educativo y por quien tengo una gran admiración.

A mi novia Karen, por su complicidad en todos mis sueños y por alumbrar mi camino con su amor.

Al profesor Omar Armando Gelvez Arocha, por su compromiso y entera dedicación en la enseñanza, por ser un auténtico MAESTRO. Y quien asesoró este proyecto constantemente.

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	17
1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA.....	18
2. JUSTIFICACIÓN	20
3. OBJETIVOS	24
3.1. OBJETIVO GENERAL.....	24
3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	24
4. GENERALIDADES SOBRE EL PROYECTO	26
4.1 RADIACIÓN SOLAR	26
4.2 RADIACIÓN SOLAR EN LA SUPERFICIE TERRESTRE	26
4.3. TIPOS DE RADIACIÓN SOLAR EN LA TIERRA	27
4.4 MOVIMIENTO SOLAR	29
4.5 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS PARA LA TOMA DE DATOS DE RADIACIÓN SOLAR	42
5. REDISEÑO DEL SEGUIDOR SOLAR	48
5.1 REDISEÑO MECÁNICO Y ESTRUCTURAL.....	49
5.1.1 Soporte superior motorreductor altura solar	51
5.2 REDISEÑO DEL MÓDULO DE CONTROL.....	55
6. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE RADIACIÓN SOLAR	74
6.1 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS (DAQ)	75
6.2 SOFTWARE LABVIEW	78
7. CONTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO.....	88
7.1 ESTRUCTURA DE SOPORTE PARA LOS SENSORES.....	88

7.2 SOPORTE SUPERIOR MOTORREDUCTOR ALTURA SOLAR	90
7.3 PLATO BASCULANTE PIRHELIÓMETRO KIPP&ZONEN CHP1	91
7.4 FABRICACIÓN DE ENGRANAJES PARA EL AZIMUT Y ALTURA SOLAR	92
7.5 CAJA DE CONTROL.....	93
7.6 SISTEMA DE SOMBRA SOLAR	94
7.7 CALIBRACIÓN DEL SEGUIDOR SOLAR.....	95
7.8 PUESTA A PUNTO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL.....	97
8. ANÁLISIS DE DATOS	100
8.1 CONFIGURACIONES PARA LA COMPARACIÓN DE SENSORES DE RADIACIÓN SOLAR	101
8.2 DESVIACIÓN MEDIA ABSOLUTA (MAD).....	102
8.3 EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE LAS CONFIGURACIONES.....	103
8.3.1 Configuración 1	103
8.3.2 Configuración 2	105
8.3.3 Configuración 3	106
8.3.4 Configuración 4	107
8.4 HISTÓRICO DE DATOS DE RADIACIÓN SOLAR GLOBAL PARA LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER.....	108
9. CONCLUSIONES	112
10. RECOMENDACIONES.....	114
BIBLIOGRAFÍA.....	116

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas en Santander	21
Figura 2. Estación experimental para medir radiación solar	23
Figura 3. Radiación solar en la tierra	28
Figura 4. Movimiento de la tierra alrededor del sol.	30
Figura 5. Observador de referencia.	31
Figura 6. Variación anual de la declinación solar.....	33
Figura 7. Ángulos de posicionamiento solar	37
Figura 8. Trayectoria del sol en el semiplano Sur.....	39
Figura 9. Trayectoria del sol en el plano terrestre.....	40
Figura 10. Trayectoria del sol en semiplano Norte.....	41
Figura 11. Piranómetro térmico Kipp&Zonen CMP3 segunda clase.	43
Figura 12. Piranómetro fotovoltaico Davis DS6450.	44
Figura 13. Pirheliómetro Kipp&Zonen CHP1	45
Figura 14. Piranómetro con anillo de sombra.	46
Figura 15. Seguidor solar.....	47
Figura 16. Modulo Superior	48
Figura 17. Módulo Vertical	50
Figura 18. Camisa superior.....	50
Figura 19. Conjunto de chapa metálica	51
Figura 20. Plato basculante	52
Figura 21. Rediseño seguidor solar.	54
Figura 22. Variación de resistencia potenciómetro lineal y logarítmico con la posición	56
Figura 23. Módulo controlador de motores dynamotion V3	57
Figura 24. Cálculo de torque altura solar	58
Figura 25. Cargas axiales en el eje de azimut	59
Figura 26. Motorreductor DC	60

Figura 27. Circuito esquemático lazo cerrado de control	61
Figura 28. Control Proporcional (P)	62
Figura 29. Interfaz de programación Arduino 1.6.9.....	64
Figura 30. Movimiento angular del seguidor solar en el plano azimutal.....	67
Figura 31. Diagrama de flujo Caso 1	69
Figura 32. Diagrama de flujo Caso 2	70
Figura 33. Diagrama de flujo Caso 3	71
Figura 34. Diagrama de flujo altura solar	72
Figura 35. Algoritmo de control seguidor solar.....	73
Figura 36. Adquisición de datos.....	75
Figura 37. NI myDAQ.....	77
Figura 38. Diagrama de flujo del algoritmo de adquisición de datos.....	79
Figura 39. SubVI DAQ Assistant.....	81
Figura 40. Configuración de tareas DAQ assistant	82
Figura 41. Error de adquisición de datos	83
Figura 42. Mean PtByPt VI	84
Figura 43. Código para filtrado de señales.	85
Figura 44. SubVI's para Fecha y hora actual	85
Figura 45. Generación de tabla de datos.	86
Figura 46. Exportar datos desde LabView a Excel	87
Figura 47. Estructura metálica de soporte	88
Figura 48. Mesa metálica.....	89
Figura 49. Chapa metálica soporte superior altura solar	90
Figura 50. Plato Basculante.....	91
Figura 51. Engranajes en bronce.....	92
Figura 52. Caja de control.....	93
Figura 53. Sistema de sombra solar	94
Figura 54. Calibración Azimut Solar.....	95
Figura 55. Calibración Altura solar.....	96

Figura 56. Diagrama de conexión sensores - NI myDAQ	97
Figura 57. Montaje experimental para la comparación de sensores de radiación solar	98
Figura 58. Nivel piranómetro Kipp&Zonen CMP3	99
Figura 59. Promedios diarios de Radiación Solar	100
Figura 60. Configuración 1	103
Figura 61. Comparativo de piranómetros.....	104
Figura 62. Configuración 2.....	105
Figura 63. Configuración 3.....	106
Figura 64. Configuración 4.....	107
Figura 65. Promedios diarios de Radiación Solar Global.....	108
Figura 66. Promedios diarios mensuales.....	109
Figura 67. Variación del factor de claridad con el día	111

LISTA DE TABLAS

Tabla 1. Nomenclatura ángulos de posicionamiento solar.....	38
Tabla 2. Especificaciones de los engranajes	53
Tabla 3. MAD para cada configuración de sensores.	103
Tabla 4. Radiación solar global diaria mensual	109
Tabla 5. Valores de Kt	111

LISTA DE ECUACIONES

Ecuación 1. Declinación solar	32
Ecuación 2. Hora solar.....	34
Ecuación 3. Factor de corrección hora solar.....	34
Ecuación 4. Ángulo horario	35
Ecuación 5. Ángulo cenit	36
Ecuación 6. Altura solar	36
Ecuación 7. Ángulo azimut solar.....	37
Ecuación 8. Caracterización del movimiento del seguidor solar	95
Ecuación 9. Relación de componentes de radiación solar.....	101
Ecuación 10. Desviación media absoluta	102
Ecuación 11. Factor de claridad.....	110
Ecuación 12. Radiación solar extraterrestre	110

LISTA DE ANEXOS

ANEXO A. PLANOS DE PIEZAS MECÁNICAS, DIAGRAMA DE CONEXIONES ELECTRÓNICAS Y DIAGRAMA DE BLOQUES LABVIEW

ANEXO B. DATOS DE RADIACIÓN SOLAR PARA UNA SUPERFICIE HORIZONTAL TERRESTRE EN LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

ANEXO C. HOJA DE DATOS PIRÁNOMETRO KIPP&ZONEN CMP3

ANEXO D. HOJA DE DATOS PIRÁNOMETRO DAVIS DS6450

ANEXO E. HOJA DE DATOS PIRHELIÓMETRO KIPP&ZONEN CHP1

ANEXO F. HOJA DE DATOS POTENCIÓMETRO LINEAL

ANEXO G. HOJA DE DATOS NI myDAQ

ANEXO H. CÓDIGO DE PROGRAMACIÓN ARDUINO

(Ver anexos en la carpeta adjunta al CD)

RESUMEN

TITULO: DISEÑO Y PUESTA A PUNTO DE UN MONTAJE EXPERIMENTAL PARA LA COMPARACIÓN DE DIFERENTES SENSORES Y MÉTODOS PARA DETERMINAR LA RADIACIÓN SOLAR^{1*}.

AUTOR: RUIZ ALVAREZ CRISTIAN JAVIER^{}.**

PALABRAS CLAVE: Energía Solar, Movimiento solar, Radiación Solar, Piranómetro, Pirheliómetro, Sombra solar, Adquisición de datos, DAQ.

DESCRIPCIÓN:

La generación de energías útiles (Energía Eléctrica o Calor) a partir de la energía solar es uno de los objetivos que tiene el gobierno colombiano para el año 2020. Pero, para impulsar y optimizar los procesos de conversión de energía, es importante determinar la cantidad de radiación solar incidente en determinada región (densidad de flujo de radiación W/m^2), este proceso de cuantificación es realizado mediante sensores especializados como el pirómetro, encargado de medir la radiación solar global, y el pirheliómetro, encargado de medir la radiación solar difusa. Éstos sensores presentan errores de medición propios de los transductores (Termopilas y/o fotodiodos de silicio) utilizados en su fabricación, siendo necesario comparar y determinar cuál instrumento meteorológico es el mejor.

Para comparar los diferentes sensores de radiación con que cuenta la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander (piranómetro Kipp&Zonen CMP3 y Davis 6450, pirheliómetro Kipp&Zonen CHP1), se diseñó un montaje experimental dotado de un sistema de seguimiento solar de 2 grados de libertad y sistema de sombra solar, consiguiendo medir las componentes de la radiación solar (Directa, Difusa y Global) durante febrero y marzo de 2017. Posteriormente, se compararon los sensores mediante diferentes configuraciones y utilizando como criterio de evaluación la desviación media absoluta, se determinó cuál de ellos es el mejor.

Concluyendo que los mejores sensores para medir radiación solar son aquellos que trabajan bajo el principio físico de detección termoeléctrica (Termopilas), ya que presentan sensibilidades más altas y mayores rangos espectrales de medición, pero tienen altos requerimientos de adquisición de datos, necesitando costosas tarjetas.

^{*} Trabajo de Grado.

^{**} Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Julián Ernesto Jaramillo Ibarra.

ABSTRACT

TITLE: DESIGN AND IMPLEMENTATION OF AN EXPERIMENTAL ARRANGEMENT TO COMPARE DIFFERENT SENSORS AND METHODS TO DETERMINE THE SOLAR RADIATION^{2*}.

AUTHOR: RUIZ ALVAREZ CRISTIAN JAVIER^{}**

KEY WORDS: SOLAR ENERGY, SOLAR MOVEMENT, SOLAR RADIATION, PYRANOMETER, PYRHELIOMETER, SOLAR SHADE, DATA ACQUISITION, DAQ.

DESCRIPTION:

The generation of useful energies (Electric Power or Heat) from solar energy is one of the goals that the Colombian government has set for 2020. However, in order to promote and optimize energy conversion processes, it is important to determine the amount of solar radiation incident in a certain region (radiation flux density W / m^2). Such quantification process is carried out by specialized sensors such as the pyranometer, in charge of measuring global solar radiation, and the pyrheliometer, in charge of measuring the solar diffused radiation. These sensors have measurement errors, typical of the transducers (thermopiles or silicon photodiodes) used in their manufacture, being necessary to compare and determine which meteorological instrument is the best.

In order to compare the different radiation sensors of the Mechanical Engineering School of the Industrial University of Santander (Pyranometer Kipp&Zonen CMP3 and Davis 6450, pyrheliometer Kipp & Zonen CHP1), an experimental set up with a solar tracker 2 degrees of freedom and solar shade system, being able to measure the components of solar radiation (Direct, Diffuse and Global) was arranged between February and March, 2017. Subsequently, the sensors were compared using different configurations and using the absolute mean deviation as an evaluation criterion, trying to determine which of them would be the best.

In conclusion, the best sensors to measure solar radiation are those that work under the physical principle of thermoelectric detection (Thermopiles), since they have higher sensitivities and higher spectral ranges of measurement, but also have high data acquisition requirements, demanding expensive devices.

* Dissertation Project.

** Industrial University of Santander. Faculty of physic mechanical engineering. School of Mechanical Engineering. Supervisor: Julian Ernesto Jaramillo Ibarra.

INTRODUCCIÓN

El alto nivel de contaminación terrestre debido a la quema de combustibles fósiles para generación de energía exige planes que pretendan la moderación de las emisiones, así como de nuevas alternativas de generación eléctrica. Debido a esto, la transformación de la energía solar a eléctrica (por medio de celdas fotovoltaicas) o de energía solar a calor útil (mediante colectores), se proyecta como una de las más atractivas soluciones por su gran disponibilidad y característica de recurso inagotable.

El aprovechamiento de la energía solar está condicionado a la intensidad de radiación solar incidente sobre un área determinada. Ésta radiación solar incidente depende de varios factores naturales: posición del Sol en el cielo (que varía diaria y anualmente), condiciones atmosféricas generales y del microclima, altura sobre el nivel del mar y la duración del día (época del año) y su cuantificación depende de factores externos como la calidad de los instrumentos utilizados para garantizar exactitud en las medidas realizadas.

Teniendo en cuenta la anterior consideración, se pretende a través del siguiente proyecto, la cuantificación integral de radiación solar (total, directa y difusa), realizando comparaciones entre sensores (Piranómetros y Pirheliómetro), bajo diversas configuraciones y siendo evaluados de acuerdo a la exactitud de las mediciones obtenidas usando como punto de referencia las medidas tomadas por un sensor con certificación ISO 9060 de segunda clase, piranómetro Kipp&Zonen CMP3.

1. IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

El Gobierno Colombiano en cumplimiento de lo pactado en el acuerdo de Paris 2016, como iniciativa mundial para combatir el calentamiento global, busca que las energías renovables se conviertan en una de las principales fuentes de abastecimiento energético. Esto, debido a que el territorio colombiano presenta un escenario apropiado para implementar sistemas de generación eléctrica y calórica a través del recurso solar por medio de sistemas fotovoltaicos y colectores térmicos, respectivamente. El gran potencial de éste recurso en el país es debido a su localización entre la latitud 5° de latitud Sur (Leticia) y 13,5° de latitud Norte (Guajira). Al mismo tiempo, posee un régimen de radiación solar con muy poca variación durante el año y con promedios diarios mensuales que varían de región a región entre 4 kWh/día/m² y 6 kWh/día/m² según el Atlas de Radiación Solar de Colombia³ (1). Estos valores al ser comparados con las regiones de máxima radiación a nivel mundial (por ejemplo, desierto del Sahara) se encuentra que Colombia tendría entre el 58% y el 85% de estos valores máximos.

Con el fin de optimizar los procesos de generación de energía a partir del recurso solar e incentivar la inversión, es de vital importancia conocer la densidad de flujo de radiación, determinando con éste valor las zonas aptas para este propósito. Ésta densidad de flujo de radiación es medida por sensores especializados como el piranómetro (mide radiación solar global) y el pirheliómetro (mide radiación solar directa).

³ UPME, IDEAM. (2005). Atlas de Radiación Solar de Colombia. Bogotá. UPME (Unidad de Planeación Minero Energética (10)a). Colombia

Estos sensores, a su vez, presentan errores de medición propios de los transductores utilizados en su fabricación y a que funcionan bajo principios físicos diferentes (Principio Térmico o Principio Fotovoltaico). Por lo tanto, es importante identificar cuál dispositivo es más exacto a la hora de medir radiación solar y por ende garantizar bases de datos confiables que permitan la mejora continua de proyectos, así como el avance investigativo.

2. JUSTIFICACIÓN

Actualmente, en Colombia los datos se encuentran disponibles en forma de mapas, gráficos y estadísticas consignados en el gran Atlas de Radiación Solar de Colombia, del cual se han hecho dos publicaciones (en los años 1993 y 2005). A pesar de la existencia de estos datos, la información de potencial de radiación a lo largo del territorio nacional está desactualizada.

Colombia cuenta con un total de 32 estaciones meteorológicas aptas para la medición de potencial de radiación⁴, cuyo objetivo es establecer la adquisición y estudio de información diaria de radiación global que permita elaborar atlas solares que reflejen la intensidad media de radiación solar por regiones: Andina, Caribe, Pacífica, Orinoquía y Amazonía. El departamento de Santander cuenta con dos estaciones de medición certificadas: La primera ubicada en Alberto Santos (municipio de Socorro) y la segunda ubicada en San Antonio (municipio de Floridablanca), como se observa en la figura 1.

⁴ Ibid. Pag. 2

Figura 1. Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas en Santander



Por lo tanto, el disponer de una estación de medición y monitoreo en tiempo real del potencial de radiación con sensores de primera y segunda clase⁵ permitiría a la Universidad Industrial de Santander, contar con una base de datos de potencial de radiación de alta calidad y confiabilidad. Con esto, se promoverá la puesta en marcha de futuros proyectos en el sector de la energía solar y permitirá afianzar conceptos básicos vistos en la academia relativos al tema.

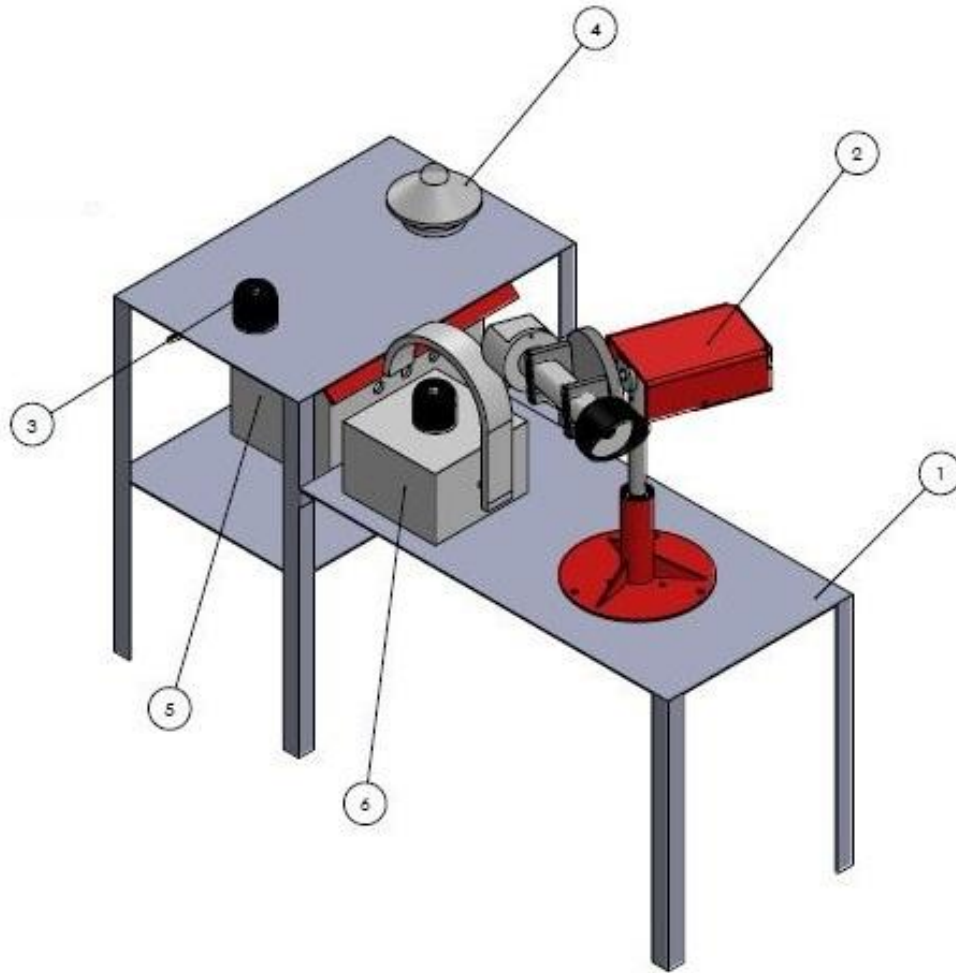
⁵ KIPP & ZONEN. Specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation. ISO 9060.1990.

Según RINGOIR, “Para que la conversión de energía solar en energía eléctrica se lleve a cabo de la manera más eficiente posible y en la ubicación óptima, se necesitan datos precisos sobre la radiación solar”⁶. Esta toma de datos se encuentra a cargo de sensores, los cuales varían según su: fabricación, rango espectral, sensibilidad, tiempo de respuesta, afectación por temperatura, entre otros factores, generando incertidumbre sobre los datos obtenidos.

Por lo mencionado anteriormente, en el presente trabajo se realizó el comparativo entre sensores de radiación solar de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander, mediante una estación experimental equipada con un seguidor solar de dos grados de libertad, un sistema de anillo de sombra solar y un sistema de adquisición de datos, que junto a los sensores (anteriormente mencionados) medirán radiación solar global, directa y difusa. Ver figura 2.

⁶ RINGOIR, Ruud. La medición precisa de la radiación solar permite obtener un rendimiento eficiente. KIPP & ZONEN, 17 de Abril 2015.

Figura 2. Estación experimental para medir radiación solar



N.º DE ELEMENTO	N.º DE PIEZA	CANTIDAD
1	Estructura metálica	1
2	Sistema de seguimiento solar	1
3	Kipp&Zonen CMP3	1
4	Davis DS6450	1
5	Caja de control	
6	Sistema de sombra solar	1

3. OBJETIVOS

3.1. OBJETIVO GENERAL

Cooperar con el compromiso misional de la Universidad Industrial de Santander y la Escuela de Ingeniería Mecánica en el ámbito de investigación de Energía Solar para servicio de la sociedad, mediante un trabajo de grado que permita comparar y evaluar sensores de potencial de radiación sometidos a diferentes configuraciones, con el fin de crear un montaje experimental necesario para el diseño y desarrollo de proyectos del sector de la energía solar.

