

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIA  
DEPARTAMENTO DE FISICA



**CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE BAJO  
COSTO PARA LA MEDICIÓN DE PARÁMETROS SOLARES DE  
UN PANEL FOTOVOLTAICO**

MARCELO ALEJANDRO SALGADO BRAVO

2014

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIA  
DEPARTAMENTO DE FISICA



**CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE BAJO  
COSTO PARA LA MEDICIÓN DE PARÁMETROS SOLARES DE  
UN PANEL FOTOVOLTAICO**

MARCELO ALEJANDRO SALGADO BRAVO

Profesor Guía : Dr. Ernesto Gramsch

Profesores Comisión : Dr. Raúl Cordero  
: Dr. Raúl Labbe  
: Dr. Yolanda Vargas

Trabajo de graduación presentado a la Facultad de Ciencia,  
en cumplimiento parcial de los requerimientos exigidos para  
optar al título de Ingeniero Físico.

SANTIAGO DE CHILE

ABRIL 2015

“CONSTRUCCIÓN DE UN EQUIPO DE BAJO  
COSTO PARA LA MEDICIÓN DE PARÁMETROS SOLARES DE UN PANEL  
FOTOVOLTAICO ”

Trabajo de graduación presentado a la Facultad de Ciencia, en cumplimiento parcial de los requerimientos exigidos para optar al título de Ingeniero Físico.

UNIVERSIDAD DE SANTIAGO DE CHILE

SANTIAGO DE CHILE

ABRIL 2015

**© Marcelo Alejandro Salgado Bravo.**

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica del documento.

# Tabla de Contenido

<b>Tabla de Contenidos</b>	<b>I</b>
<b>Índice de tablas</b>	<b>IV</b>
<b>Índice de Ilustraciones</b>	<b>VI</b>
<b>Resumen</b>	<b>VII</b>
<b>1 Introducción</b>	<b>1</b>
1.1 Introducción . . . . .	2
1.1.1 Radiación Solar . . . . .	2
1.1.2 Espectro Solar . . . . .	3
1.1.3 Radiación solar en la superficie terrestre . . . . .	4
1.1.4 Situación actual de las energías renovables en Chile . . . . .	5
1.1.5 Movimiento del Sol y radiación incidente en el plano . . . . .	9
1.2 Piranómetro y medición de radiación solar. . . . .	12
1.2.1 Instrumentos . . . . .	12
1.2.2 Estandarización . . . . .	13
1.3 Modelo BRL . . . . .	14
1.3.1 Modelo de fracción difusa . . . . .	14
1.3.2 Modelo BRL . . . . .	16
1.4 Objetivos . . . . .	19
1.4.1 Objetivos generales . . . . .	19
1.4.2 Objetivos específicos . . . . .	19
<b>2 Construcción</b>	<b>20</b>
2.1 Construcción equipo de adquisición y almacenamiento de datos . . . . .	21

2.1.1	Conversor análogo/Digital Microchip MCP3208b . . . . .	22
2.1.2	Amperímetro de efecto Hall Allegro ACS712 . . . . .	24
2.1.3	Reloj de tiempo real DS1307 . . . . .	25
2.1.4	Divisor de Tensión . . . . .	26
2.1.5	Termistor . . . . .	26
2.2	Construcción de piranómetro . . . . .	27
2.3	Construcción banda de sombra . . . . .	30
2.4	Calibración piranómetros . . . . .	33
2.5	Calibración radiación difusa y global . . . . .	37
2.6	Consideraciones sobre termistor NXFT15XH103F . . . . .	40
2.7	Calibración mediciones de Voltaje y Corriente . . . . .	40
2.8	Montaje Experimental . . . . .	42
<b>3</b>	<b>Implementación y medición</b>	<b>45</b>
3.1	Implementaciones de Código . . . . .	46
3.1.1	Conversor análogo/digital MCP3208b . . . . .	46
3.1.2	Medición en tiempo real . . . . .	47
3.1.3	Posición del piranómetro bajo la banda de sombra . . . . .	50
3.1.4	Radiación incidente en una superficie inclinada a lo largo del día . . . . .	50
3.2	Medición . . . . .	52
3.2.1	Curva de caracterización V-I en condiciones reales . . . . .	52
3.2.2	Variación de la eficiencia en torno a la temperatura . . . . .	54
3.2.3	Validación del modelo BRL . . . . .	56
<b>4</b>	<b>Análisis económico</b>	<b>60</b>
4.1	Costos del piranómetro y equipos similares . . . . .	61
4.1.1	Introducción . . . . .	61
4.1.2	Desglose de costos variables en construcción del piranómetro . . . . .	61
4.1.3	Costos fijos en la producción de un piranómetro . . . . .	63
4.1.4	Análisis de producción y venta mensual . . . . .	64
4.1.5	Open Hardware . . . . .	66
4.1.6	Comparación con piranómetros en el mercado . . . . .	67
<b>5</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>69</b>
5.1	Conclusiones . . . . .	70

<i>TABLA DE CONTENIDO</i>	III
<b>A Raspberry Pi</b>	<b>74</b>
<b>B Código usado</b>	<b>76</b>
B.1 Códigos . . . . .	76
B.1.1 Medición en tiempo real . . . . .	76
B.1.2 Posición del piranómetro bajo la banda de sombra . . . . .	80
B.1.3 Radiación incidente en una superficie inclinada a lo largo del día . . . . .	83
<b>C Cálculo del VAN para proyecto de producción industrial de piranómetros</b>	<b>88</b>

# Índice de tablas

2.1	Error medición voltaje y corriente . . . . .	42
3.1	Error modelo boland mes . . . . .	57
4.1	Costos materiales piranómetro . . . . .	61
4.2	Costos materiales datalogger . . . . .	62
4.3	Costos de inversión . . . . .	63
4.4	Solar Tracker Solys 2 . . . . .	64
4.5	Tabla depreciación . . . . .	65
4.6	Costo piranometros . . . . .	68

# Índice de Ilustraciones

1.1 Radiación solar incidente en el planeta . . . . .	3
1.2 Espectro solar incidente en el planeta . . . . .	4
1.3 Tipos de radiación solar . . . . .	5
1.4 Proyectos energías renovables . . . . .	6
1.5 Proyectos energías en evaluación . . . . .	7
1.6 Mapa radiación directa . . . . .	8
1.7 Movimiento aparente del sol . . . . .	9
1.8 Cenit y Azimut . . . . .	10
1.9 Diferencia respuesta piranómetro . . . . .	12
1.10 Esquema piranómetro pirheliómetro . . . . .	13
1.11 Estandarización iso 9060 WMO . . . . .	14
1.12 Fracción difusa Adelaide . . . . .	15
1.13 Fracción difusa modelo boland Adelaide . . . . .	18
1.14 Error modelo Boland por localidad . . . . .	19
2.1 Diagrama equipo adquisición . . . . .	22
2.2 Pines Raspberry pi revisión 2.0 . . . . .	23
2.3 Diagrama Conversor A/D MCP3208b . . . . .	24
2.4 Diagrama amperímetro efecto Hall . . . . .	25
2.5 Diagrama rtc DS1307 . . . . .	26
2.6 Diagrama termistor . . . . .	27
2.7 Piranómetro Kipp & Zonen . . . . .	27
2.8 Diagrama piranómetro . . . . .	28
2.9 Curva de respuesta BPW34 . . . . .	29
2.10 Electrónica piranómetro . . . . .	30

2.11 exterior piranómetro . . . . .	30
2.12 Banda de sombra brasil . . . . .	32
2.13 banda de sombra instalada . . . . .	33
2.14 Comparación medición radiación global día nublado . . . . .	34
2.15 Comparación medición radiación global día soleado . . . . .	35
2.16 Comparación Piranómetros . . . . .	36
2.17 Comparación medición radiación global día parcialmente nublado . . . . .	37
2.18 Comparación medición radiación global piranómetros fabricados y sistema UC . . . .	38
2.19 Comparación medición radiación difusa piranómetros fabricados y sistema UC . . . .	39
2.20 Calibración de medición de voltaje y amperaje . . . . .	41
2.21 Esquema de montaje . . . . .	43
2.22 Montaje de equipos utilizados . . . . .	44
3.1 Comunicación binaria MCP3208b . . . . .	47
3.2 Diagrama de flujo código medición . . . . .	49
3.3 Curva V-I 500 $\frac{W}{m^2}$ . . . . .	52
3.4 Curva V-I 1000 $\frac{W}{m^2}$ . . . . .	53
3.5 Curva de eficiencia panel. . . . .	56
3.6 Radiación difusa medida y calculada . . . . .	58
3.7 Fracción difusa sep. y nov. . . . .	58
A.1 Raspberry Pi . . . . .	75
C.1 cálculo VAN . . . . .	89

# Resumen

En el presente trabajo de titulación se ha construido un equipo de bajo costo para evaluación del desempeño de un sistema solar fotovoltaico. Para ello, se ha construido un equipo de medición y almacenamiento de datos basado en la plataforma Raspberry Pi que a la vez ejecutar un modelo matemático de análisis de datos tales como el modelo BRL y determinación de la posición del sensor para la medición de radiación difusa. Se construyeron una serie de piranómetros utilizando detectores ópticos de silicio. El sistema fue implementado y probado en el techo del Departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile. Se obtuvo la radiación difusa, directa y global con la menor cantidad de sensores posible. El sistema de adquisición de datos está basado en un computador Raspberry Pi, sistema ARM y corriendo en Raspbian (fork de Debian) equipado con un conversor análogo digital de 12 bits y una serie de sensores contruidos específicamente para realizar las mediciones, entre los que destacan: 2 piranómetros, termistores, voltímetro y un amperímetro de efecto Hall. Para la calibración de los detectores se utilizó un detector calibrado perteneciente al Departamento de Física en conjunto con piranómetros Zipp & Zonen de la Pontificia Universidad Católica de Chile.

Entre los principales tópicos se expone la construcción y calibración de cada uno de los componentes del sistema de medición con mayor atención en los piranómetros contruidos (capítulo 2), el código utilizado para el correcto funcionamiento del equipo y distintos resultados obtenidos de las mediciones realizadas, tales como curvas de caracterización V-I y su variación según la radiación incidente, caracterización de la eficiencia de un panel fotovoltaico y la validación del modelo BRL en Santiago de Chile (capítulo 3). En el capítulo 4 se habla sobre el análisis económico del equipo junto con sus opciones en el mercado, cálculo de la VAN y consideraciones como proyecto a corto plazo, para finalizar con las conclusiones obtenidas del trabajo realizado.

# **Capítulo 1**

## **Introducción**

## 1.1 Introducción

A lo largo de este capítulo se hablará de algunos conceptos básicos para la comprensión del trabajo, en donde serán tocados temas como la radiación solar, modelos aplicados para su modelamiento, medición de radiación emitida y una pequeña reseña a la situación actual de las energías renovables a nivel nacional. Al final del capítulo se fijaran los objetivos de la tesis.

### 1.1.1 Radiación Solar

La radiación solar se define como la radiación proveniente del Sol en forma de ondas electromagnéticas, siendo ésta una fuente de energía inagotable en escala humana, que entrega energía a los sistemas fotovoltaicos para la obtención de electricidad o calor al hacer uso de concentradores solares térmicos. La radiación tiene un espectro lumínico de cierta longitud de onda emitida por el Sol, estrella presente en el centro del sistema solar. La tierra tiene una órbita elíptica a su alrededor, dado por un semieje menor de  $1,4966 * 10^8$  km, un semieje mayor de  $1,4968 * 10^8$  km y su excentricidad  $e=0.0167$  [1].

Considerando al sol como un cuerpo esférico gaseoso con una temperatura superficial de  $5778^\circ\text{K}$  (energía generada a través de la fusión nuclear de Hidrógeno en Helio), podemos considerar su modelamiento como un cuerpo negro bajo la ley de Stefan-Boltzmann, éste irradia un flujo energético dado por:

$$E = \sigma T^4 = 63,3 \frac{MW}{m^2} \quad (1.1)$$

Donde E corresponde al flujo energético por unidad de tiempo y de área.  $\sigma$  es la constante de Stefan-Boltzmann y T representa la temperatura del sol (en Kelvin).

Considerando la energía emitida por el sol a lo largo de toda su superficie, se define la luminosidad solar, la que está dada por:

$$L_s = EA_{Sol} = \sigma T^4 (4\pi r_s^2) \approx 3,65 * 10^{20} [MW] \quad (1.2)$$

Al analizar la radiación incidente sobre la tierra resulta que es relativamente constante, sufriendo variaciones dependiendo de los ciclos solares. Si consideramos la observación de la radiación sobre la atmósfera terrestre, el flujo energético decae por la distancia de una unidad astronómica (Astronomical unit - AU) entre el sol y la tierra, tal como se aprecia en la figura 1.1:

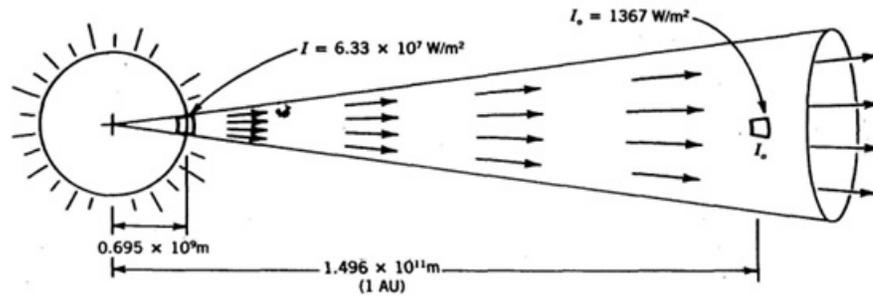


Figura 1.1: Esquema de la transmisión y decaimiento de la radiación solar entre la fuente y la superficie de la atmósfera del planeta.