3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Medir y comparar la radiación solar total sobre una superficie horizontal terrestre mediante un piranómetro térmico de segunda clase y un piranómetro fotovoltaico de silicio.

- Determinar la radiación solar directa por medio de un pirheliómetro de primera clase, equipado con un seguidor solar de 2 grados de libertad.

- Comparar diferentes configuraciones entre sensores (Piranómetros y Pirheliómetros) que permitan determinar la radiación solar.

- Construir una estructura para dar soporte a la estación de medición de radiación solar.

- Diseñar el sistema de adquisición, transmisión, adecuación y almacenamiento de los datos recolectados por los sensores.

- Desarrollar un software que permita el post-procesamiento de los datos obtenidos por los sensores brindando una interfaz gráfica al usuario.

- Realizar la medición de potencial de radiación solar durante 2 meses en la Universidad Industrial de Santander para la creación de una base de datos que interese a futuros proyectos en el sector solar a aplicar en la ciudad de Bucaramanga.

4. GENERALIDADES SOBRE EL PROYECTO

Antes de dar inicio al fiel cumplimiento de los objetivos planteados anteriormente, es importante establecer algunos conceptos claves acerca del movimiento solar en la bóveda celeste, distinguir los diferentes tipos de radiación solar en la superficie terrestre y conocer los elementos (sensores, seguidor solar, sombra solar, etc.) que serán utilizados en el presente proyecto.

4.1 RADIACIÓN SOLAR

La radiación solar es la energía electromagnética emitida por los procesos de fusión del hidrógeno contenido en el sol, produciendo una pérdida de masa que se transforma en energía. Con un rango espectral de interés de 0.25 a 3.0 μm , porción del rango espectral electromagnético que incluye la mayor energía irradiada por el sol⁷. La magnitud que mide la radiación solar que llega a la Tierra se denomina irradiancia, la cual es la energía que por unidad de tiempo y área alcanza a la Tierra. Su unidad es el W/m^2 (vatio por metro cuadrado).

4.2 RADIACIÓN SOLAR EN LA SUPERFICIE TERRESTRE

La energía que llega a la Tierra (en forma de ondas electromagnéticas) es el motor de la dinámica climática. Los valores de la radiación se utilizan para cuantificar otras

⁷ DUFFIE, John A. y BECKMAN William A. Solar Engineering of Thermal Processes. 2nd Edition. 1991 (12).p.3

propiedades climáticas (por ejemplo evapotranspiraciones) y en las clasificaciones climáticas.

De toda esta radiación que se dirige hacia la Tierra sólo una fracción alcanza la superficie terrestre, pues las ondas ultravioletas (de longitud de onda corta) son absorbidas por los gases de la atmósfera fundamentalmente por el ozono y el material molecular particulado (nitrógeno, oxígeno, aerosoles, vapor de agua, polvo, etc.) existentes en ella.

La intensidad de la radiación solar en el suelo depende del ángulo de inclinación del rayo incidente: cuanto menor es el ángulo que los rayos del sol forman con una superficie horizontal terrestre es mayor el espesor de atmósfera que tienen que atravesar, y por consiguiente es mayor la dispersión que ésta sufre en la atmósfera.

4.3. TIPOS DE RADIACIÓN SOLAR EN LA TIERRA

En función de como reciben la radiación solar los objetos situados en la superficie terrestre, se pueden distinguir entre estos tipos de radiación:

4.3.1. Radiación directa: proviene directamente del sol sin haber sufrido algún cambio en su dirección. Se caracteriza por proyectar una sombra definida de los objetos opacos que la interceptan.

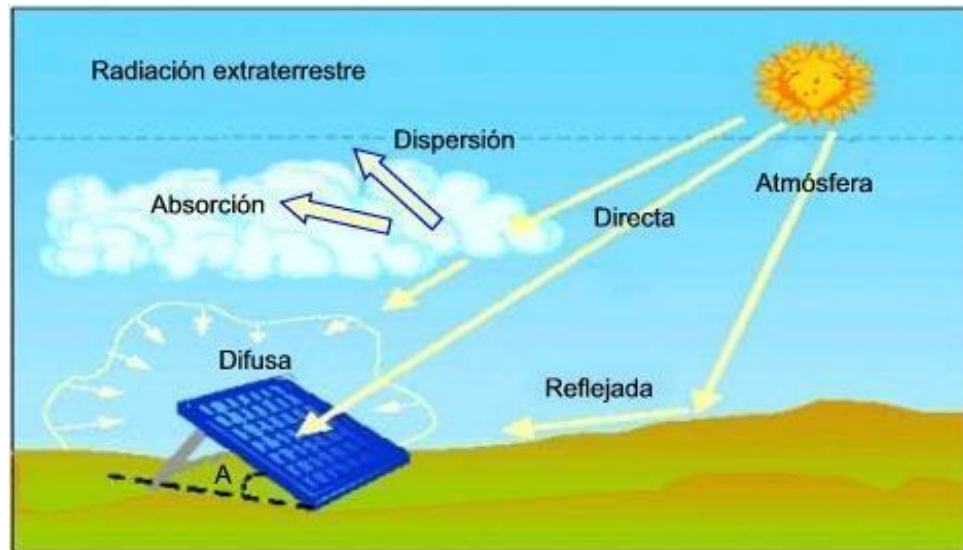
4.3.2 Radiación solar difusa: A su paso por la atmósfera, las nubes reflejan y absorben parte de la radiación solar. Esta radiación denominada difusa, parte en todas las direcciones como consecuencia de sus reflexiones y absorciones, no sólo de las nubes sino en las partículas de polvo atmosférico, montañas, etc. Este tipo de radiación se caracteriza por no producir sombra alguna respecto a los objetos opacos interpuestos.

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

4.3.4 Radiación global: Es la radiación total. Es la suma de las tres radiaciones anteriores. En un día despejado, con cielo limpio, la radiación directa es preponderante sobre la radiación difusa. Por el contrario, en un día nublado no existe radiación directa y la totalidad de la radiación que incide es difusa.

En la figura 3 se puede apreciar lo explicado anteriormente.

Figura 3. Radiación solar en la tierra



Fuente: Irradiación sobre el panel ⁸

⁸ OPEX ENERGY. “Energía fotovoltaica, principio de funcionamiento”, 2017. [En línea]. [Fecha de consulta: 20/1/2017] Disponible en: http://opex-energy.com/en/fotovoltaica/funcionamiento_fotovoltaica.html

4.4 MOVIMIENTO SOLAR

La tierra dibuja una elipse en su movimiento alrededor del Sol, que sumado con otros tipos de movimientos, resulta en que la tierra tenga diferentes posiciones según la época del año. La combinación de estos factores es relevante cuando se habla de captación y es necesario identificarlos claramente en función de un óptimo seguimiento solar.

La tierra realiza una rotación alrededor de su eje cada 23h 56m 4s y completa una revolución alrededor del sol en un período de aproximadamente 365,25 días (Año astronómico o Año sidéreo). Por ende, el calendario se ajusta haciendo un año bisiesto que tiene 366 días. Esta revolución no es circular, sino que sigue una elipse con el Sol en uno de los focos, esto resulta en que el planeta se encuentre en algún momento más alejado al sol, conocido como "afelio" y se produce en julio. Por el contrario, al momento más cercano es conocido como "perihelio" y sucede en enero. Estas dos posiciones son conocidas como solsticios de verano e invierno (ver figura 4). Además del movimiento de rotación, se encuentra el fenómeno denominado oblicuidad elíptica, el cual es el ángulo de inclinación entre la normal al plano elíptico y el eje polar de la tierra, equivalente a $23,5^\circ$. Esta inclinación es la que produce las estaciones del año.

Figura 4. Movimiento de la tierra alrededor del sol.

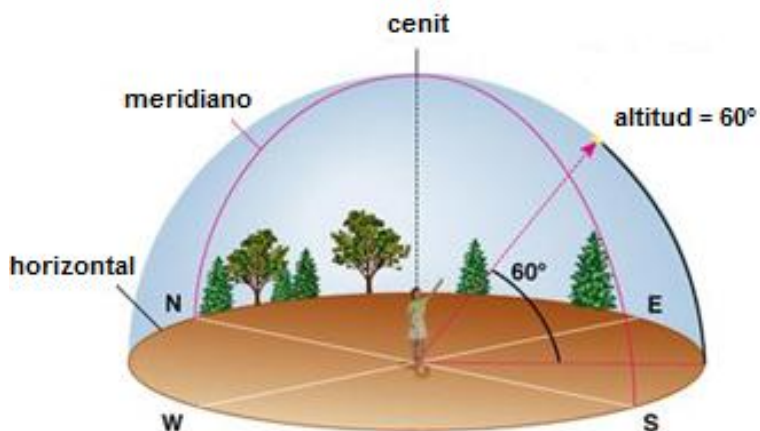


Fuente: Movimiento de rotación y traslación⁹

Con base en lo anterior, es que se plantea como meta la mayor captación de energía solar posible, siendo necesario determinar la posición del sol en el cielo respecto al plano horizontal del observador. Para esto, se supone un observador ubicado en el medio de una esfera (ver figura 5), y una línea normal a su plano horizontal que intersecta la esfera formando un punto llamado "cenit" y cuyo punto opuesto será llamado "nadir".

⁹ MOVIMIENTOS TERRESTRES. "Movimiento de rotación y traslación terrestre alrededor del sol", 2010. [En línea]. [Fecha de consulta: 20/1/2017] Disponible en: <http://rodriguezcardonarene.blogspot.com.co/2010/05/movimiento-de-rotacion-y-traslacion-de.html>

Figura 5. Observador de referencia.



Fuente: Cenit¹⁰

Definida la posición del observador en la esfera (ver figura 5), se definen los siguientes parámetros necesarios para describir completamente la posición del sol en el cielo para cualquier instante de tiempo y época del año:

4.4.1 Latitud (ϕ)

Es la distancia angular entre la línea ecuatorial y un punto determinado de la Tierra, medida a lo largo del meridiano en el que se encuentra dicho punto. Correspondiendo a:

$$\phi = 7,13^\circ$$

Para la ciudad de Bucaramanga, Colombia¹¹.

¹⁰ GLOSARIO. “Definición de cenit”, 2013. [En línea]. [Fecha de consulta: 20/1/2017] Disponible en: <http://glosarios.servidor-alicante.com/astrologia/cenit>

¹¹ COLOMBIA APRENDE. “Geografía Bucaramanga”, 2017. [En línea]. [Fecha de consulta: 20/1/2017] Disponible en: <http://www.colombiaprende.edu.co/html/familia/1597/article-85829.html>

4.4.2 Declinación solar (δ)

Es el ángulo formado entre el plano ecuatorial y la línea imaginaria que une al sol y la tierra. La declinación solar varía con el día del año entre $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$. Ver figura 6.

La declinación solar (δ) se determina mediante la ecuación dada por Cooper (1969)¹²:

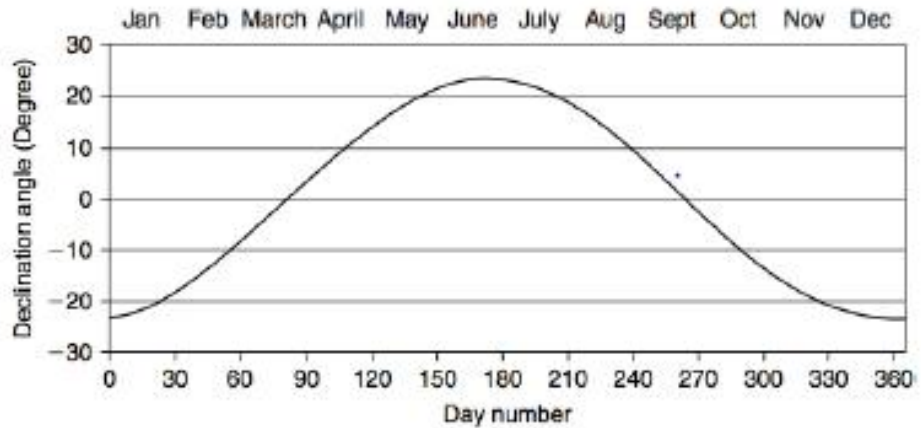
Ecuación 1. Declinación solar

$$\delta = 23,45 \sin \left(360 \frac{284 + n}{365} \right)$$

Donde n representa el día según calendario Juliano (calendario de 12 meses, 365 días al año y 366 días para años bisiestos).

¹² DUFFIE, John A. y BECKMAN William A. Op. cit. p.13

Figura 6. Variación anual de la declinación solar.



Fuente: Gráfica de declinación solar¹³

4.4.3 Hora solar

Es el tiempo usado para calcular todas las relaciones de posicionamiento solar y está basado en el movimiento angular aparente del sol en el cielo. Éste no coincide con la hora del reloj local (Hora estándar) y es necesario convertirlo a tiempo solar (Hora solar) mediante dos factores de corrección. El primero, hace referencia a la diferencia de longitudes (distancia que existe entre un punto cualquiera y el Meridiano de Greenwich) entre el meridiano de referencia local y el meridiano donde se encuentra ubicado el observador. El sol toma cuatro (4) minutos en recorrer un grado de longitud. El segundo, dado por la ecuación de tiempo E , toma en cuenta las perturbaciones sufridas por la tierra durante su rotación y que afecta el tiempo

¹³ KALOGIROU, Soteris A. Solar Energy engineering. Processes and Systems. Academic Pr. Inc. 760p. 2009

en que el sol cruza el meridiano del observador. La hora solar se determina mediante la siguiente ecuación:

Ecuación 2. Hora solar

$$\text{Holar solar} = \text{Hora estándar} + 4(L_{ST} - L_{LOC}) + E^{14}$$

Donde L_{ST} es el meridiano de referencia local (Bogotá para el caso de un observador en Colombia). L_{LOC} es la longitud del meridiano donde se encuentra ubicado el observador. La ecuación de tiempo E , en minutos, es dada por la ecuación de Spencer (1971):

Ecuación 3. Factor de corrección hora solar

$$E = 229,2(0,000075 + 0,001868\cos(B) - 0,032077\sin(B) - 0,014615\cos(2B) - 0,04089\sin(2B))$$

Donde

$$B = (n - 1) \frac{360}{365}$$

¹⁴ DUFFIE, John A. y BECKMAN William A. Op. cit. p.11

Y n es el día en calendario Juliano $1 \leq n \leq 365$.

Por ejemplo, para el día 1 de febrero a las 10:30 A.M en Bucaramanga se tiene que:

- $n = 32$
- $L_{ST} = 74^\circ$ (Longitud meridiano de Bogotá)
- $L_{LOC} = 73^\circ$ (Longitud de Bucaramanga)
- De la ecuación 4 tenemos: $B = 30,58$
- De la ecuación 3 tenemos: $E = -13,18$

Reemplazando estos valores en la ecuación 2 tenemos:

$$Hora\ solar = 10[hora]30[min] + 4(74 - 73)[min] + (-11,57)[min]$$

$$Hora\ solar = 10:20A.M.$$

4.4.4 Ángulo horario (ω)

Es el desplazamiento angular del Sol al este u oeste del meridiano local, debido a una rotación del eje de la tierra de 15° por hora. Toma signo positivo (+) en la mañana y negativo (-) en la tarde. Es calculado mediante las siguientes ecuaciones:

Ecuación 4. Ángulo horario

$$Hora\ solar = Hora\ solar[horas] + Hora\ solar[min] * \left(\frac{1[hora]}{60[min]} \right)$$

$$\omega = (Hora\ solar - 12)[hora] * \left[\frac{15^\circ}{1hora} \right]^{15}$$

4.4.5 Ángulo cenit (θ_z)

Es el ángulo formado por el rayo de sol incidente y el plano vertical del observador o línea cenit. Es calculado por la siguiente ecuación:

Ecuación 5. Ángulo cenit

$$\theta_z = \arccos[\sin(\delta) * \sin(\phi) + \cos(\delta) * \cos(\phi) * \cos(\omega)]^{16}$$

También puede ser descrito por su ángulo complementario que recibe el nombre de "Altura solar".

Ecuación 6. Altura solar

$$\alpha_s = 90 - \theta_z^{17}$$

4.4.6 Ángulo de azimut solar (γ_s)

Es el ángulo formado por la línea norte-sur y la proyección horizontal de la dirección de la radiación solar: $-180^\circ \leq \gamma \leq 180^\circ$. Es positivo cuando se mide en dirección sur-este y negativo en la dirección sur-oeste (ver figura 6b). Puede ser calculado mediante la siguiente ecuación:

¹⁵ DUFFIE, John A. y BECKMAN William A. Op. cit. p.13

¹⁶ Ibid. P. 15

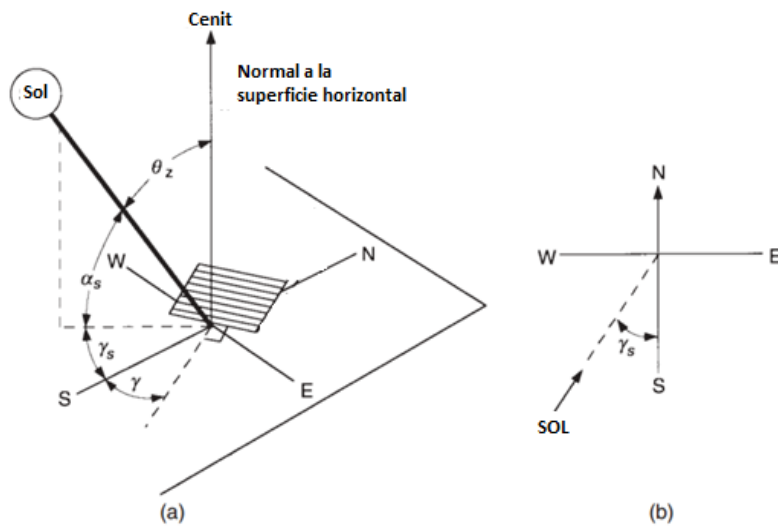
¹⁷ Ibid.

Ecuación 7. Ángulo azimut solar

$$\gamma_s = \arcsin \left[\frac{\sin(\omega) * \cos(\delta)}{\cos(\alpha_s)} \right]$$

Los ángulos anteriormente enseñados se aprecian gráficamente en la figura 7 y su respectiva nomenclatura en la tabla 1.

Figura 7. Ángulos de posicionamiento solar



Fuente: Ángulos de movimiento solar¹⁸

¹⁸ DUFFIE, John A. y BECKMAN William A. Op. cit. p.14.

Tabla 1. Nomenclatura ángulos de posicionamiento solar

δ	Declinación solar
ω	Ángulo horario
θ_z	Ángulo cenit
α_s	Altura solar
γ_s	Ángulo de azimut solar
γ	Complemento del ángulo Azimut

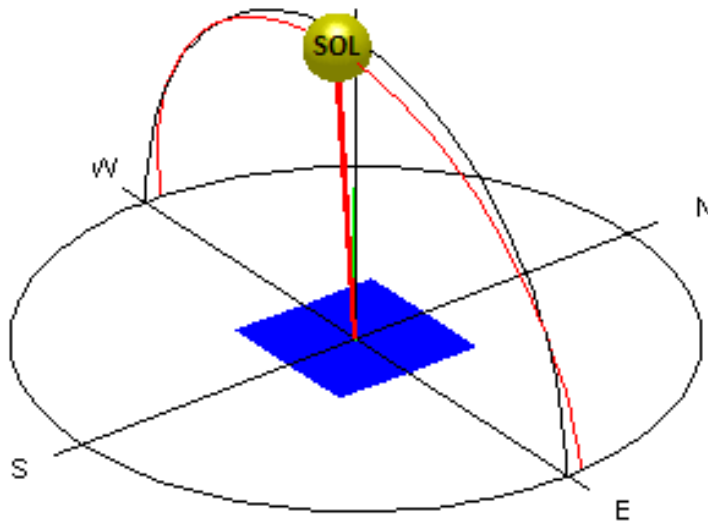
4.4.7 Movimiento solar en la ciudad de Bucaramanga

Considerando que el proyecto se diseñó para medir la radiación solar incidente en la ciudad de Bucaramanga (latitud, se desarrolló el presente inciso para dar claridad al movimiento del sol en el cielo de la ciudad en cualquier época del año.

Tomando en cuenta que la declinación solar varía entre $-23.45^\circ \leq \delta \leq 23.45^\circ$ (inciso 4.4.2) a lo largo del año juliano y que la latitud para la ciudad de Bucaramanga es $\phi = 7,13^\circ$ (inciso 4.4.1) se tienen los siguientes casos de movimiento solar:

- Caso 2: ($0^\circ \leq \delta \leq 7,13^\circ$): Ésta es una condición especial para los días comprendidos del 21 de marzo al 8 de abril y del 2 al 21 de septiembre. La trayectoria del sol se desarrollará tanto en el semiplano Sur como en el Norte (ver **Figura 99**).

Figura 9. Trayectoria del sol en el plano terrestre

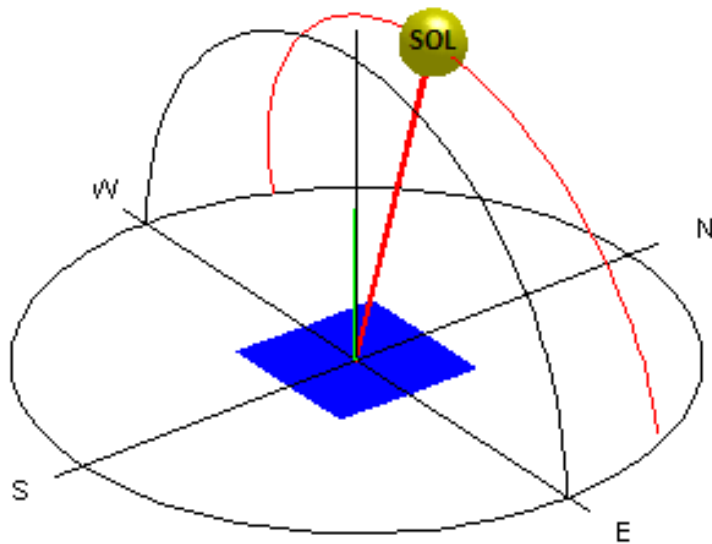


Fuente: Calculadora solar²⁰

²⁰ Ibid.

- Caso 3: ($\delta > 7,13^\circ$), la trayectoria del sol se desarrollará en el semiplano Norte (ver figura 10) cuando la declinación solar tome valores positivos mayores a la latitud de la ciudad de Bucaramanga ($\phi = 7,13^\circ$).

Figura 10. Trayectoria del sol en semiplano Norte



Fuente: Calculadora Solar²¹

²¹ Ibid.

4.5 DESCRIPCIÓN DE EQUIPOS PARA LA TOMA DE DATOS DE RADIACIÓN SOLAR

4.5.1 Sensores de radiación solar

Son instrumentos meteorológicos utilizados para medir la densidad del flujo (KW/m^2) de los rayos solares sobre una superficie horizontal de la tierra (180°) de una manera muy precisa. Pueden ser clasificados de acuerdo a la componente de radiación solar que miden como: Piranómetro (radiación global) y pirheliómetro (radiación directa). La componente difusa de la radiación solar es medida por un piranómetro junto a un sistema de sombra solar

También éstos sensores son clasificados por el principio físico con que funcionan en: Sensor Térmico y Sensor fotovoltaico.

El sensor térmico utiliza el principio de detección termoeléctrica, por el que la radiación entrante es absorbida casi en su totalidad por una superficie horizontal ennegrecida, para una gama de longitudes de onda muy amplia. El incremento de la temperatura resultante se mide a través de termopares conectados en serie o en serie/paralelo para conformar la termopila.²²

Por otro lado, en el sensor fotovoltaico la radiación incide sobre un fotodiodo que genera una variación de voltaje. El fotodiodo es capaz de diferenciar el espectro

²² KIPP & ZONEN. “Principio de funcionamiento de un piranómetro de termopila”, 2015. [En línea]. [Fecha de consulta: 10/04/2017]. Disponible en: http://www.kippzonen.es/News.aspx?id=575#.WOv5F_k1_IU

solar por la frecuencia de la onda electromagnética, y de ese modo, mediante la lectura de voltaje, conocer los datos de radiación.

4.5.1.1 Piranómetro Kipp&Zonen CMP3. La construcción del sensor de termopila mide la energía solar que se recibe a partir del espectro solar total y todo el hemisferio (180 grados campo de visión)²³. Ver figura 11.

Figura 11. Piranómetro térmico Kipp&Zonen CMP3 segunda clase.



Fuente: Kipp&Zonen CMP3²⁴

- Certificación ISO 9060: 1990 de segunda clase.
- Medición de onda corta, rango espectral de 300 a 2800 nm.
- El detector mide la irradiancia termopila hasta 2000 W/m^2 .

²³ KIPP & ZONEN. "CMP3 Pyranometer", 2016. [En línea]. [Fecha de consulta: 10/1/2016] Disponible en: http://www.kippzonen.com/Product/11/CMP3-Pyranometer#.VrUuNVV_Oko

²⁴ Ibid.

- Tiempo de respuesta menor a 18 segundos.
- Rango de salida prevista 0 – 30mV.

4.5.1.2 Piranómetro DAVIS DS6450. Es un piranómetro de tipo fotovoltaico, convierte la radiación incidente en corriente eléctrica, esta respuesta es dada por un fotodiodo de silicio²⁵. Ver figura 12.

Figura 12. Piranómetro fotovoltaico Davis DS6450.



Fuente: Davis DS6450²⁶

- Medición de onda corta, rango espectral de 400 a 1100 nm.
- El detector mide la irradiancia termopila hasta 1800 W/m².
- Tiempo de respuesta menor a 25 segundos.
- Rango de temperatura de funcionamiento entre -40°C a + 65°C.

²⁵ DAVIDS INSTRUMENTS. "Solar Radiation Sensor", 2016. [En línea]. [Fecha de consulta: 10/1/2016] Disponible en: http://www.davisnet.com/product_documents/weather/spec_sheets/6450_SS.pdf

²⁶ Ibid.

- Rango de salida prevista 0 – 3V

4.5.1.3 Pirheliómetro Kipp&Zonen CHP1. Ofrece una alta precisión y fiabilidad. Cumple plenamente con los criterios más actuales de rendimiento ISO, cada CHP1 está calibrado durante la fabricación²⁷. Ver figura 13.

Figura 13. Pirheliómetro Kipp&Zonen CHP1



Fuente: Kipp&Zonen CHP1²⁸

- Certificación ISO 9060: 1990 de primera clase.
- Medición de onda corta, rango espectral de 200 a 4000 nm.
- El detector mide la irradiancia termopila hasta 4000 W/m^2 .
- Tiempo de respuesta menor a 5 segundos.

²⁷ KIPP & ZONEN. “CHP1 Pyrheliometer”, 2016. [En línea]. [Fecha de consulta: 10/1/2016]
Disponible en: http://www.kippzonen.com/Product/18/CHP1-Pyrheliometer#.VrVWPiV_Okp

²⁸ Ibid.

- Rango de temperatura de funcionamiento entre -40°C a $+80^{\circ}\text{C}$.
- Rango de salida prevista $0 - 30\text{mV}$.

4.5.2 Sistema de sombra solar.

Es un accesorio empleado en conjunto con el piranómetro con el objetivo de bloquear la radiación directa proveniente del sol (Generando una sombra) y facilitar la cuantificación de radiación difusa y reflejada. Ver figura 14.

Figura 14. Piranómetro con anillo de sombra.



Fuente: Espira de sombra CM121B/C²⁹

²⁹ KIPP & ZONEN. “Espiras de sombra CM121B/C”, 2016. [En línea]. [Fecha de consulta: 10/1/2016]
Disponible en: http://www.kippzonen.com/Product/18/CHP1-Pyrheliometer#.VrVWPiV_Okp

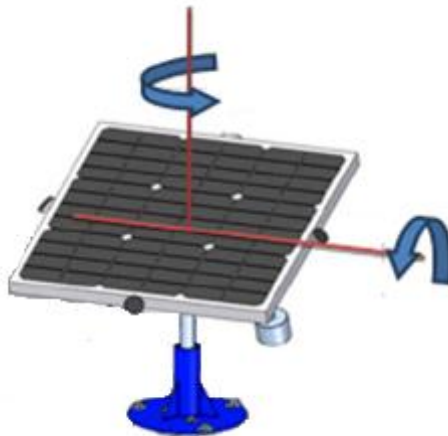
4.5.3 Seguidor solar

Como su nombre lo indica, es un instrumento creado para el seguimiento constante del sol, tal cual como lo hace un girasol en la naturaleza.

Se adapta junto con un pirheliómetro para garantizar un enfoque constante del sol por parte del sensor, logrando una incidencia casi normal del rayo de luz en el lente del sensor.

El seguidor solar utilizado es una aplicación de un proyecto desarrollado por estudiantes de la Universidad Industrial de Santander para orientar paneles solares. Ver figura 15.

Figura 15. Seguidor solar



Fuente: Seguidor solar para paneles solares³⁰

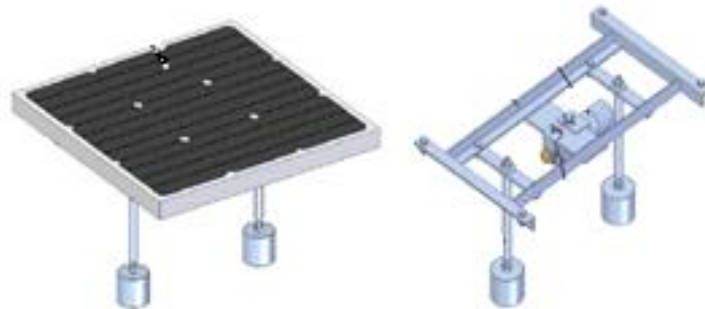
³⁰ MIRANDA, Juan y GOMEZ, Ricardo: Diseño, construcción y evaluación de un sistema de colector fotovoltaico con seguidor solar de 2 grados de libertad, Bucaramanga, 2011. Trabajo de grado (Ingeniería Mecánica). Universidad Industrial de Santander. Facultad de Ingenierías Físico-mecánicas.p.120

5. REDISEÑO DEL SEGUIDOR SOLAR

El laboratorio de sistemas térmicos de la escuela de Ingeniería Mecánica cuenta con un seguidor solar de dos grados de libertad, desarrollado bajo la modalidad de proyecto de grado³¹, utilizado para el posicionamiento de paneles solares. Ver figura 15.

Éste sistema de seguimiento solar cuenta con dos grados de libertad y su algoritmo calcula los ángulos de posicionamiento mediante las ecuaciones de movimiento solar descritas en el capítulo 4. Los elementos utilizados para el lazo cerrado son: Arduino AT-mega (Controlador), Potenciómetros logarítmicos (sensores) y Motores DC (actuadores). Trabaja bajo un control proporcional (P). Pero su estructura fue adecuada para movilizar paneles solares. Ver figura 16.

Figura 16. Modulo Superior



Fuente: Modulo Superior³²

³¹ Ibid

³² Ibid. p.52

Dado que el pirheliómetro Kipp&Zonen CHP1 es un sensor que mide radiación solar directa, debe estar orientado hacia el sol, y necesita estar acoplado a un sistema de seguimiento solar. Por lo tanto, es de vital importancia realizar un rediseño mecánico, electrónico y del lazo cerrado de control del seguidor solar para conseguir ensamblar estos dos equipos.

Éste rediseño se realizó siguiendo fielmente las recomendaciones enunciadas por los desarrolladores de este primer prototipo de seguidor solar³³.

5.1 REDISEÑO MECÁNICO Y ESTRUCTURAL

Con el fin de dar un soporte al pirheliómetro Kipp&Zonen CHP1, permitir el movimiento en sus dos grados de libertad y posicionarlo en dirección al sol, se conservó el modulo vertical (ver figura 17), compuesto por los elementos que comandan el posicionamiento del Azimut, y la camisa superior (ver figura 18).

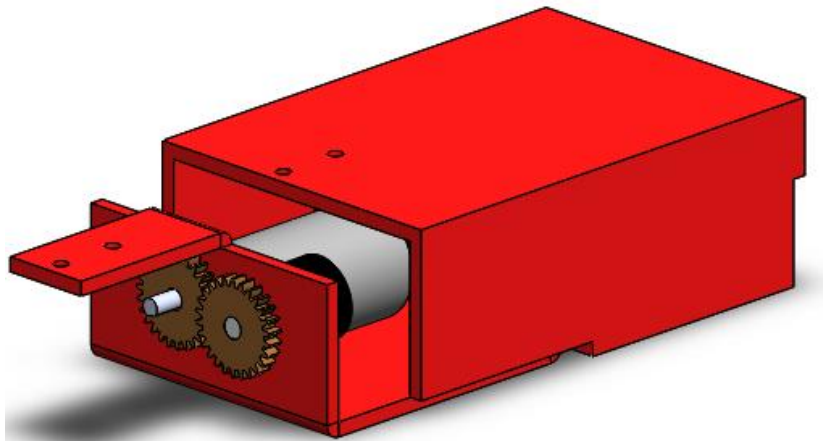
³³ Ibid. p.133

5.1.1 Soporte superior motorreductor altura solar

A partir de las piezas que se conservaron, se diseñó un conjunto de chapa metálica que garantizara el montaje y la protección de los elementos del lazo cerrado de la altura solar.

Éste conjunto permite un ensamble en paralelo del motor DC (actuador) y el potenciómetro (sensor) que mediante una transmisión mecánica por engranajes crea el montaje del lazo cerrado (Ver figura 19). Simultáneamente el conjunto de chapa metálica es acoplado a la camisa superior para transmitir el movimiento al pirheliómetro.

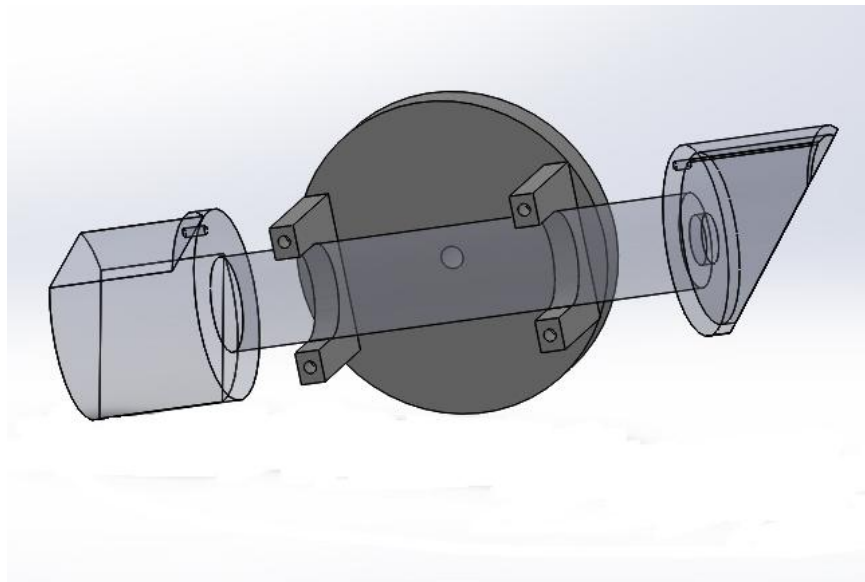
Figura 19. Conjunto de chapa metálica



5.1.2 Plato basculante pirheliómetro Kipp&Zonen CHP1

Avalado el montaje del lazo cerrado de control de la altura solar, se diseñó un soporte móvil que permite la integración del pirheliómetro con el sistema de seguimiento solar. Éste diseño fue basado en un brazo robótico visto en un laboratorio FESTO. Ver figura 20.

Figura 20. Plato basculante



5.1.3 Diseño de engranajes para las transmisiones mecánicas requeridas.

Tal y como se mencionó anteriormente (ítem 5.1.1.), se tienen dos tipos de transmisiones mecánicas que se utilizarán en el seguidor solar para el movimiento de la altura y el azimut solar, respectivamente. Para la altura solar, la relación de transmisión es de 1:1, ya que el potenciómetro solo tendrá que trabajar en un intervalo de $0^\circ - 180^\circ$. Por otra parte, dado que el intervalo del ángulo azimut es de $0^\circ - 360^\circ$ se escogió una relación de transmisión 2,5:1 aproximadamente.

A continuación se presentan los detalles de diseño de los engranajes (ver tabla 2) para cada una de las transmisiones a utilizar:

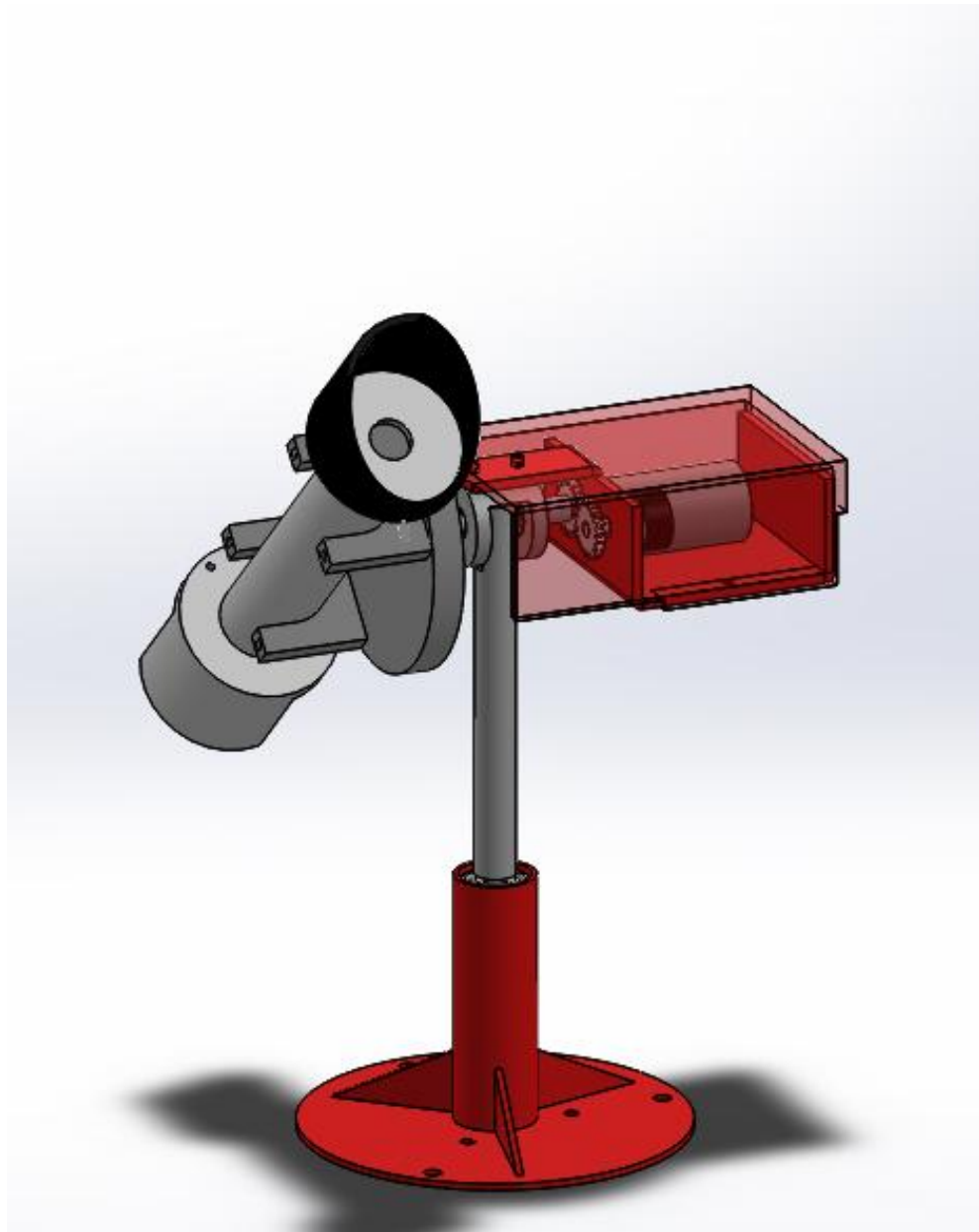
Tabla 2. Especificaciones de los engranajes

	ALTURA SOLAR		AZIMUT SOLAR	
	Motoreductor	Potenciometro	Motoreductor	Potenciometro
Paso	3,145	3,145	3,145	3,145
Módulo	1	1	1	1
Altura del diente	2,25	2,25	2,25	2,25
Número de dientes	28	28	17	46
Ángulo de presión	20	20	20	20
Diámetro Primitivo (mm)	28	28	17	46
Diámetro Exterior (mm)	30	30	18,5	48
Diámetro Interior (mm)	25,5	25,5	14,5	44
Relación	1		2,705	
Distancia entre centros (mm)	28		31,5	

Nota: Dado que la relación de engranajes se diseñó para una transmisión de movimiento (del motor al potenciómetro) y no para transmisión de potencia, los cálculos de esfuerzos mecánicos en los engranajes se desprecian.

Posteriormente, definidos los cambios estructurales y de diseño mecánico que tendrá el seguidor solar en pro de una instalación en conjunto con el pirheliómetro se tiene un diseño final, mostrado en la figura 21.

Figura 21. Rediseño seguidor solar.



5.2 REDISEÑO DEL MÓDULO DE CONTROL

5.2.1 Componentes electrónicos del lazo cerrado de control

En esta sección se hará especial énfasis en aquellos elementos electrónicos que fueron alterados (sensores, pre-actuadores y actuadores) en pro de un mejor desempeño por parte del seguidor solar. El controlador Arduino AT-mega 2560 y el reloj de tiempo real DS1307 se conservaron sin novedad alguna.

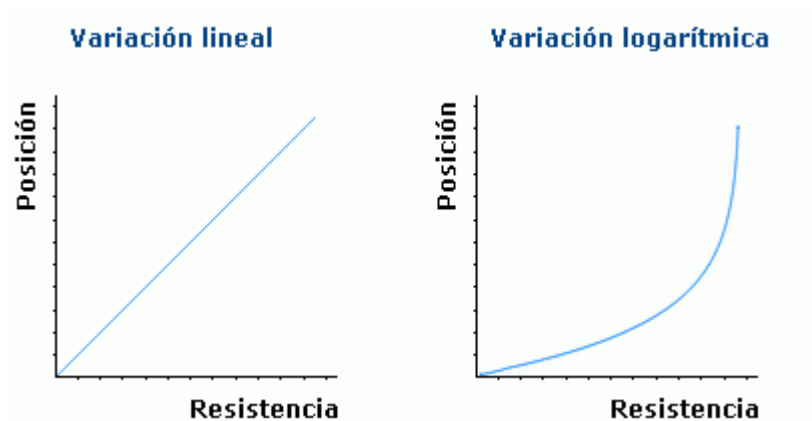
5.2.1.1 Sensores de posición angular

El elemento utilizado para la medición de la posición angular es un potenciómetro. El cual es un elemento resistivo que tiene un contacto deslizante (llamado cursor) que puede desplazarse a lo largo del elemento (estos elementos se pueden usar en desplazamientos lineales o rotacionales)³⁶. Este cambio de resistencia se traduce en un cambio de voltaje interpretado por el controlador, permite la medición de la posición angular de cada coordenada (Azimut y Altura Solar) del seguidor solar.

Inicialmente se tiene un potenciómetro logarítmico, cuyo cambio de resistencia es dado por una función logarítmica. Esta clase de potenciómetro proporciona una posición angular en pasos desiguales (ver figura 22), por lo que escalar 360° resulta más difícil y menos preciso. Usualmente tienen un alto porcentaje de error por histéresis.

³⁶ BOLTON, William. Sistemas de control electrónico en la ingeniería mecánica y eléctrica. 5ta Edición. Alfaomega. P.35

Figura 22. Variación de resistencia potenciómetro lineal y logarítmico con la posición



Fuente: Clases de potenciómetros³⁷

Entonces, se decide reemplazar los anteriores por potenciómetros lineales de 5K y una vuelta (312°). Con éstos elementos la caída de voltaje será dada por una función lineal (ver figura 22) y tendremos pasos iguales para cada ángulo barrido por el seguidor solar. Mejorando la precisión.