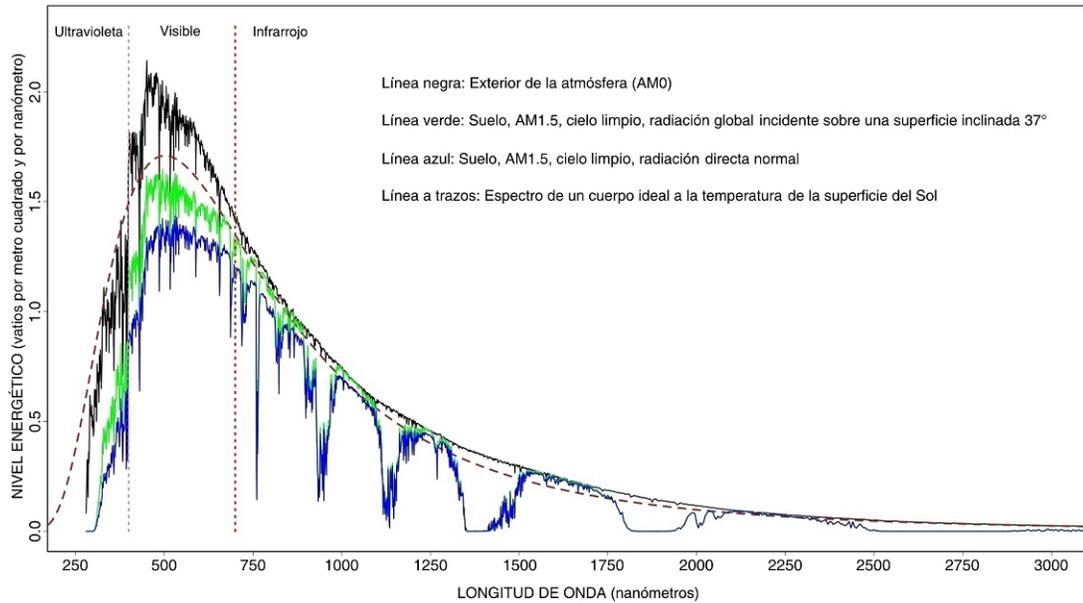
Considerando que la radiación solar es inversamente proporcional al cuadrado de la distancia entre el punto de emisión y receptor, se tiene que la potencia incidente en la atmósfera es de:

$$I = \frac{L_s}{4\pi(D_{T-S})^2} = \frac{3,65 * 10^{26} W}{4\pi(1,5 * 10^{11} m)^2} \approx 1367 \frac{W}{m^2} \quad (1.3)$$

Donde  $D_{T-S}$  corresponde a la distancia entre la tierra y el sol. El valor obtenido en la ecuación 1.3 es conocido como Constante Solar. Nuevas mediciones realizadas en el último tiempo indican un valor de  $1366.1 \left[\frac{W}{m^2}\right]$  [2].

### 1.1.2 Espectro Solar

El sol emite radiación electromagnética en un amplio espectro de frecuencias, con una mayor predominancia en la radiación visible. Antes del efecto de la atmósfera terrestre en la dispersión y absorción del espectro solar las mayores contribuciones vienen de la radiación visible e infrarroja, la que es atenuada y depende de la masa de aire (Air Mass - AM) en la atmósfera.



Espectro solar medido bajo tres diferentes **masas de aire** (longitud relativa de la atmósfera que han de atravesar los rayos).

Figura 1.2: Espectro solar incidente al exterior (ETS) e interior (AM1.5G) de la Atmósfera [3].

### 1.1.3 Radiación solar en la superficie terrestre

Una vez que la radiación ha atravesado la atmósfera e incide en la superficie terrestre, se observa que la radiación llega a la superficie en distintas formas (que se aprecian en la figura 1.3):

- Radiación directa: Es toda radiación incidente en la tierra que no ha sido desviada desde su dirección original. Acompaña a la posición del sol y tiene un alto valor desde el inicio, dependiendo su proporción de la atmósfera y el camino recorrido.

- Radiación difusa: Es toda radiación incidente en la superficie terrestre cuya dirección no es la dirección del sol, habiendo pasado por dispersión simple o múltiple. Debido a su naturaleza este tipo de radiación viaja en todas direcciones sobre la superficie. Su dispersión se produce producto de las nubes en el cielo, contaminantes ambientales, distintos elementos en la atmósfera, polvo en suspensión, montañas y otros elementos que reflejen radiación en la superficie.

- Radiación reflejada o de albedo: Corresponde a la radiación directa o difusa reflejada por la superficie terrestre, por su naturaleza esta medición solo afecta a objetos verticales o con algún grado de inclinación respecto al horizonte.

- Radiación global: Esta corresponde a la sumatoria de las radiaciones incidentes en una superficie horizontal o vertical.

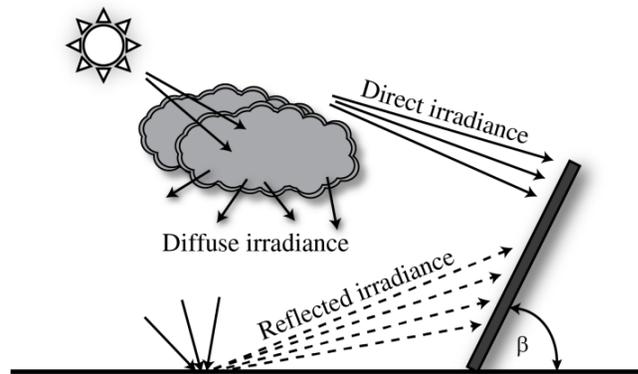


Figura 1.3: Radiación solar incidente en una superficie inclinada. Se aprecia la radiación difusa (diffuse), directa (Beam) y de albedo (Reflected)

En una superficie horizontal la radiación total incidente está dada sólo por la radiación directa y difusa, mientras que en planos inclinados la radiación de albedo incide en la superficie.

En un día soleado la mayor parte de la radiación en la superficie corresponde a radiación directa, mientras en un día nublado o lluvioso la radiación difusa predomina, debido a que las nubes se encargan de dispersar o reflejar la radiación directa. Finalmente, la componente de albedo es de menor intensidad al compararla con la radiación directa o difusa, por lo que es necesario realizar mediciones de radiación eliminando toda otra fuente de radiación incidente. También se puede usar una variedad de modelos matemáticos con el fin de calcular su valor.

#### 1.1.4 Situación actual de las energías renovables en Chile

En los últimos años se ha observado un aumento notorio en las energías renovables no convencionales (ERNC), enfatizado por la Ley 20.257 (conocida como ley 20/25, promulgada en octubre del 2013), bajo la que el 20% de la energía generada en el año 2025 debe provenir de ERNC. Considerando esta nueva normativa se han puesto en campaña una serie de proyectos enfocados principalmente en Energía Solar y Eólica, que en conjunto podrían producir más de 18.000 MW de ser aprobadas y construidas las propuestas actuales.

Tecnología	Operación	Construcción	Calificación Ambiental aprobada	En evaluación
Biomasa	461	0	94	40
Biogás	43	0	1	8
Eólica	737	160	5.195	2.197
Mini Hidráulica	343	129	299	199
Solar - PV	219	456	7.811	2.591
Solar - CSP	0	110	760	0
Geotermia	0	0	120	0
<b>Total</b>	<b>1.803</b>	<b>855</b>	<b>14.280</b>	<b>5.035</b>

Figura 1.4: Estado de proyectos de energías renovables en Chile [4].

Al analizar la producción de energía en base a recursos renovables en los últimos 5 años la energía solar no fue mayormente considerada hasta este año, en donde los distintos proyectos en la Región de Antofagasta dispararon su crecimiento. En octubre de 2014 se encuentran en etapa de construcción 566MW entre plantas fotovoltaicas y de concentración solar a lo largo de todo Chile (figura 1.4), de los cuales 526MW se encuentran en construcción en la II región [4].

Actualmente hay más de 60 proyectos fotovoltaicos en evaluación con una producción estimada sobre los 50MW, cerca de 50 proyectos entre los 20MW y 50MW; y una nula presencia de proyectos bajo los 5MW (figura 1.5). Esto indica el crecimiento sostenido de la energía solar en base a grandes proyectos fotovoltaicos, debido a su buena rentabilidad y bajo costo en comparación con plantas de menor tamaño.

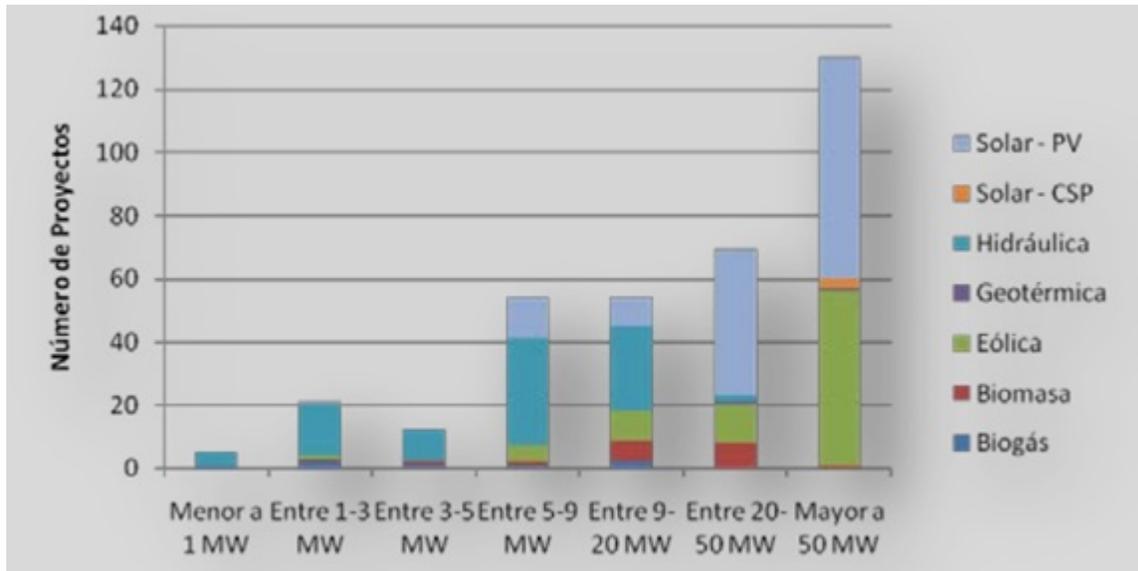


Figura 1.5: Proyectos en evaluación ambiental según su producción y el recurso renovable utilizado [4].

La gran cantidad de proyectos fotovoltaicos en las regiones del norte del país se debe principalmente a la alta radiación incidente debido a sus condiciones ambientales. Tal como se aprecia en la figura 1.6 los valores de radiación directa pueden superar los  $3500 \frac{kWh}{m^2}$  promedio a lo largo del año, esto se debe en gran proporción a la cantidad de días despejados y la altura sobre el nivel del mar de la región, que en algunos puntos supera fácilmente los 3000 msnm. Por ello, el norte de Chile es considerado uno de los 7 puntos de mayor radiación solar en el mundo.

## Direct Normal Irradiation (DNI)

## Latin America and the Caribbean



Figura 1.6: Mapa de radiación solar directa normal de Sudamérica, en el que se aprecia un alto nivel de radiación solar a lo largo del año en el norte de Chile, donde se concentra el mayor número de proyectos de generación fotovoltaica [5].

### 1.1.5 Movimiento del Sol y radiación incidente en el plano

Fuera del movimiento de rotación y traslación propio del Sol este capítulo trata sobre el movimiento observado desde un punto arbitrario de la superficie terrestre como la salida y puesta del sol, el ángulo del sol respecto al vector orto-normal a la superficie terrestre (Zenit) o el ángulo de posición del sol en el plano respecto al norte (Azimut). Estas variables serán utilizadas para estimar la radiación incidente en un plano inclinado, útil para cálculos de eficiencia de un panel fotovoltaico.

A lo largo del año se observa que el sol se mueve en dirección Este-Oeste, esto se debe a la combinación del movimiento de traslación y rotación de la tierra.

Considerando lo anterior a lo largo del año los puntos de salida y puesta de Sol van variando. En específico el 21 de junio la salida y puesta del sol es lo más cercana posible al Norte cardinal para el hemisferio sur, y el 22 de diciembre es el día del año en el que los puntos de salida y puesta del sol son lo mas lejanos posibles al norte. Como se observa en la figura 1.7 el movimiento del sol a lo largo del día forma una circunferencia respecto al norte, de tal manera que al eliminar un eje de movimiento en el plano (eje este-oeste) la trayectoria del sol es similar a una línea recta.

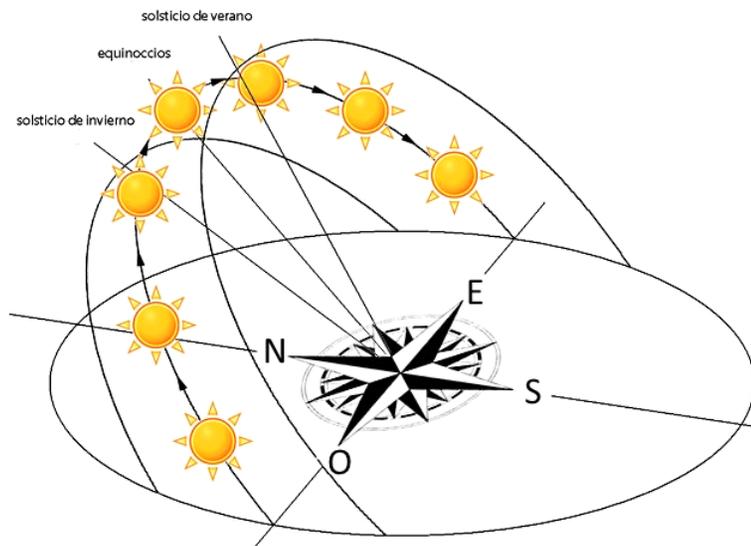


Figura 1.7: Movimiento aparente del sol a lo largo del año desde un mismo punto de referencia terrestre.