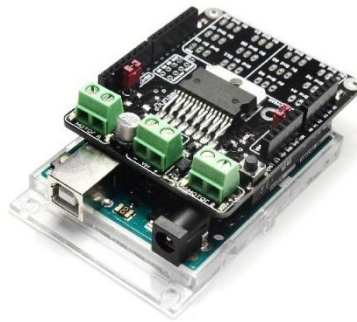
³⁷ EL RESISTOR. "Tipos de potenciómetros", 2016. [En línea]. [Fecha de consulta: 10/1/2016]
Disponible en: <http://www.forosdeelectronica.com/>

5.2.1.2 Pre-actuadores

Un pre-actuador es un dispositivo electrónico que hace de interfaz entre el controlador y el actuador, separando la señal de control de la señal de potencia.

Nuestro pre-actuador es un puente H L298N, el cual es un dispositivo electrónico que permite controlar arbitrariamente el giro de un motor de acuerdo a una señal de entrada. Empleamos un módulo controlador de motores que funcionan como un “shield” o complemento de Arduino brindándonos un circuito compacto. Ver figura 23.

Figura 23. Módulo controlador de motores dynamotion V3



Fuente: Modulo puente H³⁸

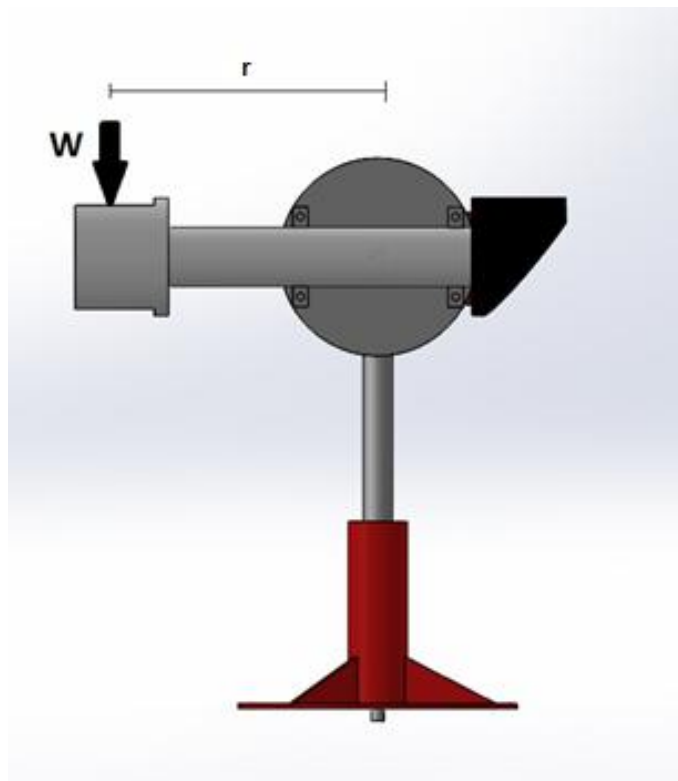
³⁸ EL RESISTOR. “Tipos de potenciómetros”, 2016. [En línea]. [Fecha de consulta: 10/1/2016]
Disponible en: <http://www.forosdeelectronica.com/>

5.2.1.2 Actuadores

Para seleccionar los motorreductores es necesario establecer los requerimientos de torque del sistema. A continuación, se realizan los cálculos pertinentes suponiendo situaciones de carga máxima en cada uno de los movimientos (azimut y altura solar).

- Motorreductor altura solar: El pirheliómetro concentra la mayor parte de su peso en la parte inferior del sensor, por lo tanto, la situación de torque máximo (carga máxima) se producirá cuando ésta parte se encuentre localizada a un extremo del montaje y totalmente horizontal. Ver figura 24.

Figura 24. Cálculo de torque altura solar



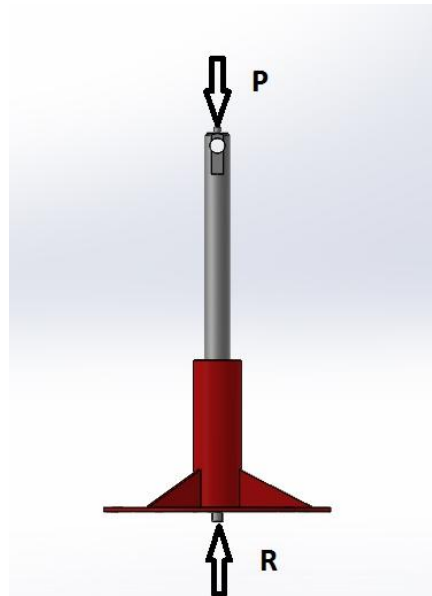
Sabiendo que $r = 15 [cm]$, $W = 0,9 [Kg]$ ³⁹, y por medio de la ecuación de torque:

$$T_{altura\ solar} = W * r = 0,9 [Kg] * 15 [cm]$$

$$T_{altura\ solar} = 13,5 [Kg * cm]$$

- Motorreductor azimuth: Debido a la configuración del sistema, los momentos producidos por el peso de los elementos del lazo cerrado de la altura solar y el pirheliómetro se contrarrestan, por lo cual se modela como una carga concentrada (P) que actúa axialmente en el eje de azimuth solar (Ver figura 25). Por lo tanto, el motorreductor solo debe vencer la fuerza de rozamiento existente en el rodamiento.

Figura 25. Cargas axiales en el eje de azimuth



³⁹ KIPP & ZONEN. "CHP1 Instruction sheet", 2017. [En línea]. [Fecha de consulta: 22/1/2017]
Disponible en: http://www.kippzonen.com/Product/18/CHP1-Pyrheliometer#.WIV2N1M1_IU

En base a los cálculos anteriores, se seleccionaron los siguientes motorreductores encontrados en el mercado (ver figura 26):

- Motorreductor 18 Kg.cm, Vel. 80 RPM, 12Vdc, relación 131:1
- Motorreductor 13 Kg.cm, Vel. 32 RPM, 12Vdc, relación 172:1

Figura 26. Motorreductor DC



Fuente: Motores DC⁴⁰

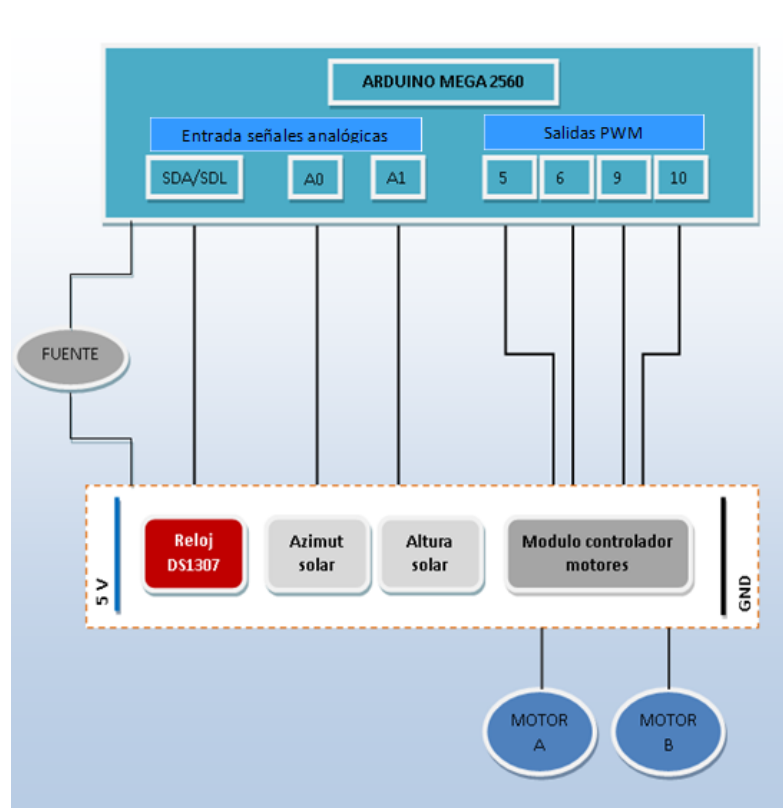
⁴⁰ MOTORES DC. “Actuadores”, 2016. [En línea]. [Fecha de consulta: 14/04/2017] Disponible en: www.dynamoelectronics.com

5.2.2.3 Circuito electrónico

En el inciso anterior se presentaron los elementos electrónicos que fueron cambiados y qué ventajas adicionales aportan al nuevo diseño. Por ende, a continuación se presenta el circuito esquemático del seguidor solar. Ver figura 27. El diagrama de conexiones detallado se encuentra en el Anexo A.

Las entradas de señales analógicas hacen referencia a las medidas tomadas por parte del Reloj DS1307 y los sensores de posición angular (Potenciómetros) en el azimut y la altura solar, mientras que las salidas PWM son las señales de corrección que envía el controlador.

Figura 27. Circuito esquemático lazo cerrado de control

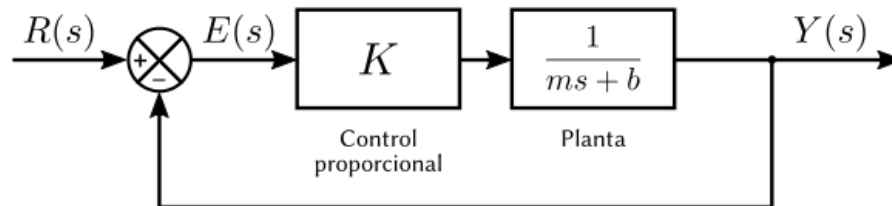


5.2.2 Control de lazo cerrado (Control Proporcional)

En el control de lazo cerrado, el controlador se usa para comparar la salida de un sistema con la condición requerida y convertir el error que resulta en una acción de control diseñada para reducir el error⁴¹.

El control proporcional (Control P) es un modo de control en lazo cerrado que produce una acción de control proporcional al error, es decir, la señal de control aumentara en la medida que lo haga el error y viceversa. Ver figura 28.

Figura 28. Control Proporcional (P)



Fuente: Controladores en lazo cerrado⁴²

Inicialmente, el sistema de seguimiento solar cuenta con un modo de control proporcional (Control P) en donde la señal de entrada o "setpoint" ($R(s)$) es el ángulo calculado por las ecuaciones de movimiento solar (ver inciso 4.4), a partir de la lectura del reloj DS1307. La modificación que se realizó en ésta parte del control fue la inclusión de los factores de corrección de la hora solar (ver inciso 4.4.3). El error ($E(s)$) es la diferencia entre el setpoint y la señal retroalimentada del potenciómetro

⁴¹ BOLTON, William. Op cit .p.333

⁴² Ibid. p.340

($Y(s)$). Éste error es multiplicado por la ganancia proporcional del control, generando la acción correctiva que será llevada al sistema.

5.2.3 Algoritmo de control con el Software Arduino

Arduino es una plataforma de prototipos electrónicos de código abierto (open-source) basada en hardware y software flexibles y fáciles de usar⁴³. El software Arduino está basado en un ambiente de desarrollo Java y el lenguaje de programación puede ser expandido mediante librerías C++. Al ser un software “open-source” el usuario puede acceder a este de manera gratuita, es decir, es uno de los micro controladores más económicos del mercado actual.

Para el desarrollo del algoritmo de control se utilizó la versión Arduino 1.6.9 y su interfaz gráfica inicial se muestra en la figura 29.

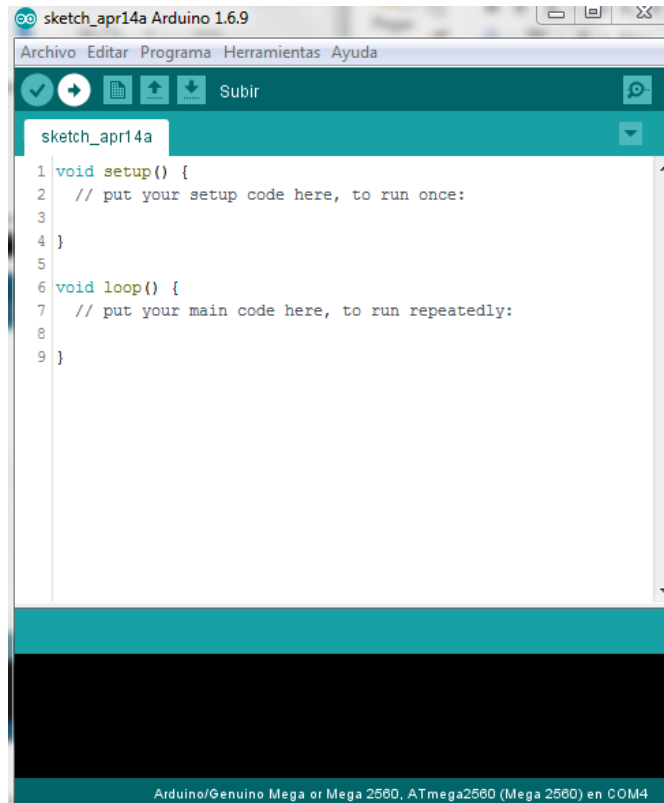
El algoritmo preexistente tiene dos modos de operación: el primero mediante el cálculo de la posición solar con ecuaciones de movimiento y el segundo mediante fotoceldas, procurando la mayor incidencia de luz. Según las conclusiones de los desarrolladores del primer prototipo de seguidor solar⁴⁴, el mejor sistema de seguimiento es aquel que trabaja con las ecuaciones de movimiento solar. Por lo tanto, se realizó una depuración del código y se incluyeron nuevos casos de movimiento para el azimut y la altura solar en pro de evitar movimientos bruscos por parte del seguidor que estropearan el pirheliómetro.

⁴³ ARDUINO. ¿Qué es arduino?, 2017. [En línea]. [Fecha de consulta: 12/04/2017] Disponible en: <http://arduino.cl/que-es-arduino/>

⁴⁴ MIRANDA, Juan y GOMEZ, Ricardo. Op. cit. p.132

A continuación se explican las funciones de programación utilizadas y el código se puede ver en el Anexo H.

Figura 29. Interfaz de programación Arduino 1.6.9



```
sketch_apr14a Arduino 1.6.9
Archivo  Editar  Programa  Herramientas  Ayuda
Subir
sketch_apr14a
1 void setup() {
2   // put your setup code here, to run once:
3
4 }
5
6 void loop() {
7   // put your main code here, to run repeatedly:
8
9 }
```

Arduino/Genuino Mega or Mega 2560, ATmega2560 (Mega 2560) en COM4

Fuente: Arduino⁴⁵

⁴⁵ ARDUINO. Op. cit.

5.2.3.1 Librerías Arduino

Las librerías son colecciones de código que facilitan la interconexión del micro controlador con sensores, pantallas, módulos electrónicos, etc. El entorno Arduino ya incluye algunas librerías predeterminadas (EEPROM, Ethernet, etc.).

Las librerías utilizadas en el algoritmo de control fueron:

- Wire.h: establece la comunicación con dispositivos de protocolo de comunicación I2C/TWI.
- RTCLib.h: Facilita la comunicación entre un módulo RTC (Real Time Clock), reloj de tiempo real DS1307, y Arduino. También establece los datos de fecha y hora a partir de los cuales el reloj empezara a contar.

5.3.2.2 Declaración de variable

Las variables son declaradas de acuerdo al tipo de datos que vayan a manejar (Números enteros, números decimales, etc.). El tipo de variables en el algoritmo de control son:

- Int (entero): Guarda valores de numeros enteros de 2 bytes, del rango de -32,768 a 32,768.
- Float (Decimales): Guarda valores decimales con 6-7 digitos decimales de presicion y los valores van desde 3.4028235E+38 a -3.4028235E+38.
- Double (Decimales): En algunas placas Arduino guarda valores decimales con mayor precisión que la variable Float.

5.3.2.3 Funcion analogRead

Lee el valor medido de un pin analógico seleccionado. Ésta función permite la lectura de datos de los potenciómetros lineales que van de 0-5V DC y los ubica en un rango de 0 a 1023 dada la resolución de la placa Arduino de 10 bits.

5.3.2.4 Función analogWrite

Escribe un valor analógico (PWM) para el pin seleccionado. Ésta función controla los pines de salida PWM de la placa Arduino y por medio de ella se envía la señal de corrección a los pre-actuadores.

5.3.2.5 Función RTC.begin

Inicia la comunicación (envío y recepción de datos) con el reloj DS1307 a través de los puertos SDA/SCL de la placa Arduino.

5.3.2.4 Función RTC.adjust

Establece la fecha y hora a partir de la cual empezara a trabajar el reloj DS1307. Toma la fecha y hora actual del computador.

5.3.2.5 Función DateTime now

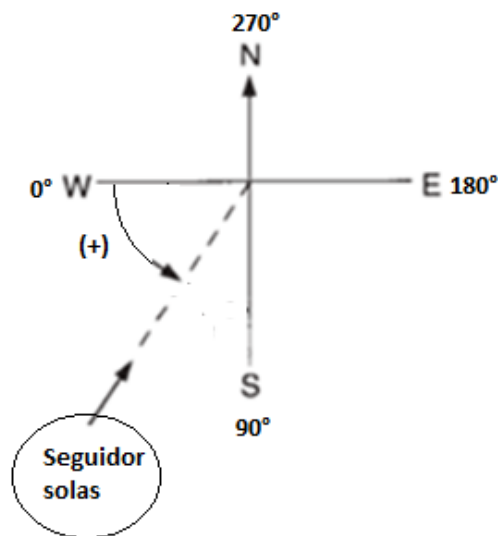
Retorna los valores de fecha y hora medidos por el reloj DS1307 a la placa Arduino.

5.3.2.6 Casos de movimiento para el azimut y la altura solar

Primero, se establece un sistema de referencia cartesiano que describe el movimiento del seguidor solar en el plano azimutal (Plano horizontal terrestre). Ver figura 30.

Éste sistema permitirá relacionar el intervalo de movimiento angular que tiene el potenciómetro lineal (0° - 400° aprox.) con el valor de salida de la ecuación 9 (inciso 4.4.6) para el ángulo de azimut solar.

Figura 30. Movimiento angular del seguidor solar en el plano azimutal



Como origen para la medida de la posición angular del seguidor solar en el plano azimutal, se tomó el punto cardinal Oeste (0° y 360°) y aumentando en dirección al Sur (90°), Este (180°) y Norte (270°).

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado y recordando el movimiento del sol en la ciudad de Bucaramanga (inciso 4.4.7), se establecen los casos de movimiento para el azimut solar y los diagramas de flujo de sus respectivos algoritmos se presentan en las figuras 31, 32 y 33.

Éstos casos básicamente recalculan el setpoint a partir del ángulo azimut (obtenido mediante la ecuación 9) y una operación matemática (suma o resta de ángulos) de acuerdo a la época del año, para así encontrar la posición a la que debe dirigirse el seguidor solar en el sistema de referencia establecido anteriormente (ver figura 30).

Figura 31. Diagrama de flujo Caso 1

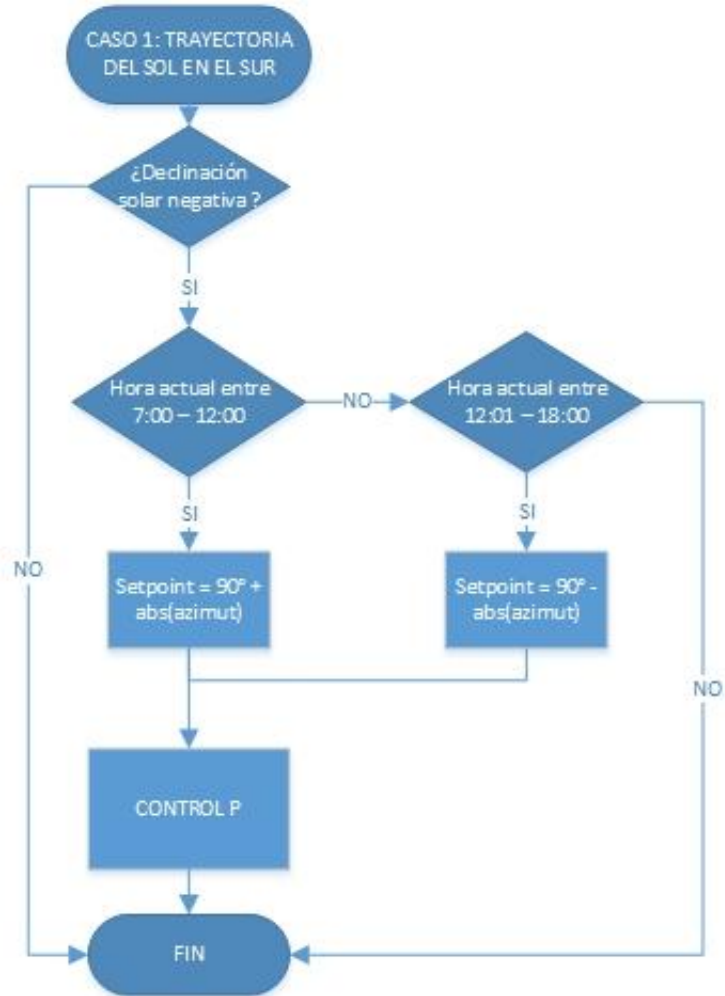


Figura 32. Diagrama de flujo Caso 2

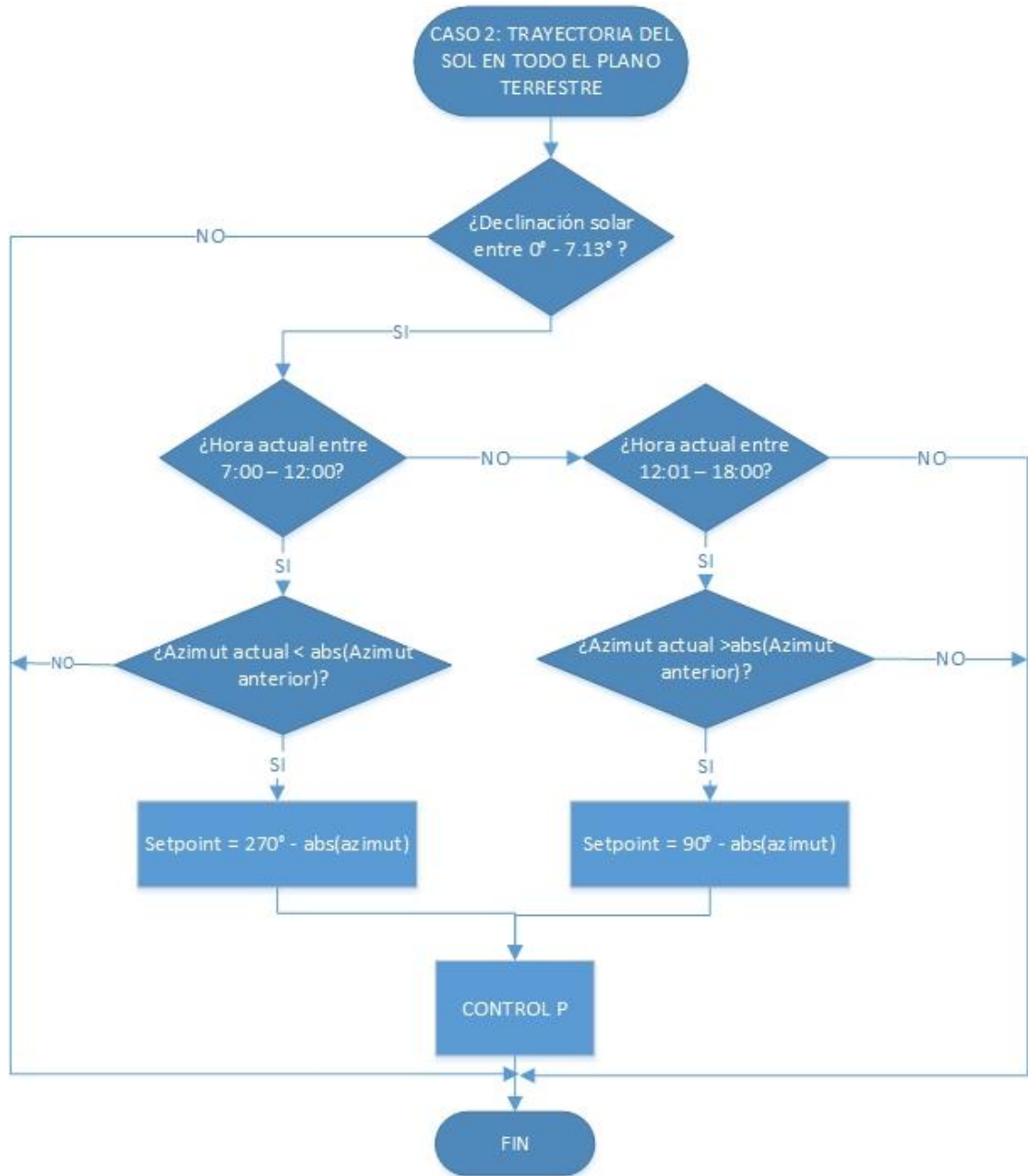
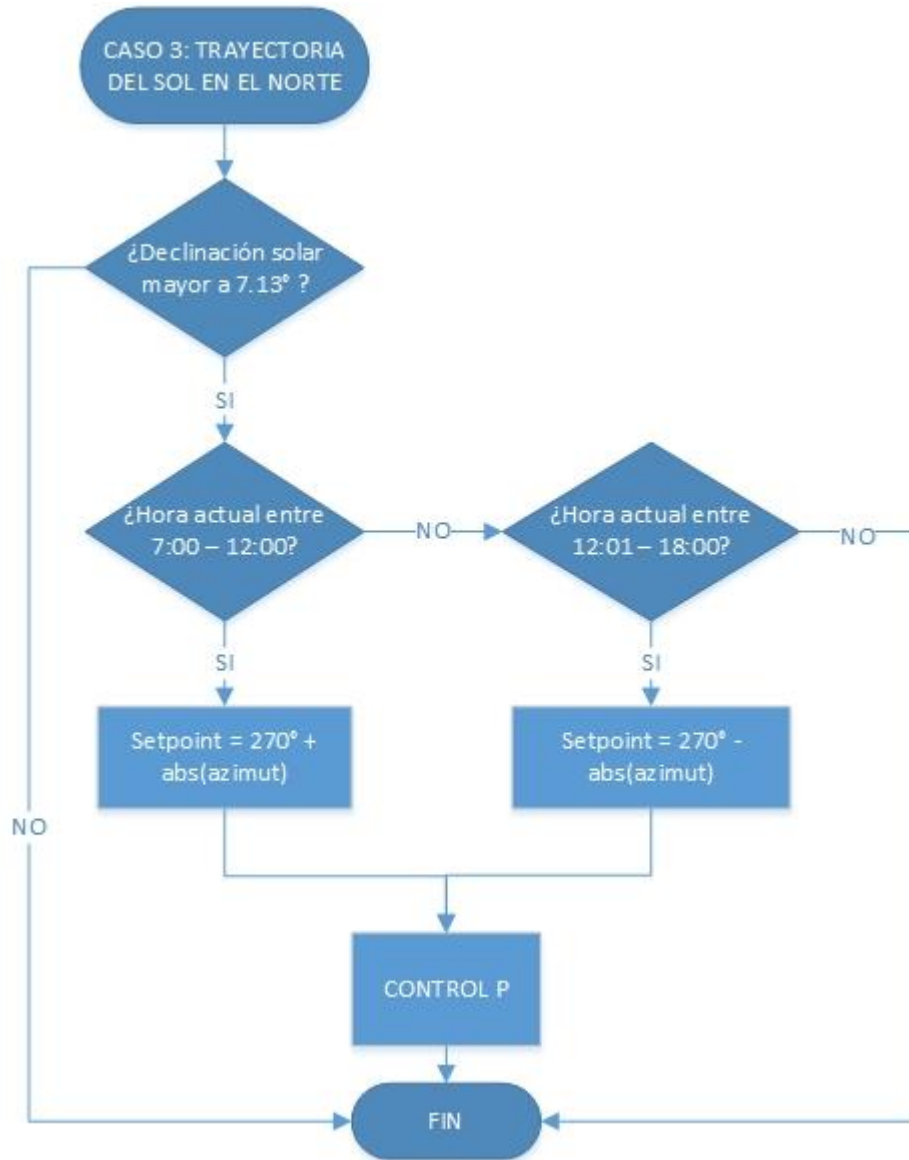


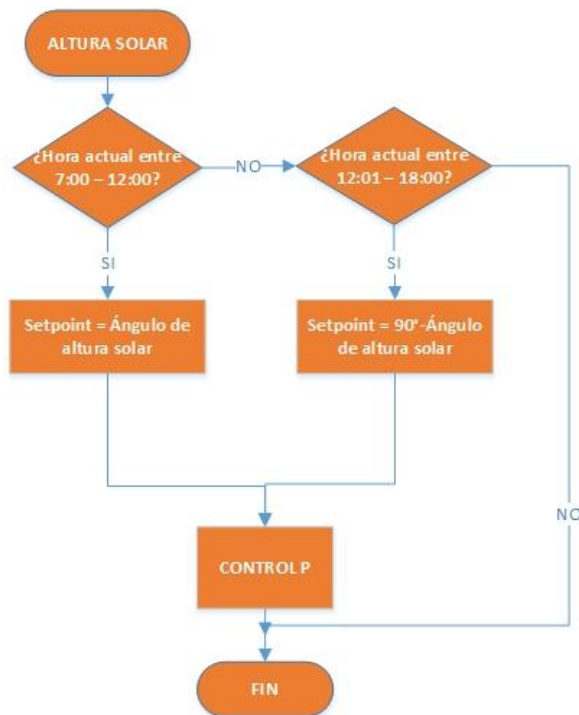
Figura 33. Diagrama de flujo Caso 3



El caso de movimiento para la altura solar se diseñó para cumplir las especificaciones de funcionamiento del pirheliómetro Kipp&Zonen CHP1 dadas por el fabricante, en donde el sensor debe trabajar en un intervalo de altura solar de 0 – 90°⁴⁶.

El diagrama de flujo del algoritmo para el movimiento de la altura solar se presenta en la figura 34.

Figura 34. Diagrama de flujo altura solar

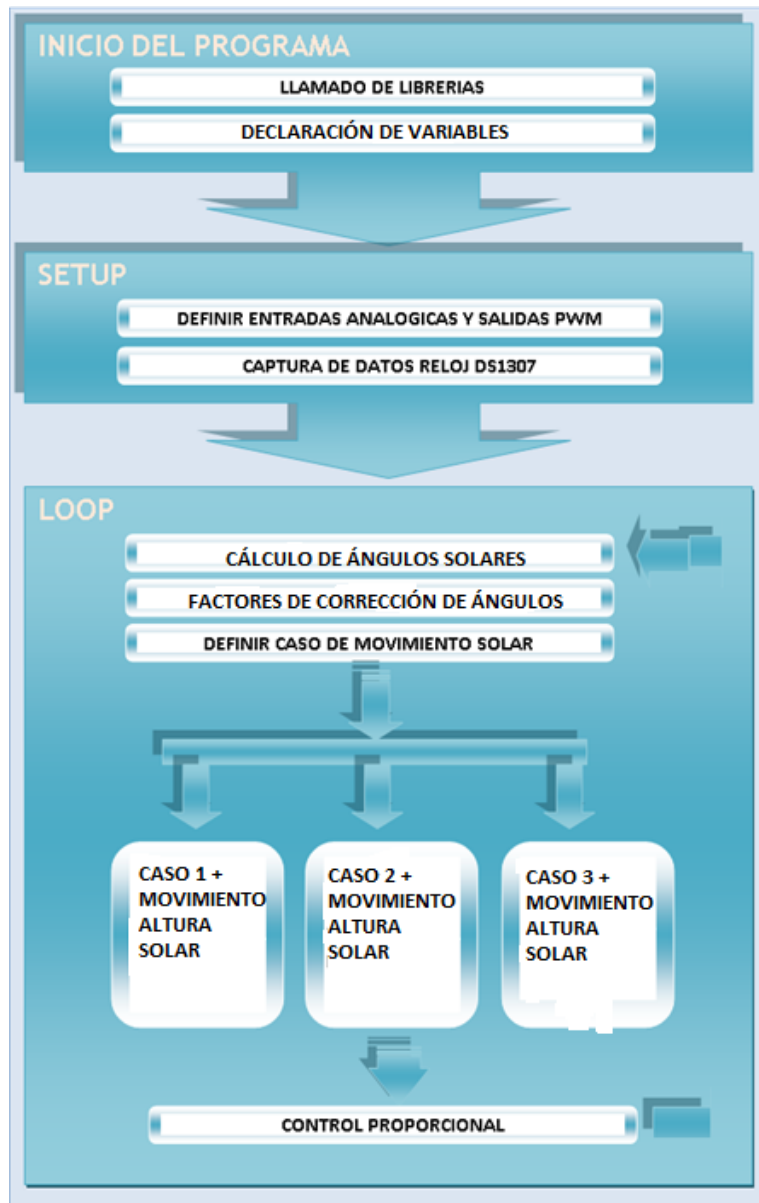


⁴⁶ KIPP & ZONEN. "Instruction sheet", 2017. [En línea]. [Fecha de consulta: 10/04/2017]. Disponible en: http://www.kippzonen.com/Product/18/CHP1-Pyrheliometer#.VrVWPiV_Okp

5.3.2.7 Esquema básico de funcionamiento del algoritmo de control

La estructura básica de funcionamiento del algoritmo de control se muestra en la figura 35.

Figura 35. Algoritmo de control seguidor solar



6. SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE DATOS DE RADIACIÓN SOLAR

Una parte importante en el desarrollo del proyecto radica en la adquisición de señales medidas por los sensores. Por éste motivo, el presente capítulo se concentrará en la descripción detallada del sistema de adquisición de datos (hardware y software).

El sistema de adquisición de datos fue diseñado para todo el proyecto en su totalidad, es decir, el algoritmo se encarga de adquirir la señal de todos los sensores de radiación solar utilizados en el montaje.

Un fenómeno físico es cuantificado mediante la señal eléctrica emitida por un sensor (transductor), ya sea por un cambio de corriente, tensión o resistencia. Después la señal eléctrica es sometida a un acondicionamiento (amplificación, atenuación, filtrado) para reducir sus niveles de ruido (señales no deseadas) y posteriormente son convertidas de señales analógicas a señales digitales mediante un dispositivo ADC (Conversión Analógica-Digital), para poder ser procesadas mediante un computador. Todo este proceso recibe el nombre de adquisición de señales y su secuencia es mostrada en la figura 36.

Figura 36. Adquisición de datos



Fuente: Adquisición de datos⁴⁷

Con el auge electrónico e informático, el proceso de adquisición de datos se hace cada vez más compacto y es así como nacen las tarjetas de adquisición de datos (DAQ). Estos dispositivos pueden tener el tamaño de un dispositivo móvil y son de fácil compatibilidad con cualquier computadora.

6.1 TARJETA DE ADQUISICIÓN DE DATOS (DAQ)

Un dispositivo DAQ es un conjunto de circuitos electrónicos de acondicionamiento de señales y conversores analógico-digital (ADC), que funcionan básicamente como una interface física entre el computador y los fenómenos que se quieren medir. El DAQ digitaliza la señal mediante el ADC de manera que el computador pueda interpretar las señales eléctricas medidas.

⁴⁷ NATIONAL INSTRUMENTS. "Adquisición de datos", 2016. [En línea]. [Fecha de consulta: 14/04/2017] Disponible en: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/#>

6.1.1 Requerimientos del sistema

Como el tipo de señal a medir es la misma para todos los sensores (Voltaje) y teniendo en cuenta que los sensores Davis DS6450 tienen salida analógica en el rango de voltios [V], los requerimientos del sistema de adquisición de datos son determinados por los sensores Kipp&Zonen, piranómetro CMP3 y pirheliómetro CHP1, ya que su salida analógica corresponde al rango de milivoltios [mV], siendo necesario el acondicionamiento de señal.

Adicional a esto, la resolución mínima recomendada por el fabricante (Kipp&Zonen) para una tarjeta de adquisición de datos, tiene un valor mínimo de 16bits. Es decir, el dispositivo DAQ debe detectar cambios de $0.3[mV]$, en un rango de $\pm 10[V]$.

Por otra parte, es de vital importancia que el dispositivo DAQ seleccionado sea de fácil compatibilidad con cualquier computador, brindando una conexión fácil y un software de programación con suficiente bibliografía acerca de su uso.

Para concluir, los requerimientos que debe satisfacer la tarjeta de adquisición de datos son:

- Acondicionamiento de señal.
- Resolución mínima de 16 bits.
- Compatibilidad con cualquier computador.
- Facilidad de programación.
- Bajo costo.

6.1.2 Tarjeta de adquisición de datos NI myDAQ

Basados en los requerimientos mencionados en el ítem anterior, se seleccionó el dispositivo NI myDAQ como la tarjeta de adquisición de datos a ser utilizada.

NI myDAQ es un dispositivo portátil de medidas en instrumentación diseñado para experimentación práctica debido a que tiene ocho instrumentos de laboratorio plug-and-play basados en PC usadas comúnmente y basados en LabVIEW, incluyendo un multímetro digital (DMM), osciloscopio y generador de función (ver figura 37).

Figura 37. NI myDAQ



Fuente: National Instruments⁴⁸.

La NI myDAQ incluye un motor de adquisición para medir dos canales diferenciales de entrada analógica y salida analógica (200 kS/s, 16 bits, ± 10 V). Ocho líneas de entrada digital y salida digital (compatible con TTL de 3.3 V TTL) permiten conectar TTL de bajo voltaje (LVTTTL) y circuitos digitales TTL de 5 V. NI myDAQ suministra suficiente potencia para circuitos y sensores simples con salidas de suministro de potencia +5 V, +15 V y -15 V (hasta 500 mV de potencia). El DMM aislado de 60 V

⁴⁸ NATIONAL INSTRUMENTS. "NI myDAQ", 2017. [En línea]. [Fecha de consulta: 14/04/2017] Disponible en: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/203964>

puede medir voltaje y corriente AC y DC, así como resistencia, voltaje de diodo y continuidad.

Para el proyecto son utilizadas dos tarjetas NI myDAQ.

6.2 SOFTWARE LABVIEW

Labview es un software de programación grafica G, que utiliza un modelo de flujo de datos en vez de una secuencia de líneas de texto, permitiendo al usuario una programación más intuitiva y disminuyendo estos molestos errores de sintaxis. Además es un software muy bien documentado en internet y cuyos foros incentivados por National Instruments permiten la solución rápida de dudas.

Por otra parte, Labview tiene componentes de programación que permiten un enlace directo con software como Microsoft Office, lo cual genera un aporte de inmenso valor, pues también será utilizado Microsoft Excel para crear la base de datos de radiación solar.

Labview nos proporciona dos ventanas virtuales: Panel frontal y Diagrama de bloques. El panel frontal es básicamente la interface gráfica para el usuario, en donde se visualizaran datos, gráficas, opciones de uso, etc. Por otro lado, el diagrama de bloques es el corazón del programa, pues este alberga el algoritmo de programación gráfica y las instrucciones de funcionamiento.

Para el desarrollo del código grafico se utilizó Labview 2014.

6.2.1 Diagrama de flujo del algoritmo de adquisición de datos

Seleccionada la tarjeta de adquisición de datos y por ende el software de trabajo, se procede a explicar algoritmo grafico encargado de la adquisición, procesamiento y almacenamiento de datos.

La figura 38 muestra el diagrama de flujo del algoritmo para la adquisición de datos.

Figura 38. Diagrama de flujo del algoritmo de adquisición de datos



Medida la radiación solar por parte de los sensores, el algoritmo recibe las señales de voltaje y realiza el acondicionamiento de señal, filtrado de señal. Seguidamente, mediante los factores de conversión (dados por el fabricante) se calcula el valor de radiación solar en $\left[\frac{W}{m^2}\right]$ a partir del valor de voltaje en $[V]$. Finalmente, el algoritmo organiza en una tabla los datos junto a la fecha y hora en que fueron adquiridos, los enseña en el panel frontal de Labview y guarda la tabla en un archivo Excel (.xls).

El panel frontal y el diagrama de bloques se puede observar en detalle en el Anexo A.

6.2.2. Diagrama de bloques

En este inciso se explica de manera detallada los subVI más relevantes y su configuración, que permiten al programa alcanzar su objetivo de adquirir y almacenar continuamente los datos de radiación solar proporcionados por los sensores.

6.2.2.1 Recepción de datos

“DAQ Assistant” es un “express VI” que inicia la comunicación y la transferencia de datos desde la myDAQ hacia el computador. Ver figura 39.

Figura 39. SubVI DAQ Assistant

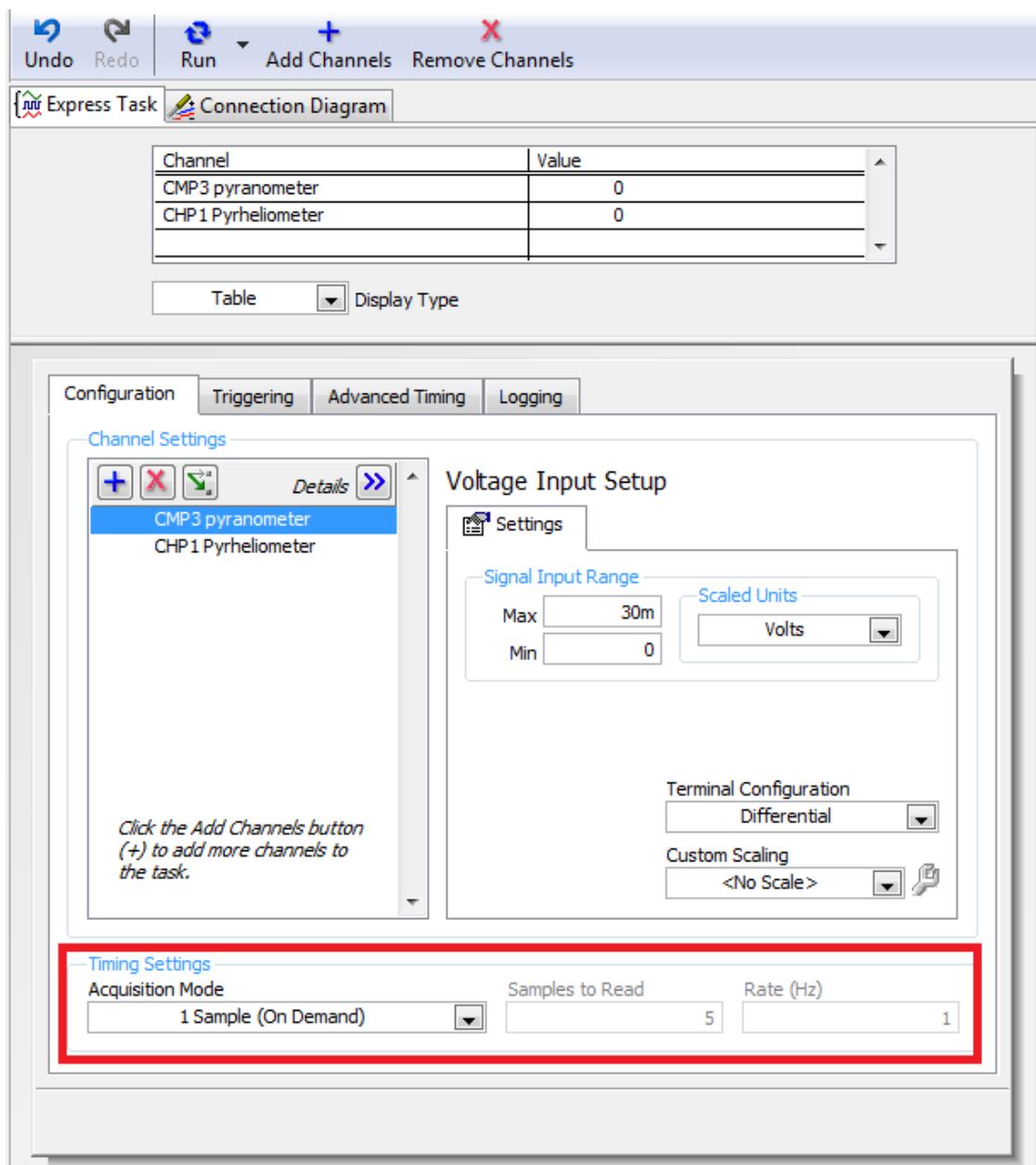


Fuente: Tutorial LabView 2014

Una vez seleccionado éste subVI de la paleta de herramientas, se despliega una ventana, allí seleccionamos el tipo de señal a medir como: "Analogic Input" y "Voltage", después, el dispositivo DAQ y el canal analógico (ai0, ai1) que se quiere medir. El "DAQ assistant" permite configurar múltiples entradas con el mismo subVI, pero todas estarán sometidas a la misma tarea, es decir, todos los canales estarán bajo las mismas condiciones de tiempo de muestreo, de tipo de señal a medir, etc.