Al momento de considerar la posición del sol a lo largo del día debemos recurrir al Cenit (*Zenith*), altura solar y Azimut (*Azimuth*):

- Cenit: Ángulo producido entre la intersección de la vertical de un plano (punto de referencia) y la posición del sol.
- Altura solar: Ángulo producido entre el horizonte del plano (plano de referencia) y la posición del sol.
- Azimut: Ángulo sobre el horizonte que se forma entre el punto cardinal Norte y la proyección del sol en el horizonte del observador.

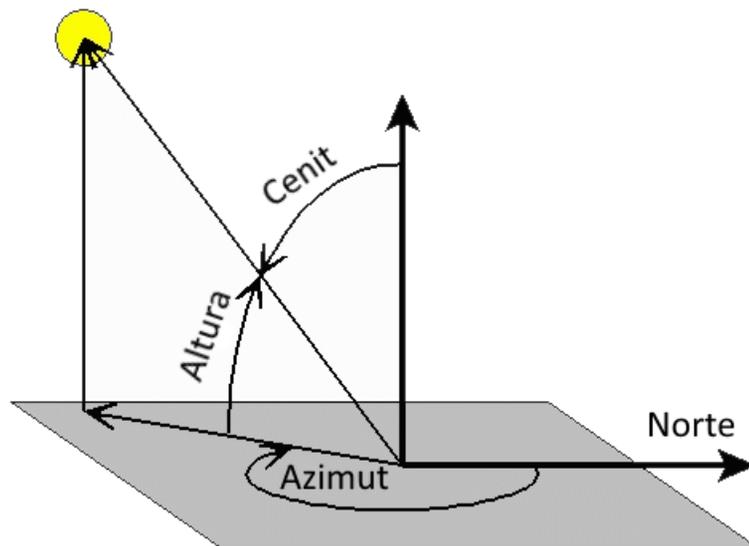


Figura 1.8: Representación del ángulo de cenit, azimut y el ángulo de elevación del sol (altura solar).

Para la visualización de la posición del sol en un plano tridimensional es usado el concepto de Vector Solar, el que corresponde a un vector indicador de la posición del sol desde un punto de observación en la superficie terrestre. Se puede expresar en coordenadas cartesianas como:

$$\hat{S} = \sin(z)\cos(A)\hat{x} + \sin(z)\sin(A)\hat{y} + \cos(z)\hat{z} \quad (1.4)$$

Su importancia radica en el ángulo que se produce entre el vector normal a la superficie del panel fotovoltaico inclinado y el vector solar, ya que la radiación directa incidente en la superficie del panel fotovoltaico depende directamente del coseno del ángulo producido entre dichos

vectores.

En el caso de la radiación difusa en planos inclinados se debe recurrir a modelos de caracterización del comportamiento solar en la atmósfera correspondiente al cielo, para ello priman 2 tipos de modelos:

- Modelos isotrópicos: Considera que el comportamiento de la atmósfera es isotrópico, sin variaciones y homogénea en su respuesta ante la reflexión y difusión de la radiación. Modelo útil para días despejados.
- Modelos anisotrópicos: Considera distintos comportamientos de la atmósfera dependiendo de la posición del sol, indicando que la radiación depende de su posición y que la atmósfera no difunde la radiación de manera homogénea, si no que se da difusión simple o múltiple de la radiación. Modelo útil para días despejados, nublados y con nubosidad parcial. Se encuentran bajo estudio debido a la dificultad del modelamiento de los distintos componentes presentes en la atmósfera a nivel global y local.

Para calcular la radiación difusa en plano inclinado fue utilizado el modelo anisotrópico de Klucker [6], que tiene buenos resultados tanto para cielo despejado como para condiciones de nubosidad. Este es:

$$H_{dif,inc} = \frac{1}{2}H_{dif}(1 + \cos(\beta)) \left[ 1 + F \sin^3 \left( \frac{\beta}{2} \right) \right] (1 + F \cos^2(\theta) \sin^3(\theta_z)) \quad (1.5)$$

Donde:

$$F = 1 - \left( \frac{H_{dif}}{H_{glo}} \right) \quad (1.6)$$

Siendo  $H_{dif}$  la radiación difusa en un plano horizontal,  $H_{glo}$  la radiación global en un plano,  $\beta$  el ángulo de inclinación del plano,  $\theta_z$  el ángulo del cenit y  $\theta$  el ángulo entre el vector solar y el vector ortonormal a la superficie del panel.

Para calcular la radiación de albedo fue utilizado un modelo isotrópico. Dado que este tipo de radiación corresponde a la radiación reflejada por la superficie terrestre y que el índice de reflexión del pasto, concreto, techos u otro material es distinto se considera un índice de albedo (o de radiación reflejada) del orden de 0.1 para Santiago [7].

La expresión correspondiente es:

$$H_{inc,alb} = \frac{1}{2}H_{glo}\rho(1 - \cos(\beta)) \quad (1.7)$$

Siendo  $\rho$  el índice de albedo.

La radiación total incidente en un plano inclinado corresponde a la suma de las componentes de radiación directa, difusa y albedo. La expresión es:

$$H_{inc,\beta} = H_{directa} \cos(\theta) + H_{dif,inc} + H_{inc,alb} \quad (1.8)$$

## 1.2 Piranómetro y medición de radiación solar.

### 1.2.1 Instrumentos

Para la caracterización de la radiación solar incidente en un punto específico o área de la tierra es necesaria la medición de la radiación con un bajo rango de error, para ello son usados 2 tipos de instrumentos para la medición de radiación solar, estos son:

- Piranómetro: sensor de radiación solar basado en una termopila (figura 1.10) o un fotodiodo de silicio (figura 2.7). Se usa para medir la radiación incidente en un plano de  $180^\circ$ . A través de una termopila genera un diferencial de voltaje linealmente dependiente de la radiación incidente. Puede llevar una cúpula de vidrio o de teflón y dependiendo de su construcción puede tener curvas de respuesta a la radiación entre 400nm a 1100nm para fotodiodos o desde 300nm a 2800nm para construcciones basados en termopilas.

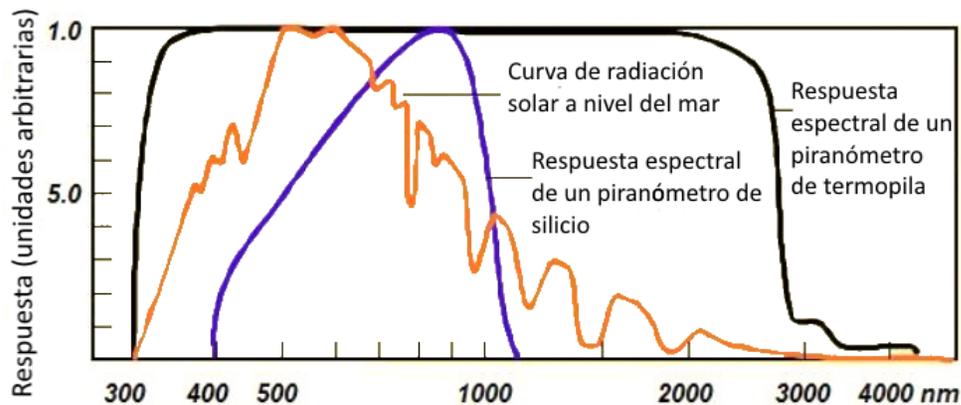


Figura 1.9: Curvas de respuesta de un piranómetro basado en termopila (negro) y basado en silicio (azul). La selectividad del silicio es uno de los mayores puntos en contra de ese tipo de piranómetro.

- Pirheliómetro: sensor de radiación solar directa. Al igual que el piranómetro su construcción está basado en la termopila para medir la radiación solar (figura 1.10). Su cuerpo es alargado debido a que sólo permite la incidencia de radiación directa solar, a través de una apertura que permite el paso de radiación en un ángulo de  $5^\circ$ , por lo que necesita de un sistema de seguimiento solar o ajuste manual para poder medir correctamente la radiación directa incidente.

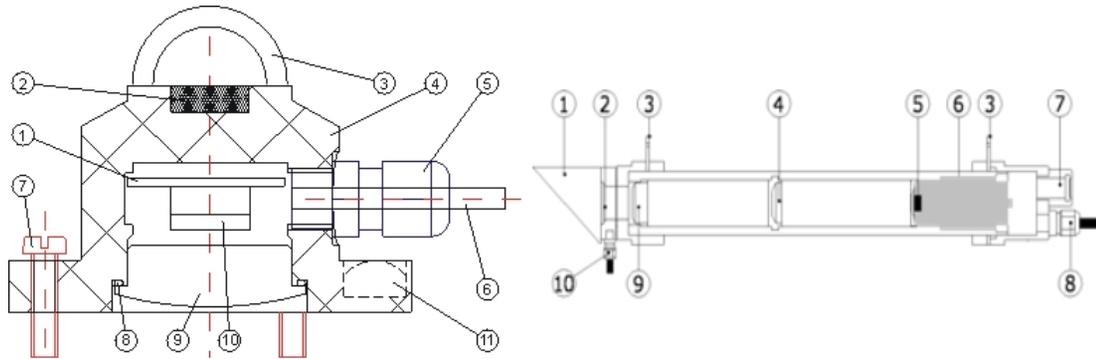


Figura 1.10: Dibujo esquemático de un piranómetro (izquierda) y un pirheliómetro (derecha).

Además de medir radiación global, es posible usar uno o mas piranómetros para medir radiación difusa y de albedo, para ello son necesarios distintos montajes que sean capaces de bloquear la radiación directa del sol (difusa), o una esfera en 180 grados capaz de bloquear toda radiación proveniente del espacio (albedo).

Es posible estimar la radiación directa y difusa en base a modelos matemáticos, dependiendo de la radiación global y algunos parámetros meteorológicos, lo que será tratado posteriormente.

## 1.2.2 Estandarización

La precisión en los piranómetros es un elemento de vital importancia, por lo que sus características específicas tales como precisión, estabilidad, resolución, tiempo de respuesta y selectividad espectral determinan su calidad y posibles usos.

En base a las necesidades de la industria y precisión en la medición aparecen 2 protocolos de estandarización para piranómetros, estos son el ISO 9060:1990(E) [8] y la sexta guía de la organización World Meteorological Organisation (WMO), siendo el primero el de mayor

difusión a nivel mundial. En la siguiente figura (1.11) se presentan las diferencias entre cada una de las clasificaciones:

<b>ISO Specification</b>	<i>ISO</i>	<b>secondary standard</b>	<b>first class</b>	<b>second class</b>
<b>WMO Characteristics</b>	<i>WMO</i>	<b>high quality</b>	<b>good quality</b>	<b>moderate quality</b>
Response time (to 95% of final value)	<i>ISO&amp;WMO</i>	< 15 sec	< 30 sec	< 60 sec
Zero off-set response: to 200 W/m <sup>2</sup> net radiant loss to sky (ventilated) to 5°C/hr change in ambient temperature	<i>ISO&amp;WMO</i>	7 W/m <sup>2</sup> ±2 W/m <sup>2</sup>	15 W/m <sup>2</sup> ±4 W/m <sup>2</sup>	30 W/m <sup>2</sup> ±8 W/m <sup>2</sup>
Resolution (smallest detectable change)	<i>WMO</i>	±1 W/m <sup>2</sup>	±5 W/m <sup>2</sup>	±10 W/m <sup>2</sup>
Non-stability (change in sensitivity per year)	<i>ISO&amp;WMO</i>	± 0.8%	± 1.5%	± 3%
Non-linearity (deviation from sensitivity at 500 W/m <sup>2</sup> over 100 to 1000 W/m <sup>2</sup> range)	<i>ISO&amp;WMO</i>	± 0.5%	± 1%	± 3%
Directional response for beam radiation (error due to assuming that the normal incidence response at 1000 Wm <sup>-2</sup> is valid for all directions)	<i>ISO&amp;WMO</i>	±10 W/m <sup>2</sup>	±20 W/m <sup>2</sup>	±30 W/m <sup>2</sup>
Spectral selectivity (deviation of the product of spectral absorptance and transmittance from the mean)	<i>ISO (0.35 - 1.5 μm)</i> <i>WMO (0.3 - 3 μm)</i>	± 3% ± 2%	± 5% ± 5%	± 10% ± 10%
Temperature response (error due to 50°C ambient temperature change)	<i>ISO&amp;WMO</i>	± 2%	± 4%	± 8%
Tilt response (deviation from horizontal responsivity due to tilt from horiz. to vert. at 1000 W/m <sup>2</sup> )	<i>ISO&amp;WMO</i>	± 0.5%	± 2%	± 5%
Achievable uncertainty, 95% confidence level	<i>WMO hourly totals</i> <i>WMO daily totals</i>	3% 2%	8% 5%	20% 10%
<b>Suitable Applications</b>		working standard	network operations	low cost networks

Figura 1.11: Tabla de estandarización según el protocolo WMO y la ISO 9060:1990 [9].

## 1.3 Modelo BRL

### 1.3.1 Modelo de fracción difusa

Basado en la función logística el modelo BRL o modelo de Boland [10, 11] tiene como fin determinar la radiación difusa y directa en base a la medición de la radiación global y una serie de parámetros tales como hora solar, altitud solar, ángulo de inclinación, índice de claridad e índice diario de claridad. Uno de los fuertes de este modelo es la simplicidad de la aplicación debido a que se necesita medir radiación global y el resto de los parámetros son calculados en base a la locación geográfica en donde se realizan las mediciones.

Para la determinación de la radiación difusa se busca conocer la proporción entre

radiación difusa y radiación global, conocida como fracción difusa.

$$d = \frac{I_{difusa}}{I_{global}} \quad (1.9)$$

El predictor más simple es el índice de claridad horario, dado por la radiación global y la radiación extraterrestre en el intervalo de una hora:

$$k_t = \frac{I_{global}}{I_{EXT}} \quad (1.10)$$

En base a este único parámetro es posible establecer el modelo de fracción difusa, basado en la función logística y de una forma general. En la figura 1.12 es posible observar la relación entre el índice de claridad horario y la fracción difusa, basado en los datos de radiación obtenidos en Adelaide, Australia.

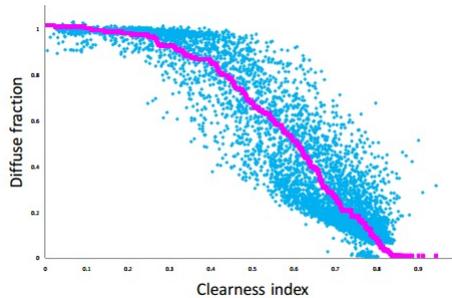


Figura 1.12: Gráficos de índice de claridad y fracción difusa en la localidad de Adelaide, Australia.

El paso final para modelar la radiación difusa como función logística corresponde a encontrar la relación entre la fracción difusa y el índice de claridad. La forma de esta ecuación es:

$$d = \frac{1}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 * k_t}} \quad (1.11)$$

A través del uso de algoritmos de comparación se encontraron los valores correspondientes para los parámetros  $\beta_0$  y  $\beta_1$ . El cálculo del error fue realizado mediante la media del porcentaje de error absoluto (MeAPE). La comparativa fue realizada en Australia, encontrando rangos de error entre 6.5% a 27.8% para los parámetros encontrados, lo que se debe a las distintas condiciones climáticas a lo largo del país. El modelo propuesto fue considerado como un modelo genérico para calcular la fracción difusa.

El modelo obtenido fue:

$$d_{gen} = \frac{1}{1 + e^{-5,0033+8,6025*k_t}} \quad (1.12)$$

### 1.3.2 Modelo BRL

Distintos modelos predictivos de la fracción difusa han sido propuestos en los últimos años, algunos de los más reconocidos son el modelo de Reindl, Skartveit y Perez, en donde cada uno agrega distintos parámetros y funciones para su cálculo, los cuales varían según el enfoque del estudio. El modelo BRL se diferencia de los modelos previos en base al bajo número de parámetros necesarios, el uso de la función logística para su cálculo y su implementación. La mayoría de los modelos está enfocado en las condiciones atmosféricas presentes en el hemisferio norte del planeta, mientras que el modelo BRL apunta a su uso en el hemisferio sur y en todo el planeta.

Para el cálculo de la fracción difusa bajo el modelo BRL se usan los siguientes parámetros:

- Índice de Claridad horario ( $k_t$ )
- Índice de Claridad diario ( $K_t$ )
- Tiempo solar aparente (AST)
- Altura solar ( $\alpha$ )
- Persistencia ( $\psi$ )

Tal como en el modelo anterior, el índice de claridad permanece como parámetro de cálculo, y se suma el índice de Claridad diario, dado por la división de la radiación global a lo largo del día y la radiación extraterrestre:

$$K_t = \frac{I_{\sum_{j=1}^{24} I_{global_j}}}{\sum_{j=1}^{24} I_{EXT_j}} \quad (1.13)$$

Un parámetro de control introducido por el modelo BRL es la persistencia, que consiste en el promedio del índice de claridad antes y después del momento bajo análisis:

$$\psi_t = \begin{cases} \frac{k_{t-1}+k_{t+1}}{2} & \text{Salida del sol} < t < \text{Puesta del sol} \\ k_{t+1} & t = \text{Salida del sol} \\ k_{t-1} & t = \text{Puesta del sol} \end{cases} \quad (1.14)$$

Parámetros como Altura solar corresponden al ángulo formado por el punto en donde es visible el sol con la superficie terrestre. El tiempo solar aparente o tiempo solar local viene de la diferencia entre la hora local y la posición del sol, para su determinación son necesarias las coordenadas del lugar de estudio y la hora local correspondiente.

$$AST = \text{Horalocal} + \frac{4 * (\text{longitud} - LSTM) + EoT}{60} \quad (1.15)$$

LSTM corresponde al tiempo del meridiano local, que viene dado por la diferencia de tiempo entre el meridiano de Greenwich y el lugar de medición, a través de la expresión:

$$LSTM = 15^\circ \Delta T_{UTC/GMT} \quad (1.16)$$

EoT o ecuación del tiempo corresponde a una corrección empírica de la excentricidad de la órbita terrestre, que genera una diferencia de algunos minutos en el movimiento solar terrestre. Su expresión es:

$$EoT = 9,87 \sin(2B) - 7,53 \cos(B) - 1,5 \sin(B) \quad (1.17)$$

Donde  $B$  corresponde a:

$$B = \frac{360}{365} (d - 81) \quad (1.18)$$

en grados y  $d$  corresponde al número de días desde el inicio del año.

Uno de los beneficios de este modelo es que no necesita un mayor número de parámetros por medir, solo la radiación global por lo que el uso de sensores disminuye en su implementación.

La función propuesta por el modelo BRL para la determinación de la fracción difusa esta dada por la función logística y los 5 parámetros indicados, su expresión corresponde a:

$$d = \frac{1}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 k_t + \beta_2 AST + \beta_3 \alpha + \beta_4 K_t + \beta_5 \psi}} \quad (1.19)$$

Los parámetros  $\beta$  de la función deben ser estimados en base a las mediciones previamente obtenidas. Para su cálculo fue utilizado el método del mínimo error cuadrado, buscando la menor expresión del error para distintas combinaciones. La función resultante (y postulada como función a nivel global) es:

$$d = \frac{1}{1 + e^{-5,38 + 6,63k_t + 0,006AST - 0,007\alpha + 1,75K_t + 1,31\psi}} \quad (1.20)$$

Por medio de esta expresión se calcula el factor de fracción difusa. En la figura 1.13 se observa la fracción difusa tanto calculada como experimental en la localidad de Adelaide, Australia.

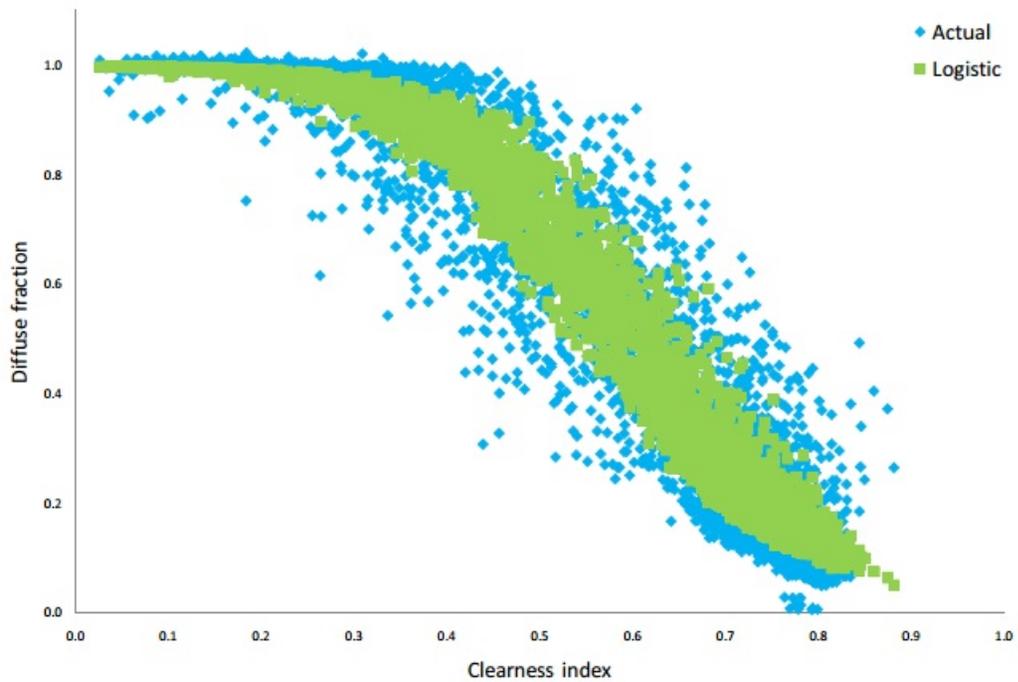


Figura 1.13: Índice de claridad y fracción difusa obtenidos experimentalmente (azul) y calculados usando el modelo BRL (verde) en la localidad de Adelaide, Australia.

Como se aprecia en la figura 1.14 al comparar con otros modelos el error disminuyó considerablemente, en especial con el modelo de Skartveit, en algunos casos el modelo de Reindl presenta un menor error en su cálculo. Todas las localidades nombradas son parte de Australia, que tienen una latitud similar a la de algunas ciudades de Chile.

		MeAPE			
		Location	Logistic	Reindl	Skartveit
Southern	Adelaide	16.52	18.69	20.92	
	Darwin	18.05	17.98	29.24	
	Maputo	16.88	20.93	22.68	
Northern	Bracknell	5.55	4.68	6.17	
	Lisbon	13.44	16.15	15.26	
	Macau	7.94	7.41	7.04	
	Uccle	6.89	7.03	6.59	

		MeBE			
		Location	Logistic	Reindl	Skartveit
Southern	Adelaide	-0.048	-0.036	-0.071	
	Darwin	-0.052	-0.042	-0.230	
	Maputo	-0.023	-0.045	-0.145	
Northern	Bracknell	0.015	0.008	0.014	
	Lisbon	-0.008	-0.010	0.001	
	Macau	0.014	0.007	0.000	
	Uccle	0.016	0.002	0.000	

Figura 1.14: Tabla de errores MeAPE y MeBE(mean bias error) para el cálculo de la fracción difusa según los modelos de Boland, Reindl y Skartveit para distintas localidades de Australia.

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivos generales

Construir un sistema de adquisición y almacenamiento de datos basado en Raspberry Pi de bajo costo para medir los parámetros operacionales de un panel fotovoltaico.

### 1.4.2 Objetivos específicos

- Construir y calibrar sensores de radiación global y difusa en el espectro visible e infrarrojo cercano.
- Implementar un modelo de radiación directa y difusa en base a la medición de radiación global y otros parámetros.
- Medir los parámetros operacionales de funcionamiento del panel fotovoltaico, radiación incidente en el plano del panel y potencia de salida bajo condiciones reales.
- Obtener la curva de caracterización del panel bajo condiciones reales.
- Analizar bajo criterios económicos el piranómetro propuesto versus otras opciones comerciales.

## **Capítulo 2**

# **Construcción y calibración de los equipos realizados**

## **2.1 Construcción equipo de adquisición y almacenamiento de datos**

La implementación de un sistema de adquisición de datos es de vital importancia en todo proyecto de medición y caracterización, almacenando la información requerida cada cierto tiempo predeterminado y a la vez realizando un procesamiento matemático en caso de ser necesario. El equipo seleccionado para la adquisición de datos es el mini computador Raspberry Pi [12] (AnexoA) debido a su reducido tamaño y bajo consumo energético. La adición de diferentes sensores necesarios junto con la construcción e implementación de un piranómetro son parte importante del proyecto, por lo que la electrónica implementada en el equipo fue un punto clave en las mediciones realizadas para la caracterización del panel fotovoltaico.

Los principales módulos electrónicos dentro del equipo corresponden al reloj de tiempo real (RTC DS1307), convertidor analógico/digital (MCP 3208b) y amperímetro (Allegro ACS712). La construcción de los piranómetros para la medición de radiación global será tratado de forma independiente.