Las tareas se configuran de acuerdo a la imagen 40.

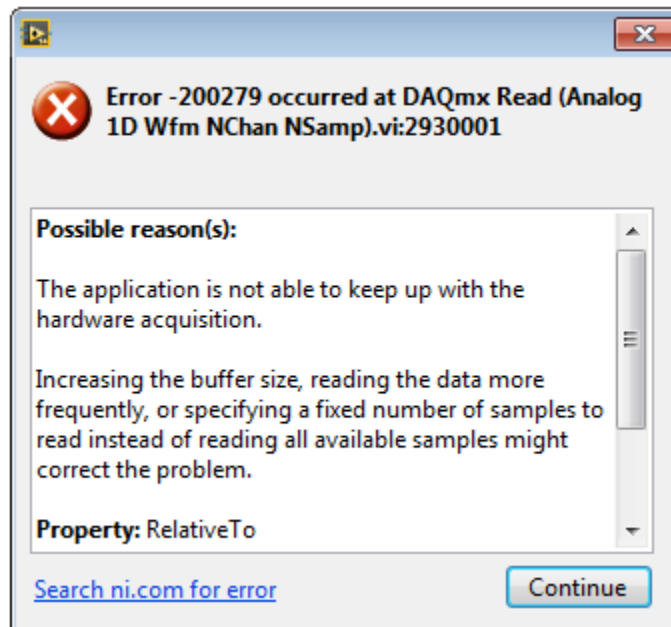
Figura 40. Configuración de tareas DAQ assistant



Inicialmente para el "Acquisition Mode" se seleccionó el modo "Continuos samples", el cual nos permite una adquisición continua de datos al tiempo de muestreo especificado por el usuario. Pero esta configuración presenta problema de

saturación del “Buffer”, es decir, los datos comienzan a sobrescribirse en la memoria del dispositivo DAQ antes de transmitirse al computador, de ahí que el tiempo de adquisición de datos no supere las tres horas (3 horas), en el mejor de los casos, presentando un problema significativo ya que obstaculiza la creación de bases de datos. Entonces Labview mostrará el error de la figura 41:

Figura 41. Error de adquisición de datos



Fuente: Errores en LabView⁴⁹

Para solucionar este error, la configuración del “Acquisition Mode” debe ajustarse en “1 sample (On Demand)” como se muestra en el recuadro rojo de la figura 40,

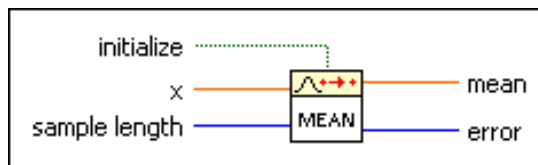
⁴⁹ NATIONAL INSTRUMENTS. “Errores en Labview”, 2017. [En línea]. [Fecha de consulta: 14/04/2017] Disponible en: www.ni.com

debido a que esta configuración no utiliza “Buffer” y no habrá problemas de sobre escritura de datos, permitiendo realizar adquisición de datos por tiempo indefinido.

6.2.2.2 Acondicionamiento de señal

“Mean PtByPt VI” calcula el promedio de los valores leídos cada cierto número de datos (simple length). Ver figura 42.

Figura 42. Mean PtByPt VI

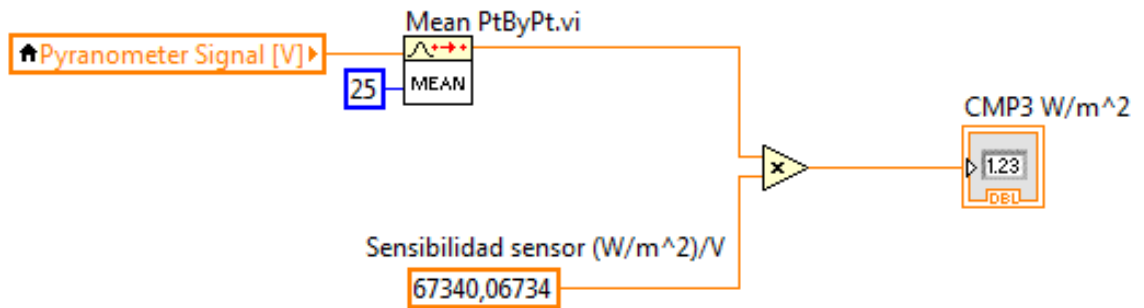


Fuente: Tutorial LabView 2014

La función de este subVI dentro del algoritmo, es actuar como un filtro pasa bajas, reduciendo posibles ruidos. “Sample length” se configuró para un valor de veinticinco (25) ya que el tiempo de muestreo configurado en el “DAQ assistant” tiene un valor de $5 \left[\frac{\text{datos}}{\text{minuto}} \right]$ y se desea obtener un promedio de lecturas cada 5 minutos.

El fragmento de código encargado de filtrar las señales y convertirlas de $[V]$ a $\left[\frac{W}{m^2} \right]$ se muestra en la figura 43. Donde la sensibilidad de los sensores está en $\frac{W * m^2}{V}$.

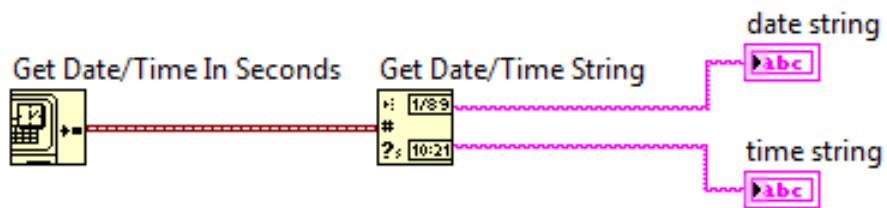
Figura 43. Código para filtrado de señales.



6.2.2.3 Fecha y hora

La configuración mostrada en la figura 44, permite la sincronización de Labview con el reloj del computador, brindando los datos de fecha y hora en que se adquirieron las mediciones de radiación solar.

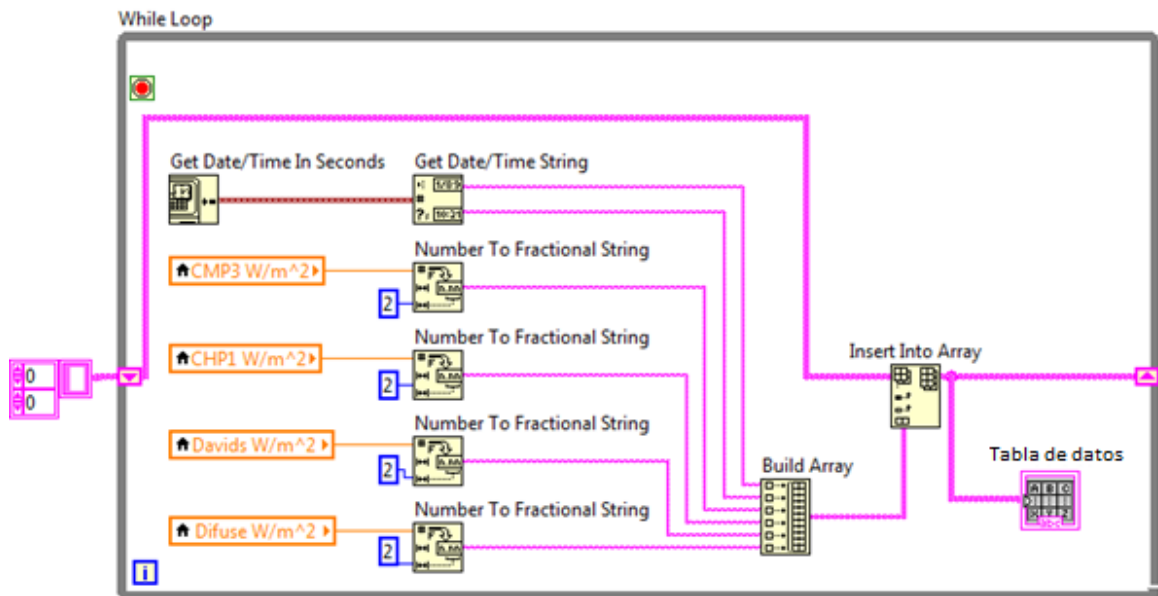
Figura 44. SubVI's para Fecha y hora actual



6.2.2.4 Tabla de radiación solar

Terminado el proceso de adquisición y acondicionamiento de señales, se registrarán en una tabla que tendrá como nombre “Tabla de datos”, registrando en ella Fecha, Hora, radiación global (piranómetro CMP3), radiación global (piranómetro Davis), radiación directa (pirheliómetro CHP1) y radiación difusa (piranómetro Davis + sistema de sombra solar). El fragmento de código encargado de esta tarea se enseña en la figura 45.

Figura 45. Generación de tabla de datos.

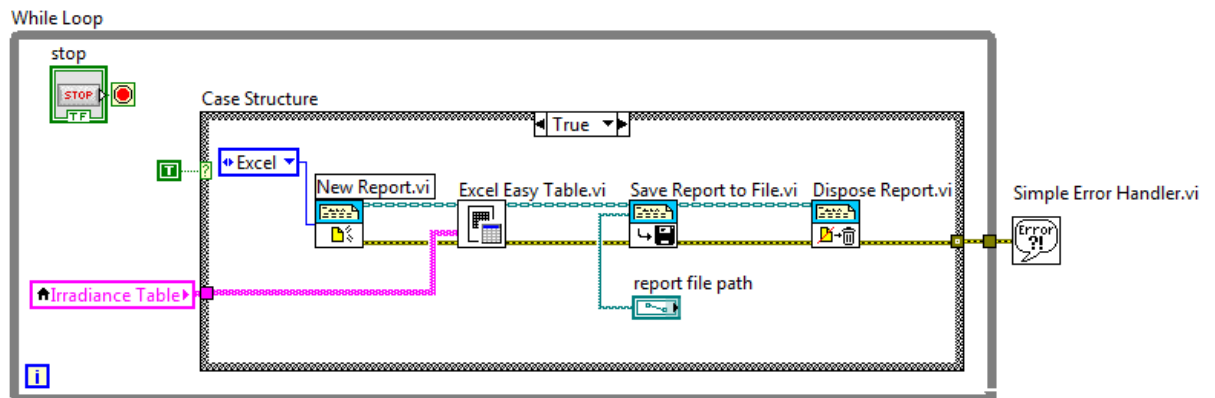


6.2.2.5 Almacenamiento de datos en Microsoft Excel

Dando especial atención al almacenamiento de las mediciones adquiridas, se diseñó el código mostrado en la figura 46, basados en la herramienta “Report

Generation Toolkit” ofrecida por Labview. Ésta es una biblioteca que inicia una interacción entre Labview y Microsoft Office, permitiendo exportación de datos para ser guardados de manera segura en un archivo Excel o Word.

Figura 46. Exportar datos desde LabView a Excel



Nota: Debe haber un archivo preexistente en el cual se van a guardar los datos. Ya que el “Report Generation Toolkit” no crea archivos Office, solo exporta los datos hacia estos.

7. CONTRUCCIÓN Y PUESTA A PUNTO

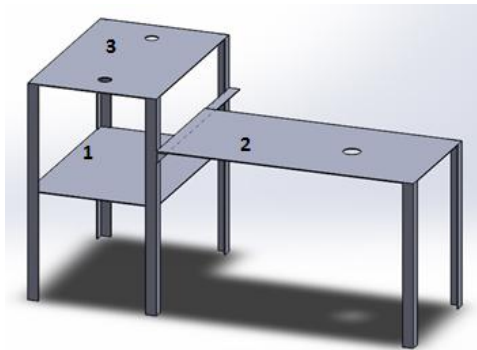
Elaborado el rediseño del seguidor solar y el diseño del sistema de adquisición de datos, se procede a construir y calibrar el montaje experimental para la comparación de sensores de radiación solar.

En este capítulo se presentarán el diseño de nuevas piezas (Estructura metálica, Sistema de sombra solar, Caja control) necesarias para el montaje, los materiales y procesos con que fueron construidas las piezas diseñadas en el capítulo 5, los detalles de calibración del seguidor solar y el ensamble del proyecto en la zona donde se realizaron las mediciones de radiación solar.

7.1 ESTRUCTURA DE SOPORTE PARA LOS SENSORES

Dando cabalidad a uno de los objetivos del proyecto y con el ideal de ofrecer un adecuado soporte a los sensores y demás elementos, se diseñó una mesa metálica con tres niveles como se muestra en la figura 47. Cabe resaltar que la mesa fue diseñada con el fin de dar un soporte estable a los sensores y no para soportar los pesos de cada uno de ellos, ya que son despreciables.

Figura 47. Estructura metálica de soporte



Los tres niveles fueron diseñados para que todos los sensores estén a un nivel similar, y en ningún momento el anillo de sombra (sistema de sombra solar) o el seguidor solar junto con el pirheliómetro proyecten una sombra sobre los piranómetros. En ese orden de ideas la ubicación de sensores se realizó de la siguiente manera:

- Nivel 1: Caja de control
- Nivel 2: Seguidor solar + Pirheliómetro CHP1, Sistema de sombra sola + Davis DS6450
- Nivel 3: Piranómetro CMP3 y Davis DS6450.

La mesa metálica se construyó con tubo rectangular de 1 pulgada y lámina galvanizada calibre 18. La unión de los materiales se realizó mediante soldadura.

En la figura 48 se puede observar parte de la mesa metálica durante su construcción.

Figura 48. Mesa metálica



7.2 SOPORTE SUPERIOR MOTORREDUCTOR ALTURA SOLAR

Ésta pieza se construyó a partir de una lámina HR calibre 16. Mediante un proceso de taladrado y doblado se obtuvo la chapa metálica deseada. Ver figura 49.

Debido a los pesos insignificantes que soportara ésta estructura, no es necesario hacer un análisis de cuerpo rígido.

Figura 49. Chapa metálica soporte superior altura solar



7.3 PLATO BASCULANTE PIRHELIÓMETRO KIPP&ZONEN CHP1

Pensando en un material liviano, con buena resistencia a la corrosión, alta maquinabilidad y bajo costo, se seleccionó el Nylon blanco. Después, fue sometido a procesos de torneado, fresado, taladrado y roscado. Ver figura 50.

Figura 50. Plato Basculante



7.4 FABRICACIÓN DE ENGRANAJES PARA EL AZIMUT Y ALTURA SOLAR

Los engranajes necesarios para las dos transmisiones mecánicas del azimut y la altura solar respectivamente, se fabricaron en Bronce, un material liviano (respecto al acero), buena maquinabilidad y resistencia mecánica. Fueron mecanizados con procesos de fresado, torneado y roscado. Ver figura 51.

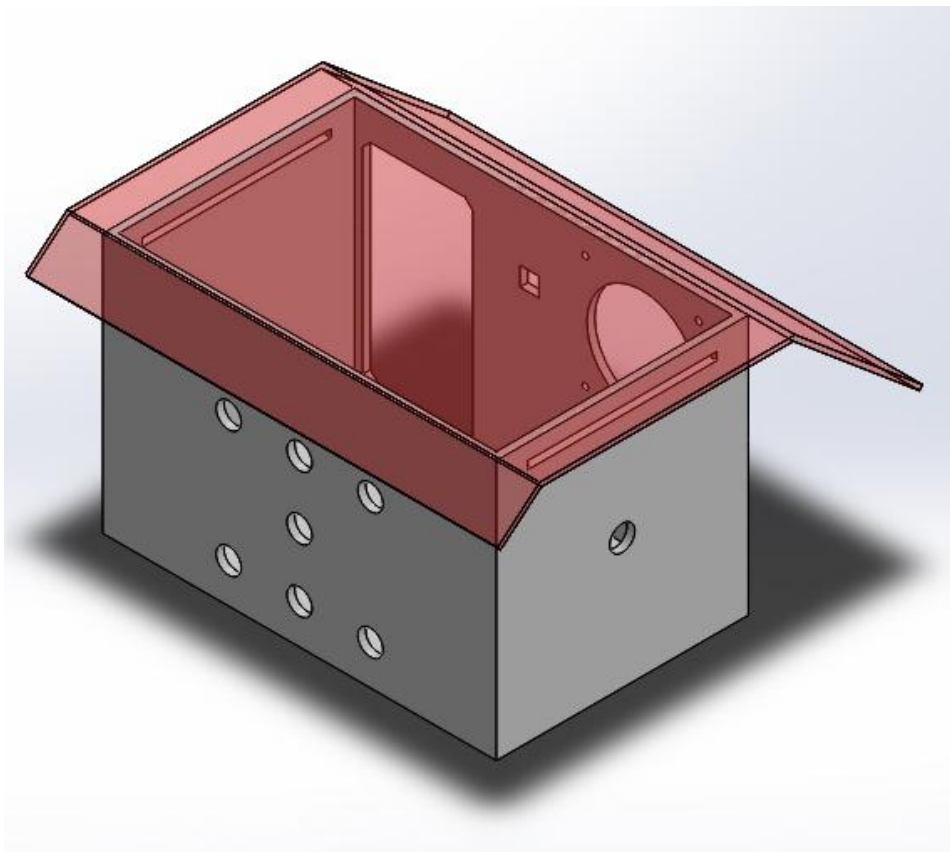
Figura 51. Engranajes en bronce



7.5 CAJA DE CONTROL

Dado que el montaje experimental se encontrara a la intemperie, es de vital importancia proteger los equipos electrónicos de la humedad y el ambiente en general. Por esto, se diseñó y se construyó un contenedor en acrílico transparente de 5mm de espesor, para permitir la visibilidad de los elementos electrónicos del sistema de seguimiento solar y del sistema de adquisición de datos. Ver figura 52.

Figura 52. Caja de control



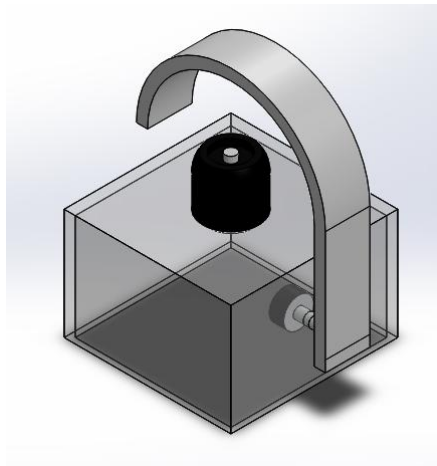
El diseño mostrado en la figura 52, además de brindar protección contra la humedad, producto de fuertes lluvias, permite la ventilación de los componentes electrónicos (Fuente, Arduino, Modulo de motores, NI myDAQ) mediante un ventilador ubicado en la parte posterior. También, garantiza la protección y facilidad de las conexiones mediante Plugs tipo micrófono.

7.6 SISTEMA DE SOMBRA SOLAR

En la figura 53 se observa el anillo de sombra graduable diseñado para bloquear los rayos solares provenientes directamente del sol y así permitir la medición de la radiación solar difusa por parte de un piranómetro Davis DS6450

El sistema se fabricó mediante una caja base de acrílico transparente de 5mm y el anillo de sombra mediante un proceso de doblado y soldado de una lámina de aluminio.

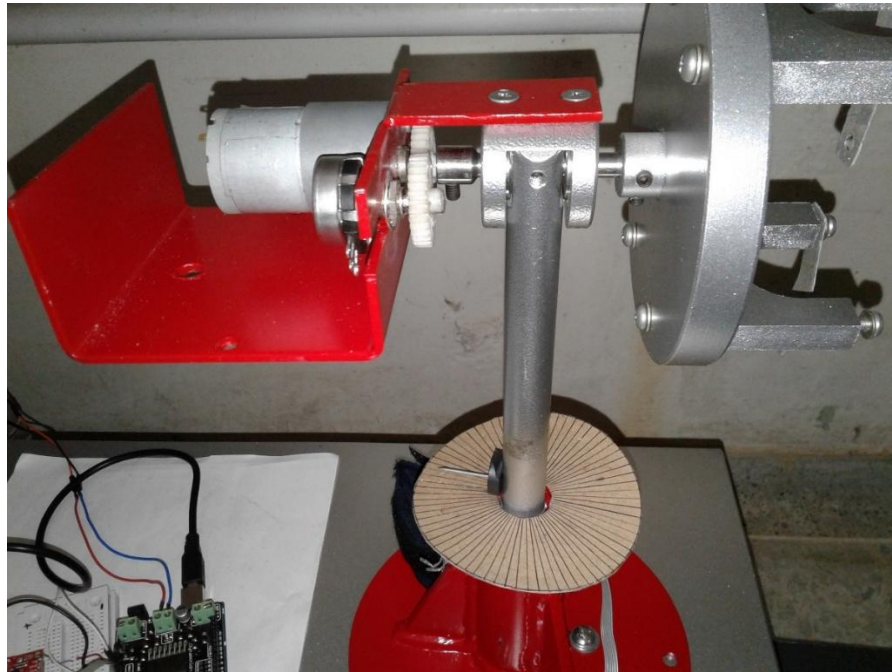
Figura 53. Sistema de sombra solar



7.7 CALIBRACIÓN DEL SEGUIDOR SOLAR

Dados los dos grados de libertad con que cuenta el sistema de seguimiento solar, se inició la calibración con el ángulo azimut. En este proceso se utilizó una brújula para fijar los puntos cardinales en la ciudad de Bucaramanga.

Figura 54. Calibración Azimut Solar



En la figura 54 se observa como con una plantilla de calibración, fabricada con particiones de 5° , se caracterizó el movimiento del seguidor solar en el plano azimutal, mediante una función lineal de acuerdo a la ecuación 8.