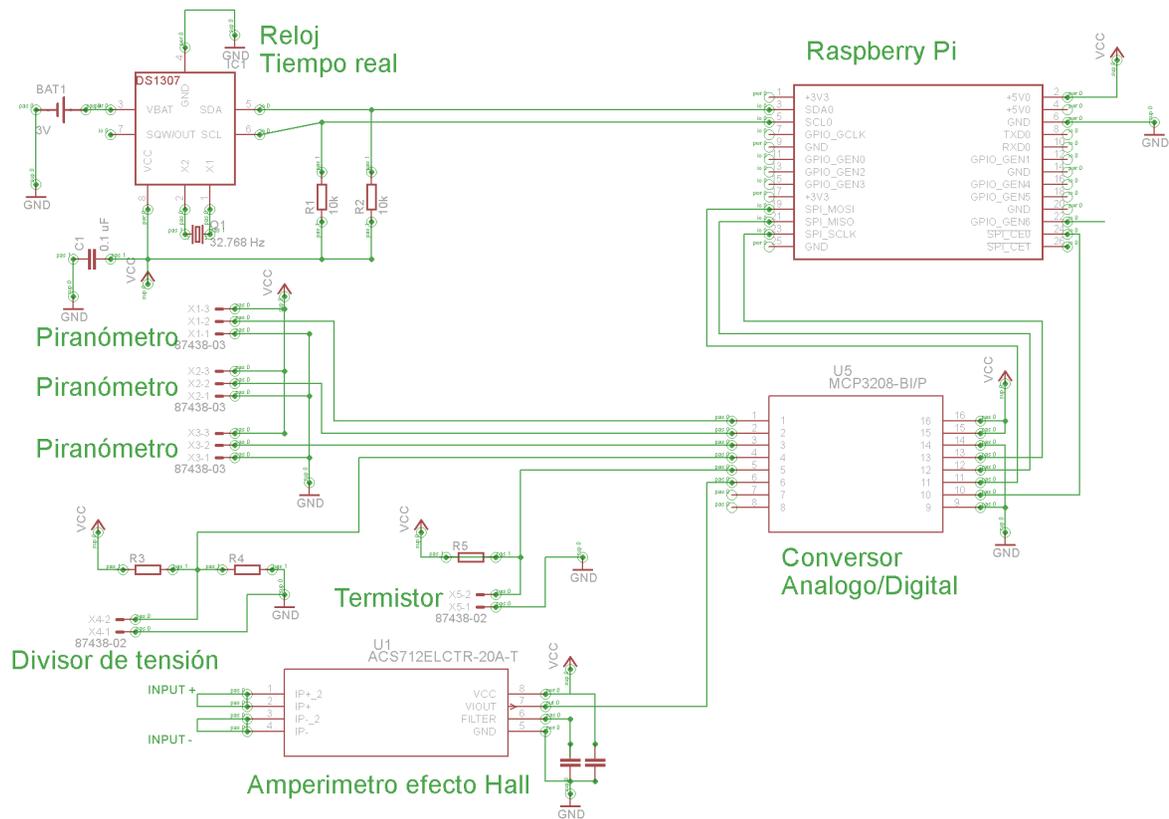


Figura 2.1: Diagrama del equipo de adquisición de datos.

En la figura 2.1 se aprecia el esquema de conexiones realizadas en la placa para el funcionamiento de cada uno de los elementos del circuito, por lo que el análisis individual de cada uno de los componentes será explicado a continuación:

### 2.1.1 Conversor análogo/Digital Microchip MCP3208b

Raspberry Pi en su construcción original sólo tiene disponibilidad de pines digitales, por lo que es necesario la incorporación de un sistema externo capaz de tomar señales analógicas para su procesamiento digital. El conversor A/D MCP3208b realiza una conversión análogo digital de 12 bits, lo que implica una mayor precisión en la medición frente al clásico sistema de 10 bits presente en equipos Arduino, a su vez es posible realizar hasta 100.000 mediciones por segundo, pero dadas las limitaciones de Raspberry Pi no es capaz de superar las 10.000 mediciones sin ningún tipo de procesamiento de datos debido a limitaciones de código. El protocolo de

comunicación utilizado por el MCP3208b es el protocolo SPI [13], que utiliza 4 distintos cables para la sincronización, activación y envío/recepción de datos, los que son:

- SCLK (clock): Sincroniza al Master y al Slave a través de pulsos. Por cada pulso se lee o envía un bit.
- MOSI (Master Output Slave Input): El Master envía datos y el Slave recibe.
- MISO (Master Input Slave Output): El Slave envía datos y el Master recibe.
- SS/CS (Slave o Channel Select): Selecciona un equipo Slave específico para el envío y recepción de información.

Haciendo uso del protocolo SPI es posible enviar bits específicos a un chip y recibir la respuesta en binario. Raspberry Pi revision 2.0 tiene a su disposición una serie de pines, los que se aprecian en la figura 2.2:

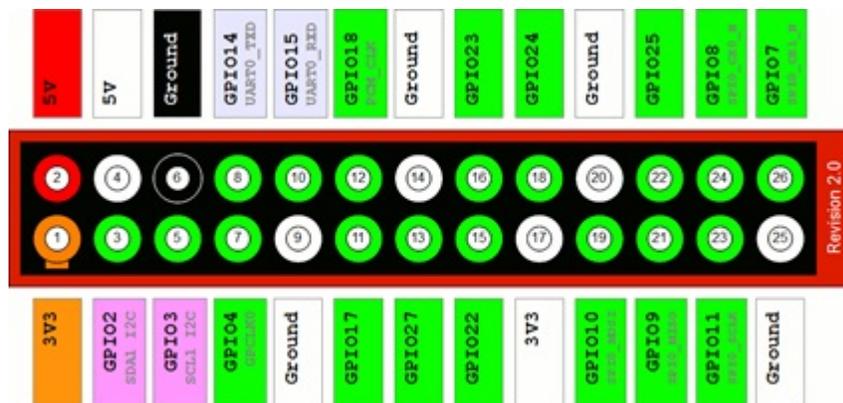


Figura 2.2: Mapa de conexiones en Raspberry Pi revisión 2.0.

Los pines 19, 21 y 23 corresponden a MOSI, MISO y SCLK respectivamente, los pines 24 y 26 pueden ser utilizados como pines SS/CS, permitiéndonos tener 2 equipos funcionando bajo el protocolo SPI.

El diagrama de conexiones del convertor análogo/digital MCP3208b en la placa fue realizado de la forma que se muestra en la figura 2.3:

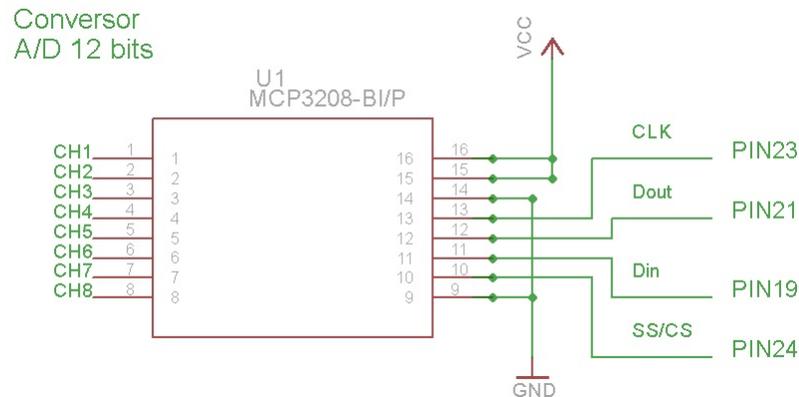


Figura 2.3: Diagrama de conexiones para el convertor Análogo/digital MCP3208b

### 2.1.2 Amperímetro de efecto Hall Allegro ACS712

El amperímetro Allegro ACS712 tiene la particularidad de entregar un voltaje lineal proporcional a la corriente presente en los pines IP+ e IP-. Debido al efecto Hall cuando se aplica una corriente en la placa interna de cobre se genera un campo magnético y una diferencia de voltaje entre los extremos de la placa debido al movimiento de los electrones. La diferencia de voltaje es amplificada de tal manera que pueda ser medida con bajo error, facilitando la medición de la corriente en el sistema. En el caso del chip usado ACS712ELCTR-20A-T nos permite medir hasta 20 Ampere en voltaje continuo o alterno, por lo que dependiendo de la forma de conexión del cableado para un mismo sistema nos puede entregar la misma amplitud de corriente pero con notación positiva o negativa. Su sensibilidad es de 100mW/A y el valor de 0A se da al voltaje  $V_{cc}/2$ .

#### Montaje Allegro ACS712

El esquema de conexiones del amperímetro nos indica que 2 pines deben ser usados para realizar la conexión de entrada del voltaje y otros 2 pines deben ser usados para la salida del voltaje entrante, esto es necesario para eliminar peligros de corte en la entrada o salida del voltaje al chip. Utiliza una alimentación ( $V_{cc}$ ) entre 4.5V y 5.5V. El montaje finalmente usado en el sistema se puede apreciar en la figura 2.4.

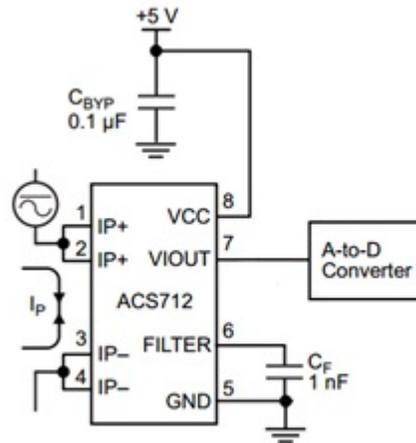


Figura 2.4: Diagrama de conexiones para el amperímetro de efecto Hall Allegro ACS712.

### 2.1.3 Reloj de tiempo real DS1307

Raspberry Pi no cuenta con un reloj interno, por lo que es necesaria la implementación de un reloj de tiempo real externo. El chip DS1307 utiliza el protocolo de comunicación I2C (Inter-Integrated Circuit) [13] para el envío de datos, la que debe ser habilitado de forma manual en Raspberry Pi para poder hacer uso de puertos I2C (Pin 3 y 5). La precisión depende del cristal utilizado, para efectos del proyecto el cristal seleccionado es de 32.7673 kHz y tiene un error de 20ppm (partes por millón), equivalente a 1 minuto por mes.

#### Montaje RTC DS1307

El esquema de conexiones para el reloj de tiempo real DS1307 se aprecia en la figura 2.5. Para mantener almacenada la hora en casos de baja o nula energía en el equipo es necesaria una batería externa, para ello fue utilizada la batería CR2032, la que puede mantener la información almacenada por mas de 8 años. Las resistencias Rpu son de  $10k\Omega$  y la conexión de los pines SDA y SCL se realizan a los pines 3 y 5 respectivamente.

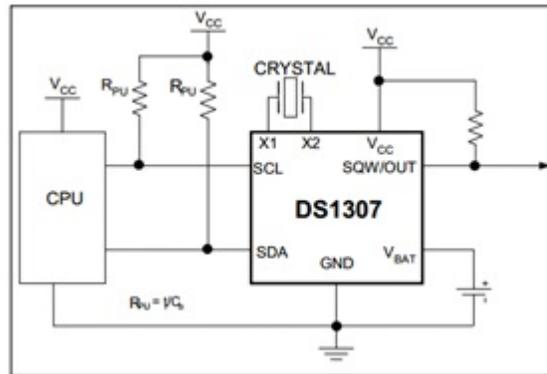


Figura 2.5: Diagrama de conexiones del reloj de tiempo real (RTC) DS1307.

### 2.1.4 Divisor de Tensión

Debido a que el voltaje a medir es mayor que el voltaje máximo del convertor análogo digital se construyó un divisor de tensión haciendo uso de 2 resistencias  $R1=9.18k\Omega$  y  $R2=2.18k\Omega$ , para poder extender el rango de medición de 5V a 25V. El factor de multiplicación fue de 5.21 y se encuentra conectado entre ambas resistencias al convertor análogo/digital.

### 2.1.5 Termistor

El modulo del termistor nos permite conocer la temperatura en la superficie del panel fotovoltaico, dado que la variación de la temperatura entre distintos puntos del panel fotovoltaico no presenta grandes variaciones la temperatura medida se considera homogénea en la superficie. El termistor seleccionado corresponde a la familia NTC (Negative Temperature Coefficient), modelo NXFT15XH103F de  $10k\Omega$  a  $25^{\circ}C$ , el valor de la constante B es 3380. El diagrama de conexiones del termistor se muestra en la figura 2.6.

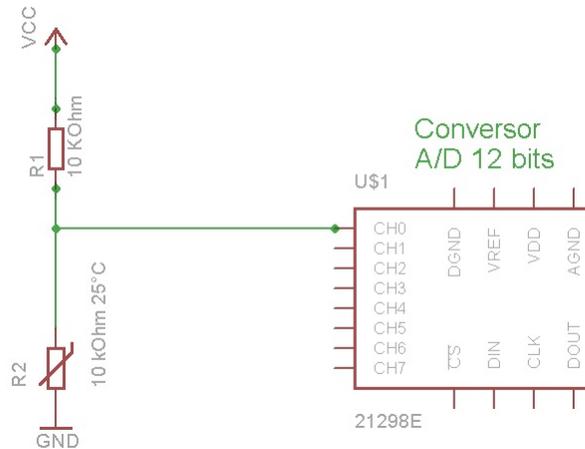


Figura 2.6: Diagrama de conexiones para el termistor NXFT15XH103F.

## 2.2 Construcción de piranómetro

En la construcción de los piranómetros a utilizar en la tesis se seleccionó la construcción de un piranómetro de silicio, dado su bajo costo, facilidad de replicación y construcción.



Figura 2.7: Piranómetro de silicio Kipp & Zonen SP Lite2.

Tal como se aprecia en la figura 2.7 el cuerpo de un piranómetro de silicio consiste en una estructura de aluminio u otro metal contenedor de la electrónica interna en conjunto con un sistema difusor de radiación hecho de teflón, el que es usado para la protección del equipo a la vez que permite el paso de la radiación solar. A nivel interno un fotodiodo en conjunto con un

amplificador operacional permite la medición de la radiación incidente en la superficie del sensor por medio de un voltímetro. La multiplicación del voltaje entregado por el fotodiodo es necesario debido a que la diferencia de voltaje entregada en una escala de medición por debajo del voltímetro o conversor análogo digital utilizado.

Para la construcción del equipo se utilizaron los siguientes materiales:

- Amplificador operacional Texas Instruments TLC2201CP.
- Serie de resistencias de  $1000\Omega$ .
- Placa PCB hecha a medida.
- Fotodiodo OSRAM BPW34.
- Estructura de aluminio.
- Teflón.
- Condensadores de  $33\ \mu F$ .

La estructura de aluminio y teflón fueron recicladas de sensores de radiación ultravioleta en desuso, de modo que la construcción de cada piranómetro se limita principalmente a la electrónica y calibración de su medición (tratado posteriormente en este mismo texto). El circuito electrónico del piranómetro se muestra en la figura 2.8.

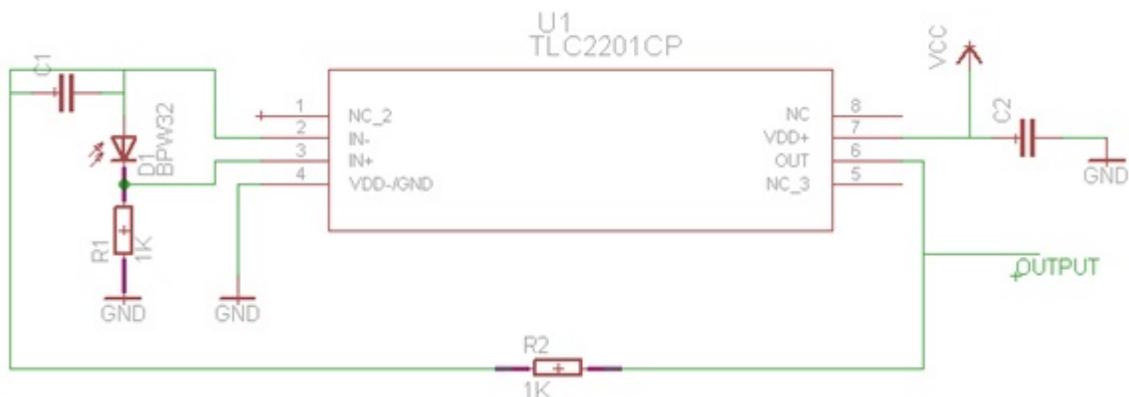


Figura 2.8: Esquema de construcción del circuito integrado en el piranómetro.

Son necesarias 3 conexiones con el equipo, éstas son GND (tierra), Vcc (Alimentación 5V) y OUTPUT. Esta última transmite un valor análogo de voltaje linealmente proporcional a la radiación incidente en la superficie del sensor BPW34, tal como se aprecia en la figura 2.9.

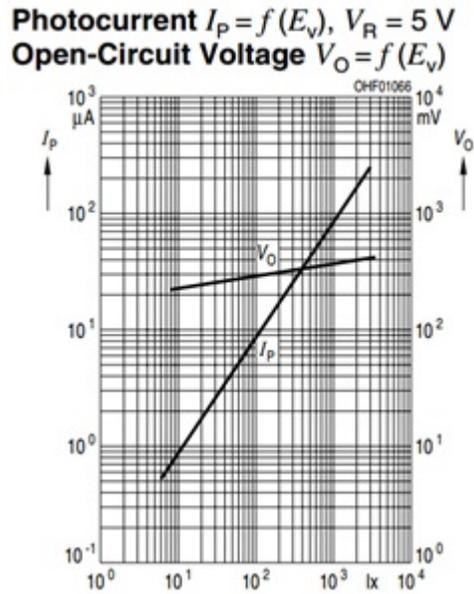


Figura 2.9: Curva de respuesta del fotodiodo BPW34 entre la cantidad de radiación incidente con la corriente y voltaje de salida.

Una vez finalizada la construcción del piranómetro, la electrónica del equipo se muestra en la figura 2.10.

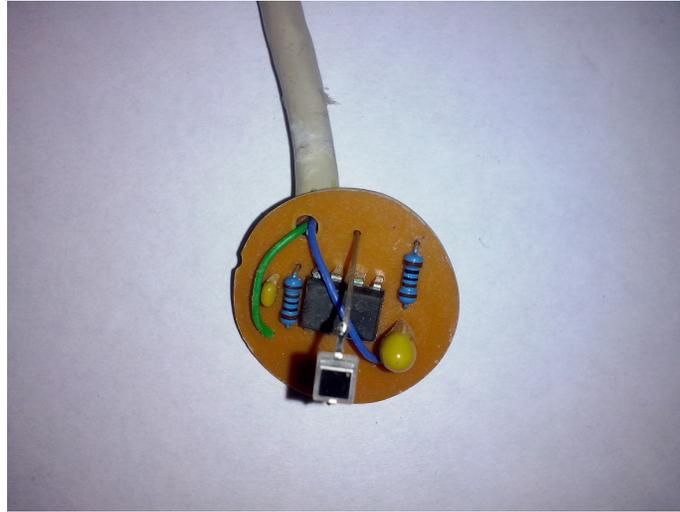


Figura 2.10: Piranómetro finalizado, electrónica del equipo.

El cuerpo del piranómetro finalizado, forma y teflon de protección de aprecia en la figura 2.11.



Figura 2.11: Piranómetro finalizado, visión externa.

### 2.3 Construcción banda de sombra

Para la obtención de la radiación difusa actualmente se disponen de 3 métodos distintos:

1° Seguimiento solar: Una esfera negra que bloquea la radiación directa. Para ello se necesita de un sistema automatizado de seguimiento del sol, con lo que su costo y dificultad de construcción es mayor.

2° Banda fija: Una banda de color negro se coloca a lo largo de la trayectoria del sol desde la referencia del piranómetro usado. Dado que la franja se encuentra en una posición fija su posición debe ser ajustada cada 2 o 3 días, si no, la radiación directa incidirá en el sensor.

3° Banda rotatoria: Una banda acoplada a un sistema mecánico en conjunto a un piranómetro, cada cierto momento la banda se mueve a la posición solar con el fin de medir la radiación difusa. El mayor beneficio de este método es el uso de un único piranómetro para la medición de radiación global y difusa, disminuyendo el uso de sensores.

Con el fin de poder medir la radiación difusa en el Departamento de Física fue analizado cada uno de los métodos nombrados previamente, eligiéndose la simplicidad del sistema de banda fija debido al bajo costo implícito, no es necesario el control de sistemas motorizados, de fácil mantención y reparación en caso de falla.

Sus principales puntos en contra corresponden a la necesidad de limpieza de la cúpula de teflón cada 2 días y el uso de un factor de corrección variable a lo largo del tiempo, debido a que la franja negra cubre sectores fuera de la posición del sol existen distintos modelos para determinar la radiación perdida, dependiendo del diseño de la banda de sombra.

En la actualidad se destacan 2 modelos dentro de la construcción de la banda de sombra. La diferencia de éstos radica en el punto móvil del sistema, mientras en el primero de ellos el sensor se encuentra fijo y la banda debe moverse para bloquear el sol, en el segundo la banda se encuentra en una posición fija y el sensor cambia de posición a medida que el sol cambia su trayectoria (desde el punto de vista del sensor). Estos 2 modelos son visibles en la figura 2.12:

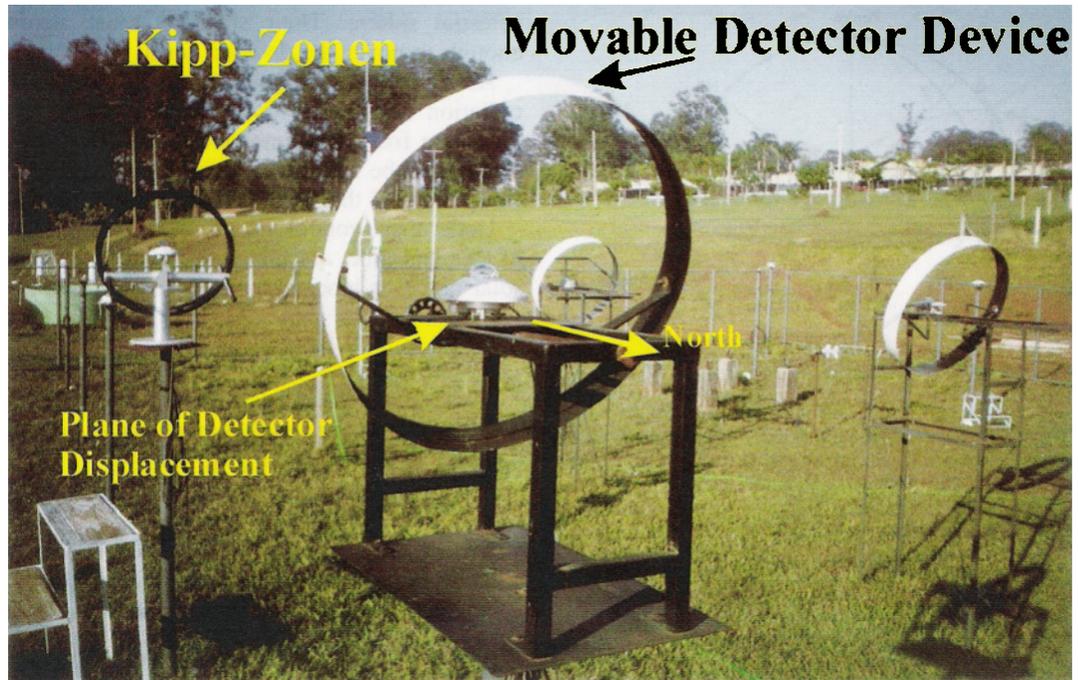


Figura 2.12: Sistema de banda de sombra movil (modelo Kipp & Zonen) junto al modelo de sensor móvil.

Para la construcción de banda de sombra fue seleccionado el sistema de sensor móvil, junto al factor de corrección calculado por Oliveira et al [14]. Para ello fue construida una banda de aluminio de 92 cm con 2 perforaciones que serán puntos móviles de la banda a una distancia de 89.5 cm y un grosor de 7.5 cm. La distancia entre las bases de la banda (y puntos móviles) es de 57,2 cm. La banda de sombra construida se aprecia en la figura 2.13, cumpliéndose que el largo de la banda sea pi veces el radio de la esfera, ésta fue instalada en un único ángulo de  $56^\circ$  respecto a la superficie, ángulo de la trayectoria del sol desde el punto de referencia de la instalación.



Figura 2.13: Banda de sombra y un riel para variar la posición del piranómetro.

El piranómetro fue instalado sobre un sistema de rieles, de tal forma que este pueda variar su posición de forma rápida sin afectar las mediciones. El rango de movimiento permitido por el riel es de 28 cm, encontrándose el punto cero del sistema en medio del riel. Para determinar la posición adecuada del sensor a lo largo del año se programó en Matlab un código que en base a las variables de posición del lugar es posible calcular la trayectoria solar desde el punto de referencia indicado y para la fecha solicitada, asegurando un correcto funcionamiento de la banda y la filtración de la componente de radiación directa incidente en el sensor.

Fruto del análisis de los datos obtenidos se determinó que la medición de radiación difusa no es válida, debido a la diferencia de la radiación incidente en el sensor en días nublados y soleados.

## 2.4 Calibración piranómetros

Para la calibración de la serie de 3 piranómetros construidos fue utilizado como referencia el piranómetro construido por el Dr. Ernesto Gramsch en el año 2007, y calibrado con un piranómetro perteneciente al ministerio del Medio Ambiente, instalado en INIA La Platina, en la comuna de La Pintana. A pesar de no ser recalibrado en algo más de 7 años (Piranómetros de segunda clase deben ser calibrados cada 2 años para validar sus resultados) fue utilizado en un inicio como punto de referencia en la construcción y análisis de los resultados obtenidos por los equipos

fabricados en la realización de esta tesis.

Para una serie de mediciones realizadas de radiación global entre los días 16 de julio de 2014 y 23 de julio de 2014 se encontró un factor de corrección a través de la minimización del error en el método de mínimos cuadrados para cada uno de los piranómetros usados, siendo estos:

- Piranómetro 1: 250
- Piranómetro 2: 230
- Piranómetro 3: 340

Ahora, se procede a analizar distintos casos de radiación observados en el intervalo de tiempo elegido (los datos obtenidos han sido recalibrados en base a los datos facilitados por el Dr. Rodrigo Escobar, académico de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Esta recalibración será tratada en el próximo punto).

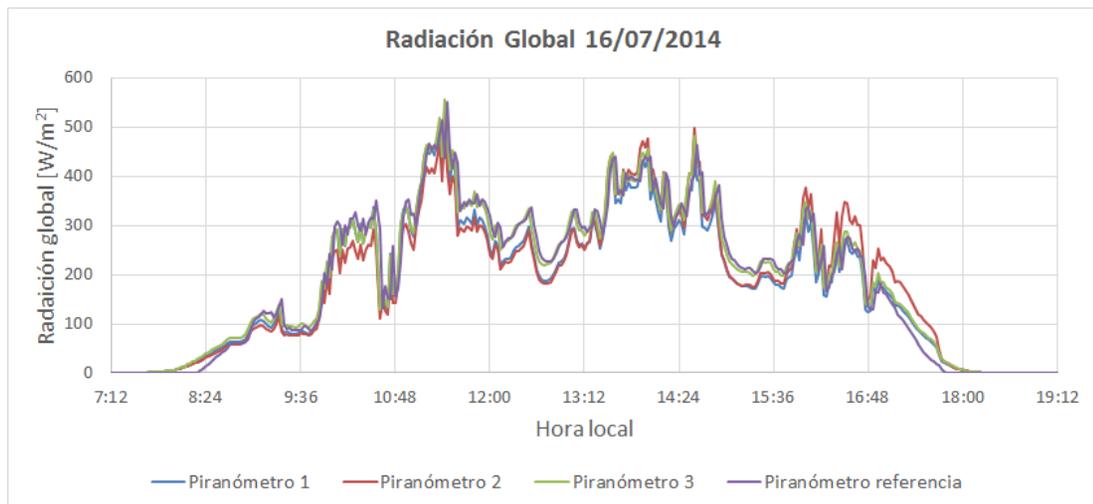


Figura 2.14: Radiación global medida el 16 de julio de 2014 por los piranómetros fabricados y el piranómetro de referencia en el techo del Departamento de Física USACH.