Ecuación 8. Caracterización del movimiento del seguidor solar

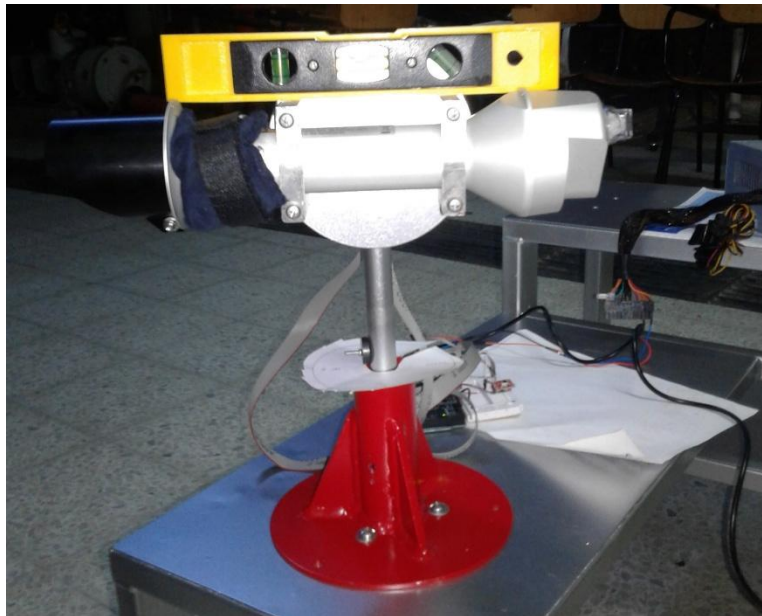
$$Angulo_{potenciómetro} = Lectura_{potenciómetro} * A + B$$

Donde A y B son constantes.

Caracterizado el movimiento, la función lineal es llevada al algoritmo de control de lazo cerrado en Arduino.

Por otro lado, se llevó a cabo el mismo procedimiento para la altura solar con ayuda de una herramienta niveladora de burbuja y una aplicación desarrollada en android para dispositivos móviles llamada “Nivel de burbuja”⁵⁰. Ver figura 55.

Figura 55. Calibración Altura solar

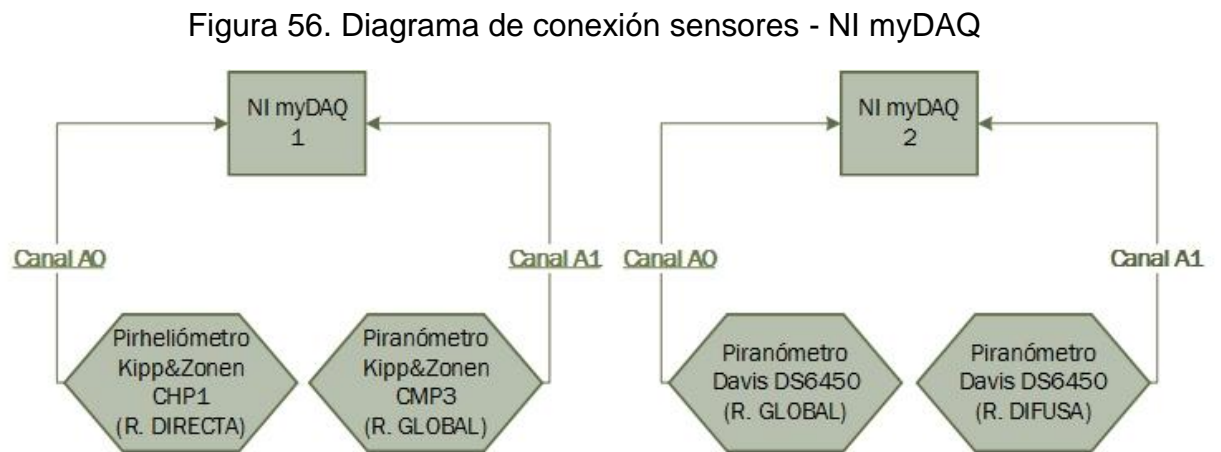


⁵⁰ GOOGLE PLAYS. “Apps”. 2017. [En línea]. [Fecha de consulta: 26/01/2017]. Disponible en: https://play.google.com/store/apps/details?id=net.androgames.level&hl=es_419

7.8 PUESTA A PUNTO DEL MONTAJE EXPERIMENTAL

Los sensores Kipp&Zonen vienen equipados con un cable de señal de 10 [m] para fácil conexión mientras que los sensores Davis cuentan con un cable de señal tan solo de 50 [cm]. En consecuencia, se decide incorporar una tarjeta NI myDAQ, referenciada en Labview como “NI myDAQ2”, a la caja de control para ser conectada a los dos sensores Davis. La otra tarjeta referenciada en Labview como “NI myDAQ1” está localizada junto al computador que controla el montaje experimental.

El diagrama de conexiones de los sensores a las tarjetas de adquisición se presenta en la figura 56.



Las conexiones de las tarjetas de adquisición de datos y de la placa Arduino al computador se realizaron mediante cables USB de 10 [m] de longitud. Los potenciómetros y los motores son conectados a la caja de control mediante los plugs tipo micrófono.

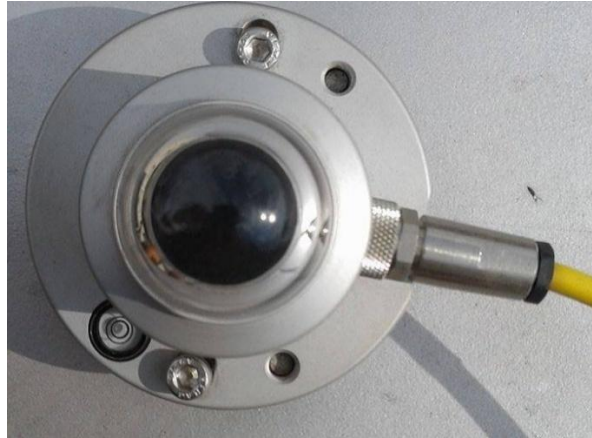
Establecidas las conexiones del montaje experimental, se ensambla en su totalidad como se ve en la figura 57 y el montaje queda listo para comenzar la toma de datos.

Figura 57. Montaje experimental para la comparación de sensores de radiación solar



Finalmente, el proyecto es ubicado en la azotea del cuarto piso de la Biblioteca Central de la Universidad Industrial de Santander para dar inicio a las mediciones. Allí, es orientado con ayuda de una brújula y son nivelados todos los sensores mediante sus respectivos niveles de burbujas (ver figura 58).

Figura 58. Nivel piranómetro Kipp&Zonen CMP3



El computador encargado de la ejecución de los algoritmos de control y adquisición de datos es ubicado en la parte interior del cuarto piso de la Biblioteca Central.

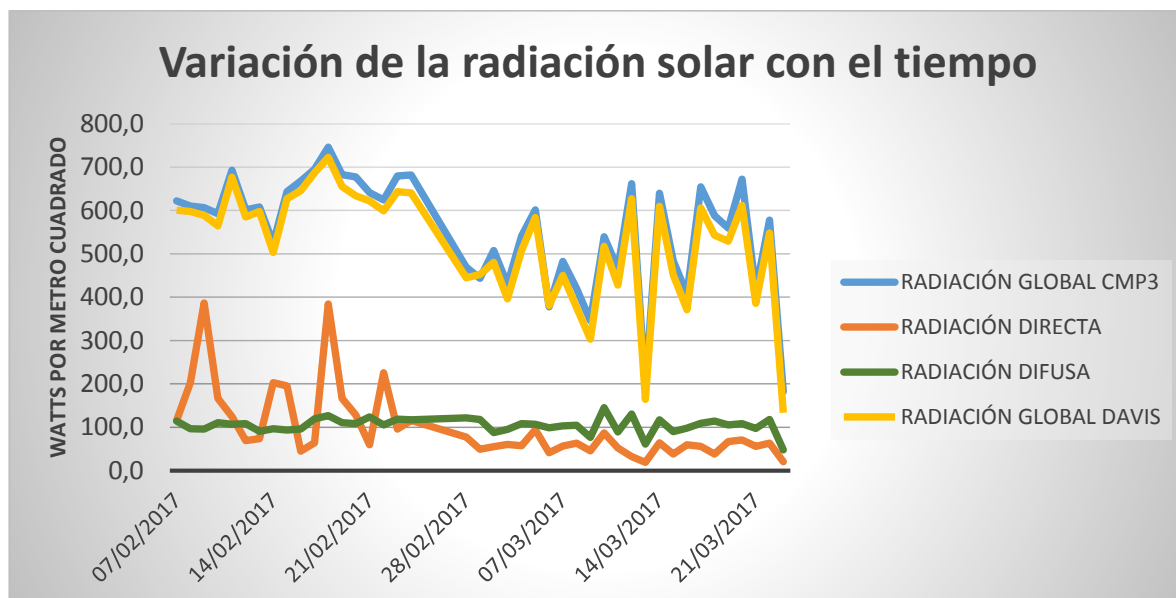
8. ANÁLISIS DE DATOS

Cumpliendo puntualmente con los objetivos planteados al inicio de este documento, el montaje experimental realizó mediciones de potencial de radiación solar durante dos meses (febrero y marzo de 2017) en la Universidad Industrial de Santander, midiendo las siguientes variables simultáneamente:

- Radiación solar global: piranómetro Kipp&Zonen CMP3 y Davis DS6450.
- Radiación solar directa: pirheliómetro Kipp&Zonen CHP1 + Sistema de seguimiento solar de dos grados de libertad.
- Radiación solar difusa: piranómetro Davis DS6450 + Sistema de sombra solar.

Los sensores realizaron toma de datos cada cinco minutos, para un total de doce datos por hora. Con estos datos se realizaron promedios diarios mensuales (para febrero y marzo de 2017) y se presentan en la figura 59.

Figura 59. Promedios diarios de Radiación Solar



Los datos de radiación solar utilizados para este capítulo se encuentran en el Anexo B.

Para el comparativo de los sensores se plantearon algunas configuraciones y se seleccionó un criterio estadístico para evaluar la variabilidad de las mediciones.

8.1 CONFIGURACIONES PARA LA COMPARACIÓN DE SENSORES DE RADIACIÓN SOLAR

Para la comparación de los sensores de potencial de radiación solar se realizaron tres configuraciones tomando como referencia las medidas proporcionadas por el piranómetro Kipp&Zonen CMP3, ya que este sensor cuenta con certificación ISO 9060.

Las configuraciones se basaron en la ecuación 9 que relaciona las componentes de la radiación solar para una superficie horizontal terrestre.

Ecuación 9. Relación de componentes de radiación solar

$$R_{global} = R_{Directa} + R_{Difusa} = I_B * \cos(\theta_z) + R_{Difusa}^{51}$$

Donde R_{Difusa} toma en cuenta la radiación solar difusa y la radiación solar reflejada por la superficie terrestre (suelos, edificios, etc.) e I_B hace referencia a la radiación de directa medida por el pirheliómetro.

Las configuraciones se muestran a continuación:

⁵¹ APUNTES DE CLASE de Omar Armando Gelvez Arocha. Op. Cit.

- Configuración 1: Radiación Global Davis DS6450 vs. Radiación Global Kipp&Zonen CMP3.
- Configuración 2: Radiación Directa CHP1 + Radiación Difusa Davis 6450 vs. Radiación Global Kipp&Zonen CMP3.
- Configuración 3: Radiación Directa CHP1 vs. I_{B_prom}
- Configuración 4: Radiación Global Kipp&Zonen CMP3 - I_{B_prom} vs. Radiación Difusa Davis 6450

El valor I_{B_prom} es calculado aritméticamente por la ecuación 9 para corroborar la calidad de los datos de radiación directa tomadas con el pirheliómetro CHP1.

8.2 DESVIACIÓN MEDIA ABSOLUTA (MAD)

Como criterio de desempeño para las configuraciones de los sensores se seleccionó la Desviación Media Absoluta (MAD), por sus siglas en inglés.

La Desviación Media Absoluta es una medida promedio de la variabilidad que presentan los datos pronosticados respecto de los valores históricos o verdaderos que se tienen de un proceso o fenómeno físico. Se calculado mediante la siguiente expresión:

Ecuación 10. Desviación media absoluta⁵²

$$Radiación_{MAD} = \frac{1}{n} \sum_{t=1}^n |F_t - \widehat{D}_t| \quad \left[\frac{W}{m^2} \right]$$

⁵² MARTIN PLIEGO, Francisco Javier, RUIZ-MAYA PEREZ, Luis. Fundamentos de probabilidad. 2da Edición. Thompsom.1998. P.35

Donde F_t representa el valor del estimado y D_t reseprenta el valor histórico o verdadero (Piranómetro Kipp&Zonen CMP3).

8.3 EVALUACIÓN DE DESEMPEÑO DE LAS CONFIGURACIONES

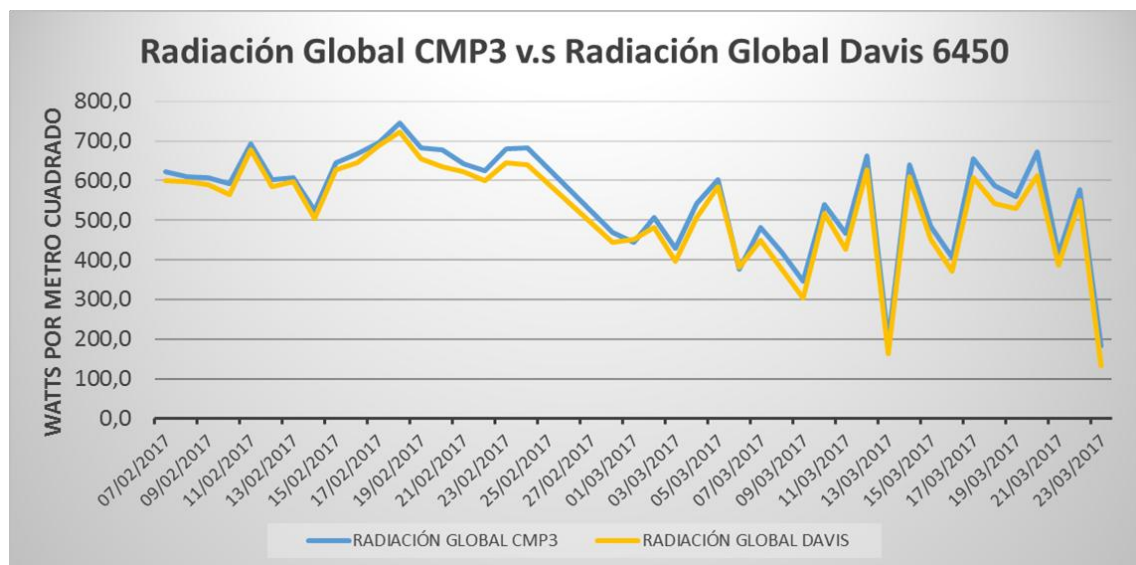
Con ayuda de Microsoft Office Excel y los promedios diarios de radiación solar (Global, Directa y Difusa), ver Anexo B, se calculó el MAD para las diferentes configuraciones. Ver tabla 3.

Tabla 3. MAD para cada configuración de sensores.

	W/m ²			
	Conf. 1	Conf. 2	Conf. 3	Conf. 4
MAD	30,1	343,8	496,2	88,9

8.3.1 Configuración 1

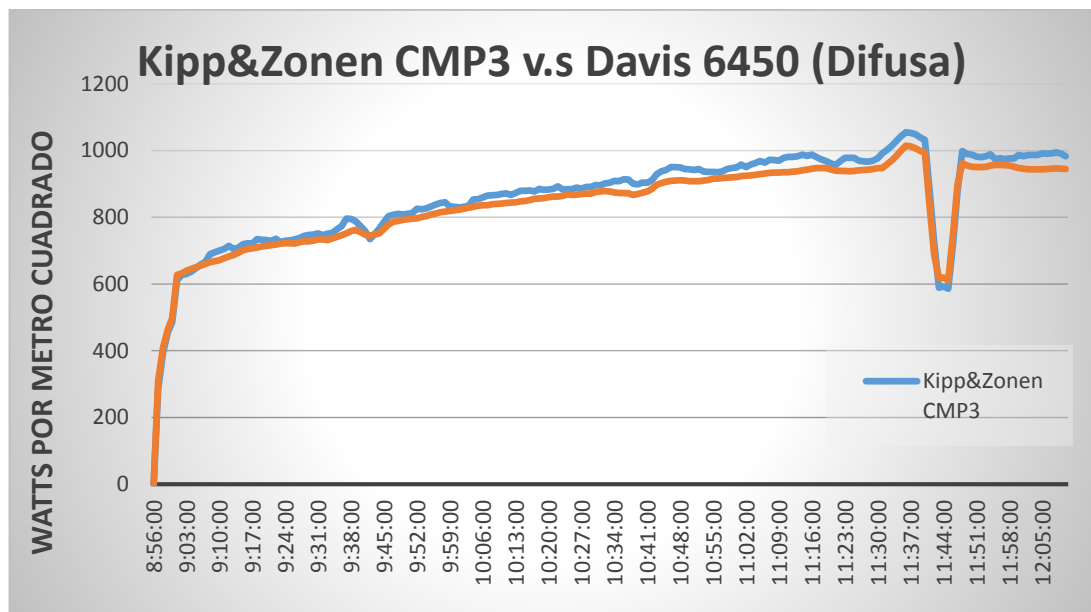
Figura 60. Configuración 1



De los valores obtenidos anteriormente para las configuraciones, se puede apreciar que la desviación más baja se registró para configuración 1 (Ver figura60). Se observa que el comportamiento de las curvas es idéntico, debido a que están midiendo la misma variable (Radiación solar global) pero están desfasadas aproximadamente $30 \frac{W}{m^2}$, consecuencia de los problemas de sensibilidad que tiene el sensor Davis 6450 y que puede ser corregido mediante una calibración.

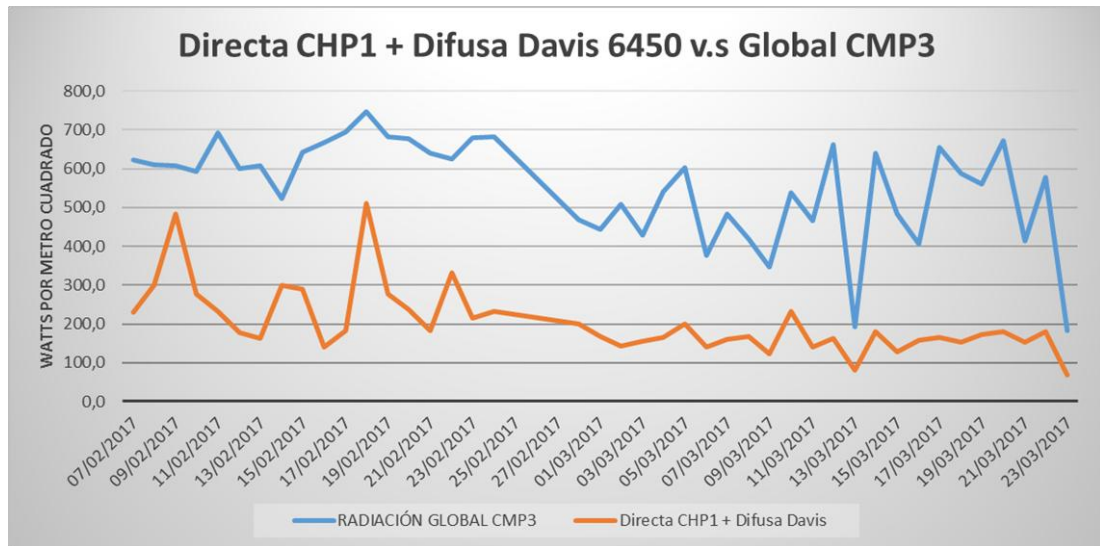
Para confirmar el análisis anterior, se tomaron nuevamente medidas de radiación solar global con el piranómetro Kipp&Zonen CMP3 y esta vez con el piranómetro Davis 6450 utilizado para medir la componente difusa, y así tener una nueva comparación utilizando otro sensor de la misma referencia, obteniendo un valor de desviación media absoluta aproximadamente de $26 \frac{W}{m^2}$. Estos datos se tomaron el 29 de abril de 2017 de 9 a.m. a 12 m. Ver figura 61.

Figura 61. Comparativo de piranómetros



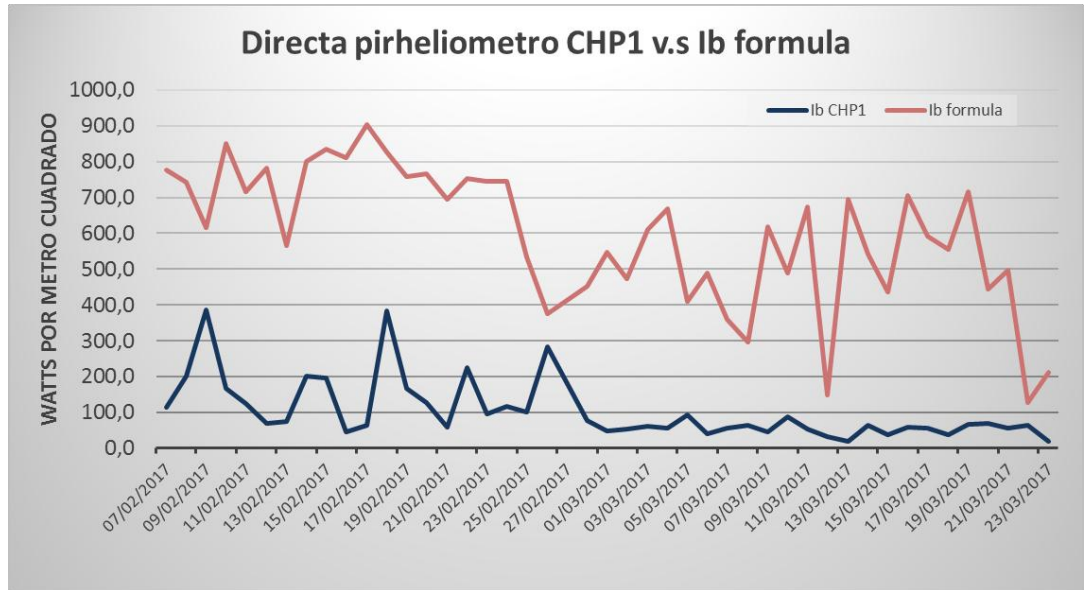
8.3.2 Configuración 2

Figura 62. Configuración 2



8.3.3 Configuración 3

Figura 63. Configuración 3



La configuración 3 (Ver figura 63) es una evaluación de la calidad de los datos de radiación solar directa obtenidos, pero implícitamente, evalúa el desempeño de los equipos involucrados en la captura de estos datos, los cuales son el seguidor solar de 2 grados de libertad y el pirheliómetro Kipp&Zonen CHP1.