Para el día 16 de julio del 2014 hubo nubosidad parcial según el Servicio Meteorológico de Chile, por lo que la radiación global medida por los distintos piranómetros (figura 2.14) vario en base al movimiento de las nubes y como opacaban al sol. En la forma de la curva se aprecia que el piranómetro 2 tiene un menor valor al inicio del día, mientras que a medida que el día se acerca

a la puesta de sol presenta mayores valores de radiación medida que el resto de los piranómetros. Los piranómetros 1 y 3 tienen un valor más cercano al valor de referencia.

El día 17 de julio del 2014 fue un día despejado, con una baja presencia de nubosidad a lo largo del día, por lo que se pueden contrastar las mediciones y observar la deformación de la medición del piranómetro 2 de forma directa.

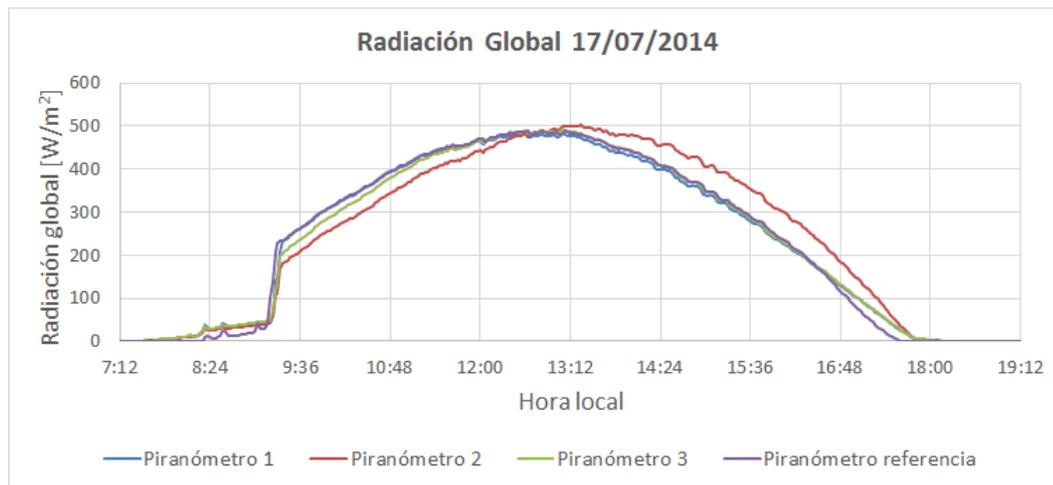


Figura 2.15: Radiación global medida el 17 de julio de 2014 por los piranómetros fabricados y el piranómetro de referencia en el techo del Departamento de Física USACH.

Como se aprecia en la figura 2.15 al inicio del día el salto en la radiación medida se debe a la presencia de los árboles en las inmediaciones del lugar, bloqueando la radiación directa hasta aproximadamente las 9.20 hrs. En este día se aprecia mejor el desfase del piranómetro 2 en comparación a las mediciones de los otros piranómetros, por lo que queda descartado su uso para el resto de la tesis. Este error en la medición se debe principalmente a 2 factores:

1° - Posición del fotodiodo: El fotodiodo queda en una posición con inclinación en algún eje fuera de la horizontal, por lo que se percibe mayor radiación en el momento que el sol se encuentra en una posición ortogonal a la superficie del fotodiodo.

2° - Geometría del difusor: El difusor de teflón en cada uno de los piranómetros fabricados es levemente diferente, con una forma ovalada. Esto permite que la radiación entre de distinta forma con menor modificación a cada sensor, y explica las diferencias entre el piranómetro 1 y 3.

La diferencia entre el piranómetro 2 y el piranómetro de referencia se aprecia de mejor manera en la figura 2.16, en donde se dividen los valores obtenidos por el piranómetro 1, 2 y 3. El piranómetro 2 se observa claramente desviado hacia el oeste en el plano cardinal, mientras que las mediciones de los piranómetros 1 y 3 tienen una respuesta a la radiación similar en la mayor parte del día. Las diferencias de medición en los extremos se pueden deber a condiciones geométricas impuestas en la construcción de cada uno de los piranómetros.

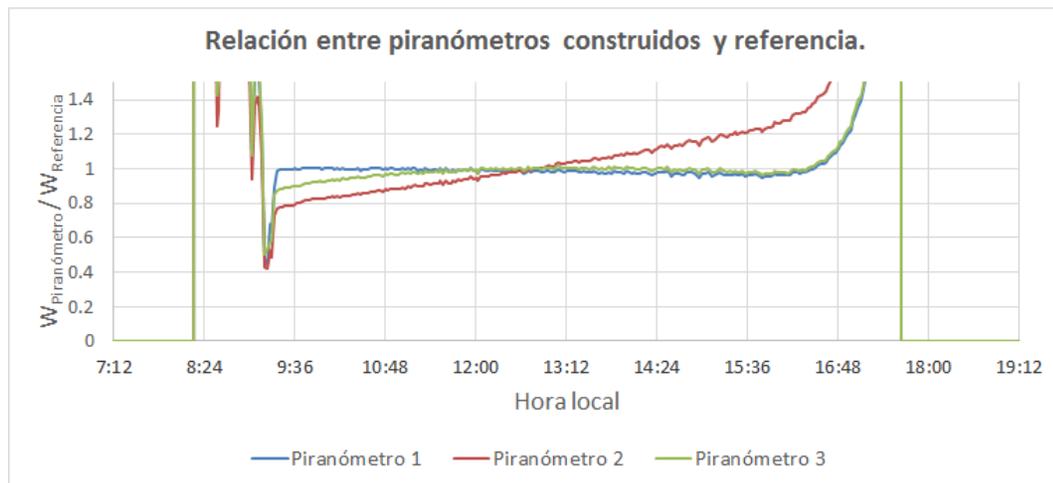


Figura 2.16: Gráfica de la división de los valores obtenidos por cada uno de los piranómetros construidos respecto al piranómetro de referencia. Se aprecia claramente como el piranómetro 2 (rojo) se encuentra desviado del plazo horizontal.

El día 23 de julio del 2014 se compara la variación de un día con nubosidad parcial a lo largo de la mañana a un día nublado. La radiación global medida por los distintos piranómetros se aprecia en la figura 2.17.

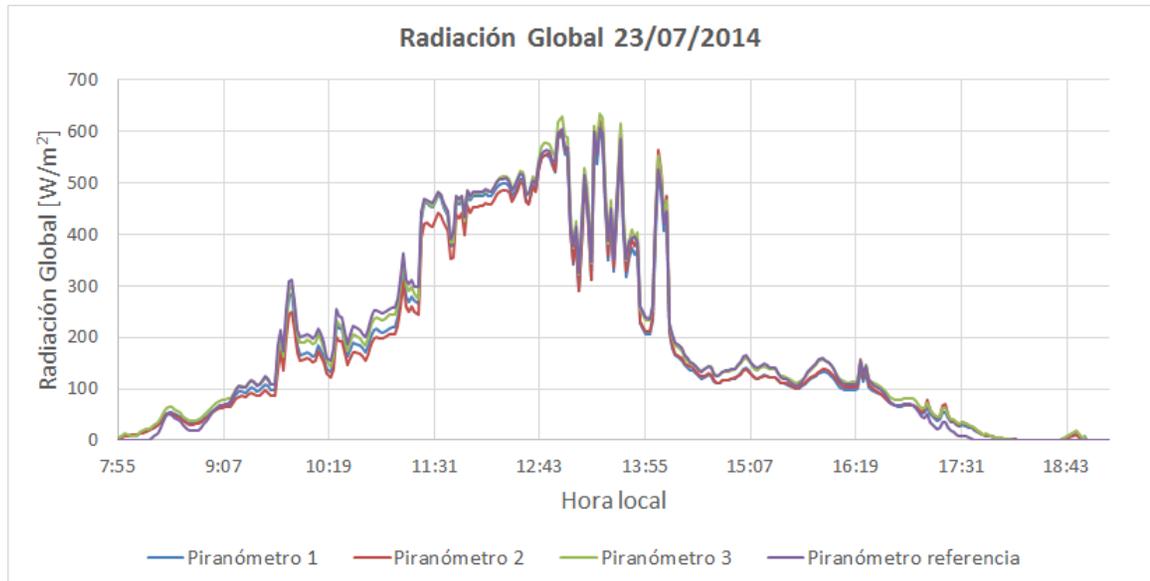


Figura 2.17: Radiación global medida en el techo del Departamento de Física USACH por los piranómetros fabricados y de referencia, correspondiente al 23 de julio del 2014.

En este último caso es posible apreciar la buena respuesta de los piranómetros fabricados ante la presencia de días nublados. El piranómetro 2 es desechado y se procede a trabajar con el piranómetro 1 para la medición de radiación difusa y con el piranómetro 3 (el de mejores resultados) para la medición de radiación global horizontal.

## 2.5 Calibración radiación difusa y global

Debido que el piranómetro utilizado en primera instancia no fue recalibrado en más de 7 años se solicitó al Dr. Rodrigo Escobar (Investigador dedicado al estudio de la radiación solar en Chile) datos de radiación solar global, directa y difusa medidos en el campus San Joaquín de la Pontificia Universidad Católica de Chile. Los equipos en la estación UC corresponden a piranómetros Kipp & Zonen CMP22, pirheliómetro CHP1, seguidor solar SOLYS 2 y pirgeómetro CGR4, calibrados previamente y con un error de 2%.

Al analizar los datos se encontró un desfase notorio entre las mediciones realizadas previamente y las mediciones realizadas por los piranómetros construidos. Las muestras de análisis corresponde a mediciones realizadas en la estación solar UC en el Campus San Joaquín, entre el 27 de septiembre y el 3 de octubre del 2014.

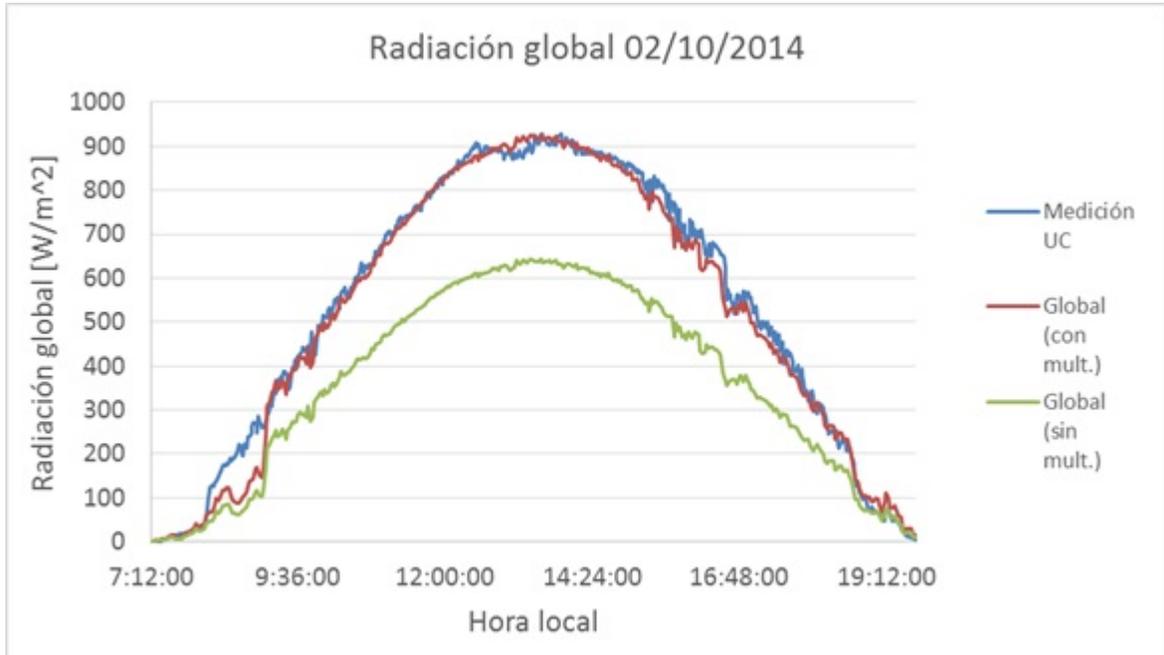


Figura 2.18: Radiación global medida en la estación UC San Joaquín (azul), medida por el sensor fabricado (verde) y medida por el sensor y recalibrado (rojo).

Tal como se aprecia en la figura 2.18, la diferencia entre las mediciones corresponde a un 30%. Al analizar los datos de la semana se determina que el multiplicador adecuado para recalibrar la medición es de 1.44, con ello el error de nuestro sensor en comparación al piranómetro CMP22 es de un 5%.

La calibración del sistema de radiación difusa fue un tanto distinta a la radiación global.

Al comparar la radiación difusa en un día soleado versus un día nublado, el multiplicador necesario para igualar las mediciones presenta distintos valores entre 1.44 (día soleado) y 1.87 (día nublado). Aparecen algunos valores intermedios en ciertos días, pero la variación entre los valores extremos fue la moda.

Como se puede apreciar en la Figura 2.19, la variación del multiplicador se da dentro de un mismo día. El 30 de septiembre estuvo nublado durante la mañana y al mediodía paso a nubosidad parcial. Al despejarse el valor del multiplicador bajó, fenómeno que se puede dar debido a 2 principales razones:

1° - Geometría del sensor: Tal como se trató en el punto de calibración, la geometría del difusor o el ángulo respecto a la horizontal del sensor influyen en gran parte de la medición final.