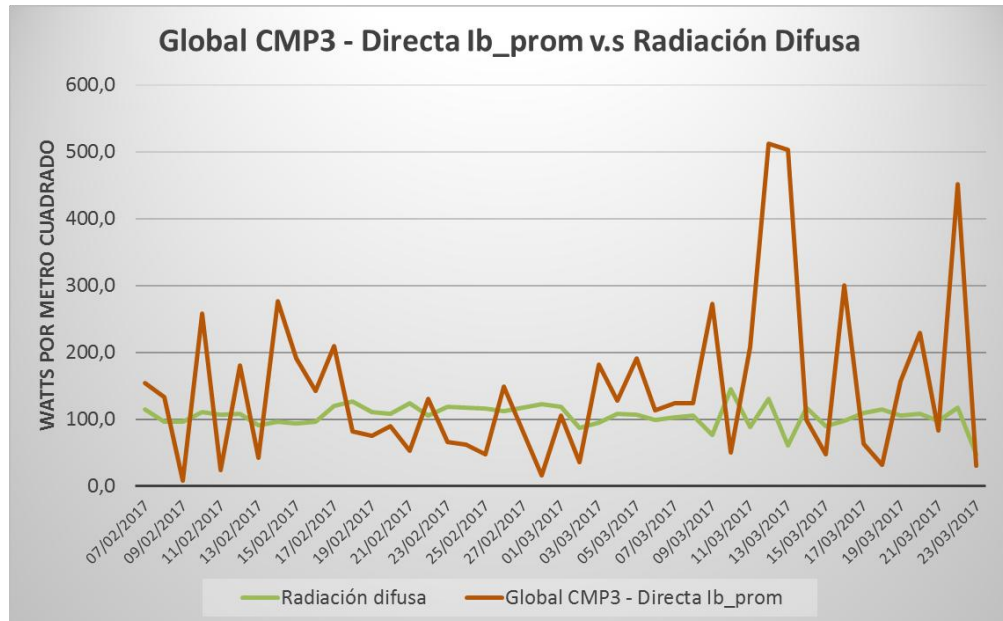
Al operar aritméticamente la ecuación 9 y obtener un valor de I_{B_prom} que depende de los valores de radiación solar directa (piranómetro CMP3), difusa (piranómetro Davis 6450) y el ángulo cenit calculado para cada día y cada hora, respectivamente, se obtuvo un valor de referencia de radiación solar directa.

Con una desviación aproximadamente de $500 \frac{W}{m^2}$, y siendo la desviación más alta, se reconoce que la calidad de las medidas de radiación solar directa capturadas por el sensor, es deficiente y se recomienda no utilizar estos datos. Esta deficiencia en

la calidad de los datos es causada por la baja precisión del seguidor solar, obligando a cambiar el sistema de seguimiento solar por un equipo más sofisticado y de mejores características técnicas.

8.3.4 Configuración 4

Figura 64. Configuración 4



En la figura 64 se aprecia el comportamiento de la radiación solar difusa con una desviación aproximada de $90 \frac{W}{m^2}$, un valor admisible considerando que un piranómetro Davis 6450, es el encargado de medir esta componente. Por lo tanto, la responsabilidad del alto valor de desviación media absoluta de la configuración 2 recae en el seguidor solar.

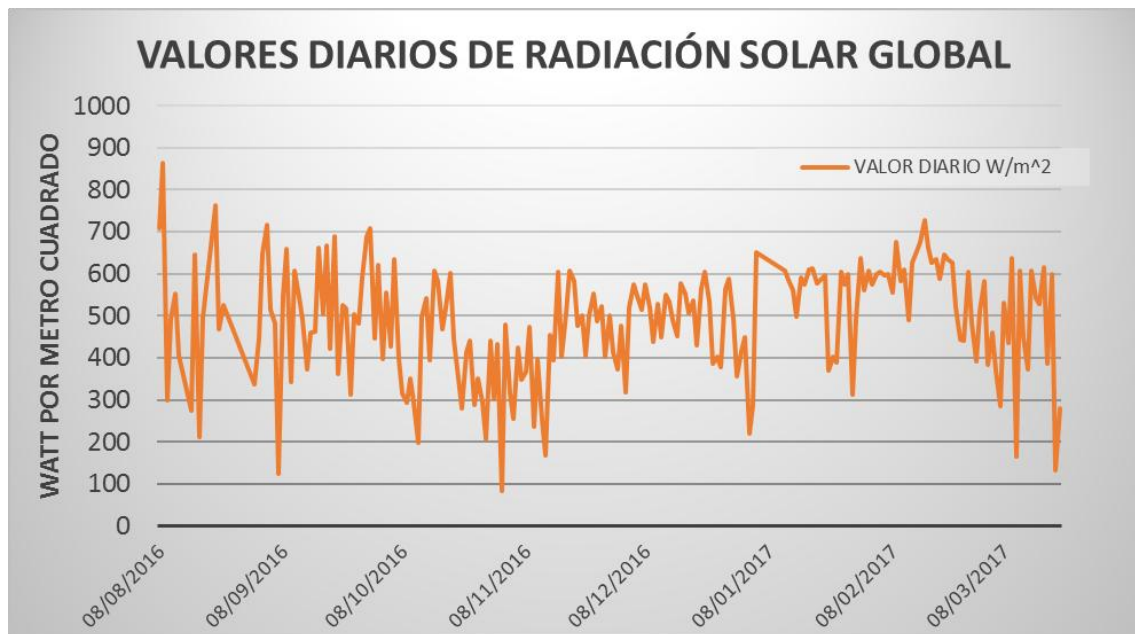
Por otra parte, la radiación solar difusa (línea verde figura 64) tiene un valor aproximadamente estable (pequeñas variaciones), esto se debe a que aún en días nublados la única radiación incidente es la componente difusa.

8.4 HISTÓRICO DE DATOS DE RADIACIÓN SOLAR GLOBAL PARA LA UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER

Queriendo brindar un histórico de datos para las asignaturas de Sistemas Térmicos y de Transferencia de Calor, se midió la radiación solar global incidente en una superficie horizontal de la Universidad Industrial de Santander con el piranómetro Davis 6450, para los meses comprendidos entre agosto de 2016 y marzo de 2017.

Los datos para valores promedios diarios se presentan en la figura 65.

Figura 65. Promedios diarios de Radiación Solar Global



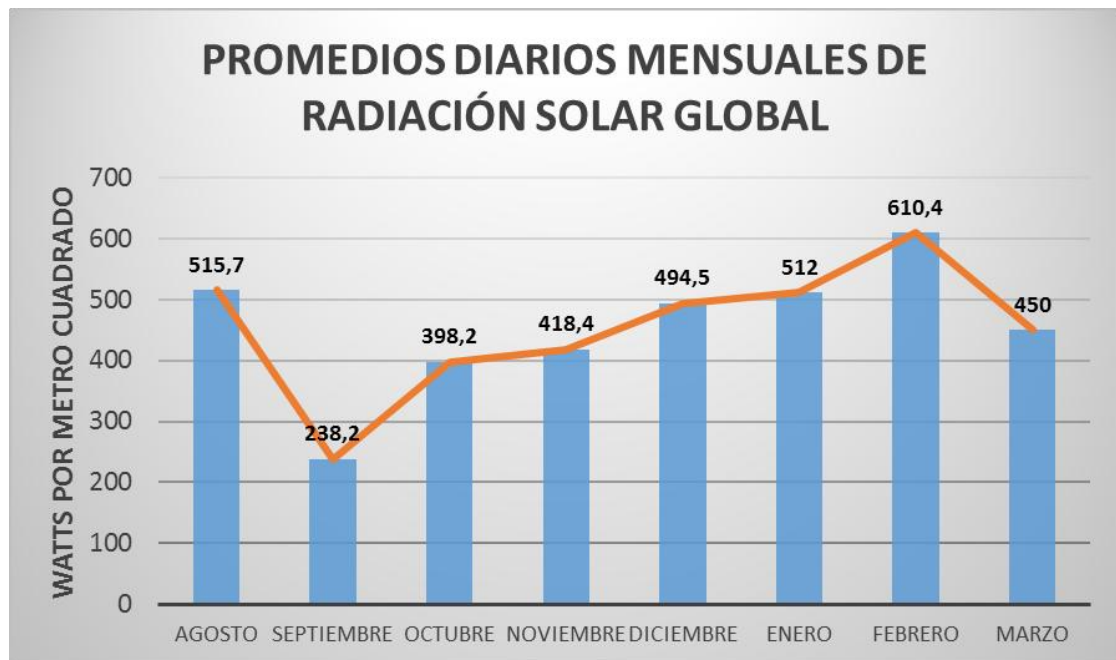
Los promedios diarios mensuales, se calculan con la sumatoria de los valores diarios de cada mes y dividiendo en su número de días respectivamente. Este valor representa la cantidad de irradiancia promedio para un día cualquiera de dicho mes.

Los valores calculados para los meses anteriormente mencionados se muestran en la tabla 4 y en la figura 66.

Tabla 4. Radiación solar global diaria mensual

MES	W/m ²
agosto	515,7
septiembre	238,2
octubre	398,2
noviembre	418,4
diciembre	494,5
enero	512,0
febrero	610,4
marzo	450,0

Figura 66. Promedios diarios mensuales



De la figura 66 se concluye que septiembre fue el mes con menos incidencia de radiación, mientras que febrero registró el valor más alto.

Por otra parte, se analizó el factor de claridad para la ciudad de Bucaramanga, proporcionando una función de interés para calcular la radiación solar global incidente en una superficie horizontal terrestre.

El factor de claridad se define como la porción de radiación solar extraterrestre que consigue incidir en una superficie horizontal terrestre y es dado por la ecuación 10:

Ecuación 11.

Ecuación 11. Factor de claridad⁵³

$$K_t = \frac{H_g}{H_o}$$

Donde H_g es el promedio de radiación diaria que incide en una superficie horizontal terrestre y H_o es la radiación solar extraterrestre calculada por la ecuación 11:

Ecuación 12.

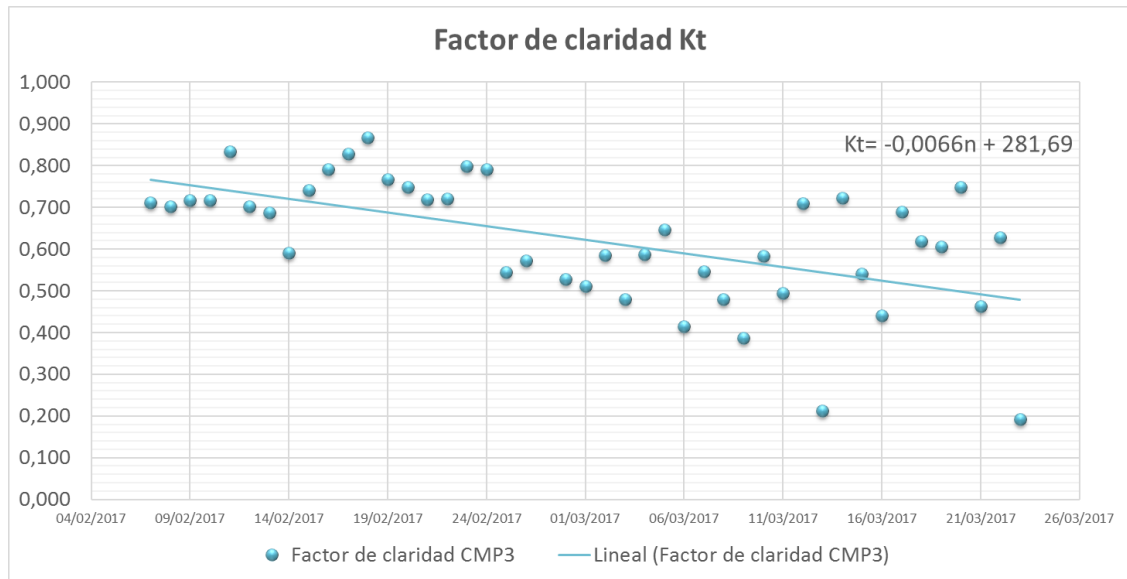
Ecuación 12. Radiación solar extraterrestre⁵⁴

$$H_o = 1353 * \frac{\left(1 + 0,034 * \cos\left(\left(\frac{360}{365}\right) * n\right)\right)}{\cos(\theta_z)}$$

⁵³ APUNTES DE CLASE de Omar Armando Gelvez Arocha. Op. Cit.

⁵⁴ Ibid

Figura 67. Variación del factor de claridad con el día



La figura 67 muestra la variación del factor de claridad con el día del año. Esta serie de datos no presenta una tendencia uniforme y se evidencian cambios bruscos de las condiciones ópticas de la atmosfera para periodos cortos. El mayor valor es de aproximadamente 0.9 y el menor, de 0.2. En base a lo anterior, se proponen los siguientes intervalos de valores para el K_t de acuerdo al tipo de día

Tabla 5. Valores de K_t

$K_t < 0,40$	Días nublados
$0,40 \leq K_t \leq 0,60$	Días parcialmente nublados
$K_t > 0,60$	Días claros

9. CONCLUSIONES

- Mediante tres casos de análisis y considerando las características geográficas de la ciudad de Bucaramanga, se estableció detalladamente el movimiento del sol en la bóveda celeste para cualquier época del año y una función del factor de claridad para calcular la radiación solar global.
- Los mejores sensores para medir radiación solar son aquellos que funcionan bajo el principio físico de detección termoeléctrica (Termopila), ya que pueden detectar cambios más pequeños de radiación solar, presentando mayores sensibilidades. Sin embargo, son sensores que tienen mayores demandas en los equipos de adquisición de datos y sistemas de posicionamiento solar. Resultando en una inversión económica bastante alta.
- Los sensores de tipo fotovoltaico (Fotodiodo de silicio) presentan un menor rango espectral de medición, por lo tanto, tienen una precisión inferior a los de termopila. Por otra parte, son una excelente alternativa al momento de capturar datos de manera económica, ya que brindan un error pequeño de medición, su diseño es robusto y los requerimientos de adquisición de datos son simples. Resultando en una inversión económica baja.
- Los sensores de tipo fotovoltaico (Fotodiodo de silicio) presentan un menor rango espectral de medición, por lo tanto, tienen una precisión inferior a los de termopila. Por otra parte, son una excelente alternativa al momento de recopilar datos de manera económica, ya que presentan un error admisible de medición, su diseño es robusto y los requerimientos de adquisición de datos son simples. Resultando en una inversión económica baja.

- Pese a que el rediseño del seguidor solar logró un aumento en la precisión del equipo a un valor de 5° , mediante el uso de potenciómetros lineales como sensores de posición angular y la optimización del algoritmo de control, aún no cumple el requerimiento de precisión del pirheliómetro CHP1 establecido en $0,5^\circ$ por Kipp&Zonen.

10. RECOMENDACIONES

Los sensores Kipp&Zonen por ser dispositivos de primera clase requieren de mejores equipos para un excelente funcionamiento. Por esto, se recomienda contar con los siguientes equipos adicionales para los sensores en pro de mejorar su desempeño:

- **Datalogger Kipp&Zonen LOGBOX SD ref. 3303090** que permite una conexión simultánea de hasta 8 canales. Entradas analógicas de 24 bits y alta resolución para configurar cualquier instrumento Kipp&Zonen.
- **Seguidor solar Kipp&Zonen SOLYS2 ref. 0367900-002** de tipo estándar. Cuenta con una placa de montaje para instalar piranómetros hasta un máximo de tres equipos.
- **Seguidor solar EKO STR-21G Sun tracker**. Brazo sencillo para el montaje de un pirheliómetro. GPS y tres metros de cable de señal y diez metros de

La lectura de los sensores Davis DS6450 se recomienda hacerla con tarjetas de adquisición básicas y de bajo costo como la NI myDAQ.

Reubicar el proyecto en un área más despejada para evitar sombras proyectadas por edificaciones o árboles que obstaculizan la incidencia de radiación solar durante algunas épocas del año.

Utilizando el sensor Kipp&Zonen CMP3 como referencia, calcular un factor de calibración para los sensores Davis 6450 y/o fotodiodo de silicio.

Utilizar un sistema de generación alterno de energía eléctrica para abastecer el sistema de adquisición de datos en la ausencia de fluido eléctrico, y así evitar la pérdida de información.

BIBLIOGRAFÍA

ARDUINO. ¿Qué es arduino?, 2017. [En línea]. [Fecha de consulta: 12/04/2017]
Disponibile en: <http://arduino.cl/que-es-arduino/>

BOLTON, WILLIAM. SISTEMAS DE CONTROL ELECTRONICO EN LA INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA. s.l. : ALFAOMEGA. Segunda edición.

COLOMBIA APRENDE. “Geografía Bucaramanga”, 2017. [En línea]. [Fecha de consulta: 20/1/2017] Disponible en: <http://www.colombiaprende.edu.co/html/familia/1597/article-85829.html>

DAVIDS INSTRUMENTS. “Solar Radiation Sensor”, 2016. [En línea]. [Fecha de consulta: 10/1/2016] Disponible en: http://www.davisnet.com/product_documents/weather/spec_sheets/6450_SS.pdf.

DUFFIE, JHON A. y BECKMAN, WILLIAM A. SOLAR ENGINEERING OF THERMAL PROCESSES. s.l. : A Wiley-Interscience Publication, 1991. Segunda edición.

EL RESISTOR. “Tipos de potenciómetros”, 2016. [En línea]. [Fecha de consulta: 10/1/2016] Disponible en: <http://www.forosdeelectronica.com/>

GLOSARIO. “Definición de cenit”, 2013. [En línea]. [Fecha de consulta: 20/1/2017] Disponible en: <http://glosarios.servidor-alicante.com/astronomia/cenit>

GOOGLE PLAYS. “Apps”. 2017. [En línea]. [Fecha de consulta: 26/01/2017]. Disponible en: https://play.google.com/store/apps/details?id=net.androgames.level&hl=es_419

HAMROCK, BERNARD J. ELEMENTOS DE MÁQUINAS. s.l. : MC GRAW HILL, 2000.

KALOGIROU, Soteris A. Solar Energy engineering. Processes and Systems. s.l. : Academic Pr. Inc., 2009.

KIPP & ZONEN. “CHP1 Instruction sheet”, 2017. [En línea]. [Fecha de consulta: 22/1/2017] Disponible en: http://www.kippzonen.com/Product/18/CHP1-Pyrheliometer#.WIV2N1M1_IU

KIPP & ZONEN. “CHP1 Pyrheliometer”, 2016. [En línea]. [Fecha de consulta: 10/1/2016] Disponible en: http://www.kippzonen.com/Product/18/CHP1-Pyrheliometer#.VrVWPIV_Okp

KIPP & ZONEN. “CMP3 Pyranometer”, 2016. [En línea]. [Fecha de consulta: 10/1/2016] Disponible en: http://www.kippzonen.com/Product/11/CMP3-Pyranometer#.VrUuNVV_Oko. [En línea]

KIPP & ZONEN. “Espira de sombra CM121B/C”, 2016. [En línea]. [Fecha de consulta: 10/1/2016] Disponible en: http://www.kippzonen.com/Product/18/CHP1-Pyrheliometer#.VrVWPIV_Okp

KIPP & ZONEN. “Principio de funcionamiento de un piranómetro de termopila”, 2015. [En línea]. [Fecha de consulta: 10/04/2017]. Disponible en: http://www.kippzonen.es/News.aspx?id=575#.WOv5F_k1_IU

MARTIN PLIEGO, Francisco Javier, RUIZ-MAYA PEREZ, Luis. Fundamentos de probabilidad. 2da Edición. Thompsom.1998. P.35

MIRANDA FERNANDEZ, JUAN SEBASTIAN y GOMEZ GALVIS, RICARDO ANDRES. DISEÑO, CONTRUCCIÓB Y EVALUACIÓN DE UN SISTEMA DE

COLECTOR FOTOVOLTAICO CON SEGUIDOR SOLAR DE 2 GRADOS DE LIBERTAD. BUCARAMANGA : TRABAJO DE GRADO, 2011.

MOTORES DC. “Actuadores”, 2016. [En línea]. [Fecha de consulta: 14/04/2017] Disponible en: www.dynamoelectronics.com

MOTT, ROBERT L. DISEÑO DE ELEMENTOS DE MÁQUINAS. s.l. : PEARSON. Cuarta edición.

MOVIMIENTOS TERRESTRES. “Movimiento de rotación y traslación terrestre alrededor del sol”, 2010. [En línea]. [Fecha de consulta: 20/1/2017] Disponible en: <http://rodriguezcardonarene.blogspot.com.co/2010/05/movimiento-de-rotacion-y-traslacion-de.html>

NATIONAL INSTRUMENTS. “Adquisición de datos”, 2016. [En línea]. [Fecha de consulta: 14/04/2017] Disponible en: <http://www.ni.com/data-acquisition/what-is/esa/#>

NATIONAL INSTRUMENTS. “Errores en Labview”, 2017. [En línea]. [Fecha de consulta: 14/04/2017] Disponible en: www.ni.com

NATIONAL INSTRUMENTS. “NI myDAQ”, 2017. [En línea]. [Fecha de consulta: 14/04/2017] Disponible en: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/es/nid/203964>

OPEX ENERGY. “Energía fotovoltaica, principio de funcionamiento”, 2017. [En línea]. [Fecha de consulta: 20/1/2017] Disponible en: http://opex-energy.com/en/fotovoltaica/funcionamiento_fotovoltaica.html

RINGOIR, Ruud. La medición precisa de la radiación solar permite obtener un rendimiento eficiente. KIPP & ZONEN, 17 de Abril 2015.