2° - Banda de sombreado: Una banda de sombreado puede traer mayores problemas de medición debido al comportamiento isotrópico de la radiación difusa en un día soleado en comparación con un día nublado.

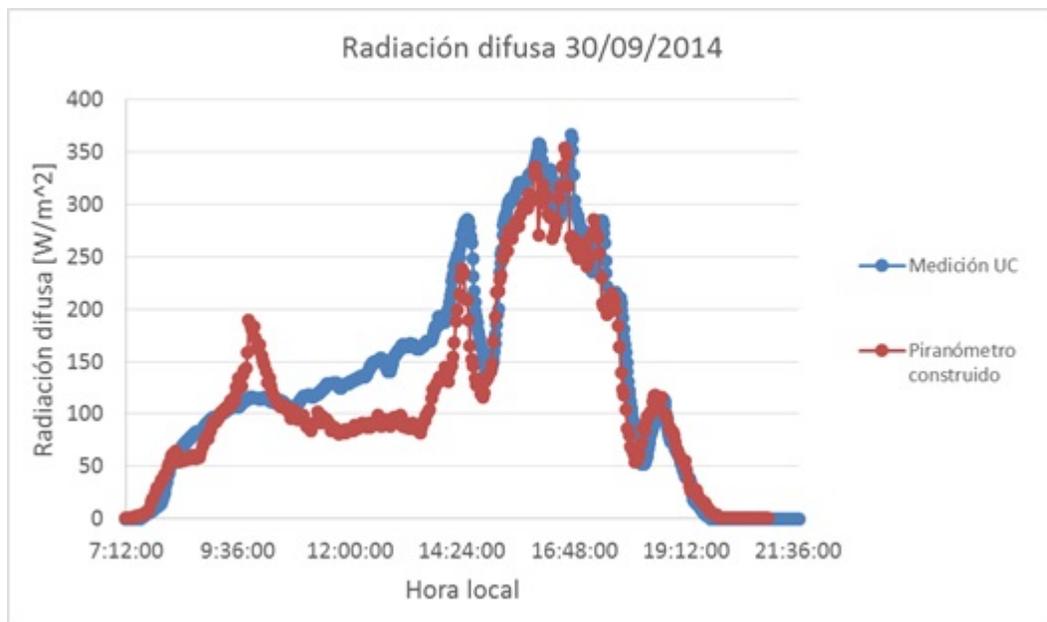


Figura 2.19: Radiación difusa medida en la estación UC San Joaquín (Azul) y por el piranómetro fabricado (rojo). La diferencia en el multiplicador es notoria cuando esta nublado en comparación con un día soleado.

Para comprobar o desestimar alguno de estos posibles errores se solicitó una segunda semana de mediciones de la estación solar UC San Joaquín, entre el 20 al 26 de octubre de 2014, solo para confirmar que se repite este fenómeno. Debido a que en distintos días se observó el mismo problema a pesar del cambio en la posición del sol, se descarta el piranómetro de radiación difusa como muestra válida.

## 2.6 Consideraciones sobre termistor NXFT15XH103F

Usualmente para el cálculo de la temperatura en base a un termistor tipo NTC se utiliza la ecuación de Steinhart-Hart [15] para la relación entre la resistencia del termistor y la temperatura del sistema. Según las características del termistor utilizado el valor de B corresponde a 3380 para el intervalo de temperaturas entre  $25^{\circ}\text{C}$  y  $50^{\circ}\text{C}$ , éste varía levemente si se espera analizar un intervalo de temperatura mayor. Al considerar la temperatura medida en comparación a la temperatura entregada por la ecuación de Steinhart-Hart y la relación entregada por el fabricante entre resistencia y temperatura se encontró que ésta última fue más precisa que el modelo propuesto. En base a estos resultados, fue modelada matemáticamente la relación resistencia-temperatura entregada por el fabricante, por lo que la ecuación usada para la medición es (en grados celcius):

$$T = 720,3R_{th}^{-0,1533} - 150,6 \quad (2.1)$$

Esta ecuación asegura un error de  $0,2^{\circ}\text{C}$  al momento de la medición de la temperatura, por lo que es el modelo utilizado a lo largo de las mediciones realizadas en ésta tesis.

## 2.7 Calibración mediciones de Voltaje y Corriente

Al realizar una serie de mediciones de voltaje a una serie de baterías de distintos voltajes y a distintas cargas haciendo uso del divisor de voltajes y un multímetro se encontró un error de un 2% en las mediciones realizadas. Este porcentaje de error puede ser debido a la distinta carga de las baterías, el consumo de corriente del divisor de voltajes u otros factores. Mientras tanto no se había podido probar fehacientemente el funcionamiento del amperímetro de efecto Hall ACS712, por la falta de una fuente de alta corriente para la realización de pruebas y la validación del sistema de voltaje, la medición en condiciones reales de funcionamiento del panel es necesaria para validar las mediciones realizadas.

En la figura 2.20 se observan las mediciones de voltaje y corriente, para ello fueron utilizados 2 multímetros (UNI-T UT60A y Fluke 79III), el divisor de voltaje y el amperímetro de efecto Hall. Las mediciones fueron realizadas el 13 de agosto de 2014:

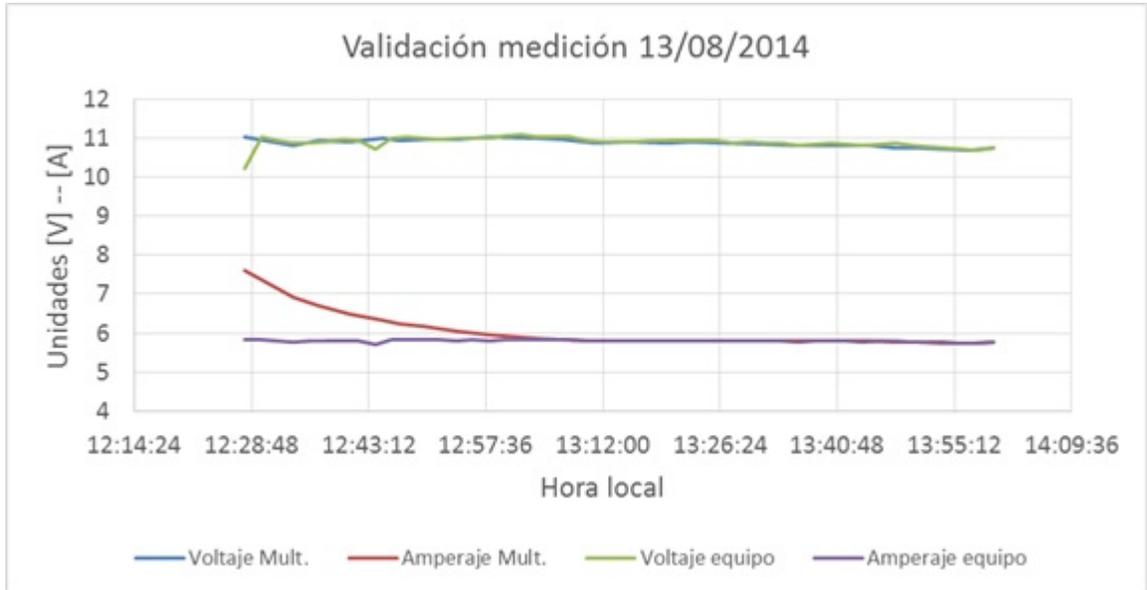


Figura 2.20: Medición de voltaje y corriente realizada al panel fotovoltaico en un día soleado. 'Mult.' referencia a mediciones con multímetro y 'equipo' al divisor de voltaje junto al amperímetro de efecto Hall.

Las mediciones realizadas con el divisor de voltaje se ajustan con un bajo nivel de error con las mediciones realizadas por el multímetro, en cambio, las mediciones realizadas por el amperímetro de efecto Hall resultan ser constantes a lo largo del tiempo, en comparación a la medición de corriente del multímetro, que inicia en un valor alto y necesita de media hora de medición para llegar a un valor constante.

Al analizar el error de las mediciones realizadas se considera 2 casos para la medición de amperaje: medición total y medición entre 13 y 14 hrs. Esta última se debe a que después de las 13 hrs. la medición de corriente con el multímetro alcanza un punto estable. Para el cálculo de errores se utilizaron los métodos de error cuadrático medio (MSE) y porcentaje de error medio absoluto (MeAPE). Los resultados obtenidos se aprecian en la tabla 2.1.

	Divisor tensión	Efecto Hall	Efecto Hall estable
MeAPE	0,70 %	4,42 %	0,13 %
MSE	0,0272	0,2521	0,0001

Tabla 2.1: Error cuadrático medio y porcentaje de error medio absoluto para las mediciones de voltaje (divisor tensión) y corriente (Efecto Hall).

De los resultados obtenidos se aprecia claramente el bajo error de la medición de voltaje, con un MeAPE de solo 0.7% a lo largo de la hora y media de análisis, al contrario que las mediciones de corriente en donde al analizar la medición en su totalidad el MeAPE obtenido corresponde a 4.42%. El problema de esta medición es el uso del multímetro y la variación a lo largo del tiempo, por lo que considerando sólo el intervalo 'estable' en que la medición es constante el MeAPE obtenido disminuye a 0.13%, validando la medición de corriente. El error obtenido en el intervalo estable depende en mayor proporción a la conversión análogo-digital realizada por el chip integrado MCP3208b.

## 2.8 Montaje Experimental

Con el objetivo de medir el voltaje, corriente y temperatura del panel fotovoltaico, fue instalado en el techo del Departamento de Física un panel Sunmodule SW 140 poly/R6A, con una potencia máxima de 140W bajo condiciones standard (STC\*), con un voltaje de 18,1V y corriente de 7,76A en dicho punto. El área del panel fotovoltaico es de 1.09 m<sup>2</sup> por lo que su eficiencia a 25°C es de 13.65%. Bajo condiciones NOCT (temperatura ambiente 20°C, radiación incidente de 800  $\frac{W}{m^2}$ ) el panel alcanza una temperatura de 46°C y una eficiencia corresponde a 12.59%. El panel fue montado en una estructura de aluminio con un sistema de desplazamiento para variar el ángulo entre 15° a 50° en intervalos de 5°, además de la posición horizontal, con el fin de analizar la potencia de salida bajo distintas condiciones y realizar un seguimiento al ángulo variable del sol durante el año.

Para disipar la energía generada por el panel fueron usadas resistencias de alta potencia en arreglos seriales y paralelos con el fin de tener distintas resistencias de salida. Para su funcionamiento diario fueron utilizadas 21 resistencias de 10W 1  $\Omega$  y 10% de error en un arreglo de 3 series paralelas de 7 resistencias de 1  $\Omega$ , obteniendo una resistencia de  $2,2\Omega \pm 0,1\Omega$ .

Para el cableado de salida del panel fueron utilizadas 2 opciones: Cable AWG18 y AWG12. El cable AWG18 (área de  $0.823 \text{ mm}^2$ ) fue utilizado al inicio del proyecto como uno de los componentes a mano. A finales de enero y ya con claras observaciones de que no ser la mejor opción, fue reemplazado por cable AWG12 (área de  $3.31 \text{ mm}^2$ ), además de acortar el largo del cable utilizado. Con ello la potencia en las resistencias aumento considerablemente, debido al descenso en la resistencia del cable conductor ( $R_{AWG18} = 1,09\Omega$ ,  $R_{AWG12} = 0,127\Omega$ ).

El esquema del montaje utilizado se aprecia en la figura 2.21:

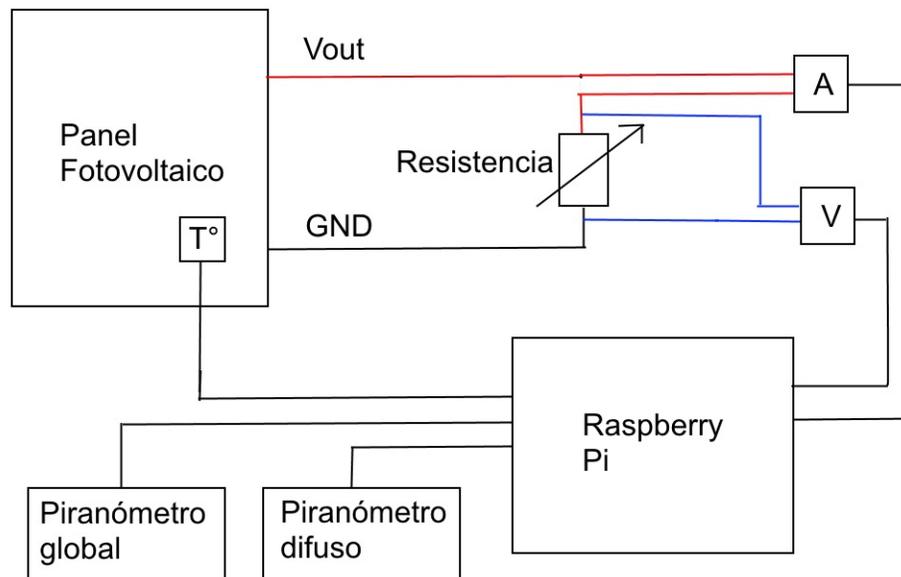


Figura 2.21: Esquema del equipo de medición de parámetros solares instalado en el techo del Departamento de Física USACH.

Los piranómetros fueron instalados en la plataforma metálica presente en el techo del Departamento de Física de la Universidad de Santiago de Chile, con el fin de minimizar la incidencia de sombras externas en el montaje. La banda de sombra fue instalada de tal manera que el riel de movimiento del sensor se mueva en sentido norte/sur apuntando hacia el norte.

El montaje final, ya instalado, se aprecia en la figura 2.22.

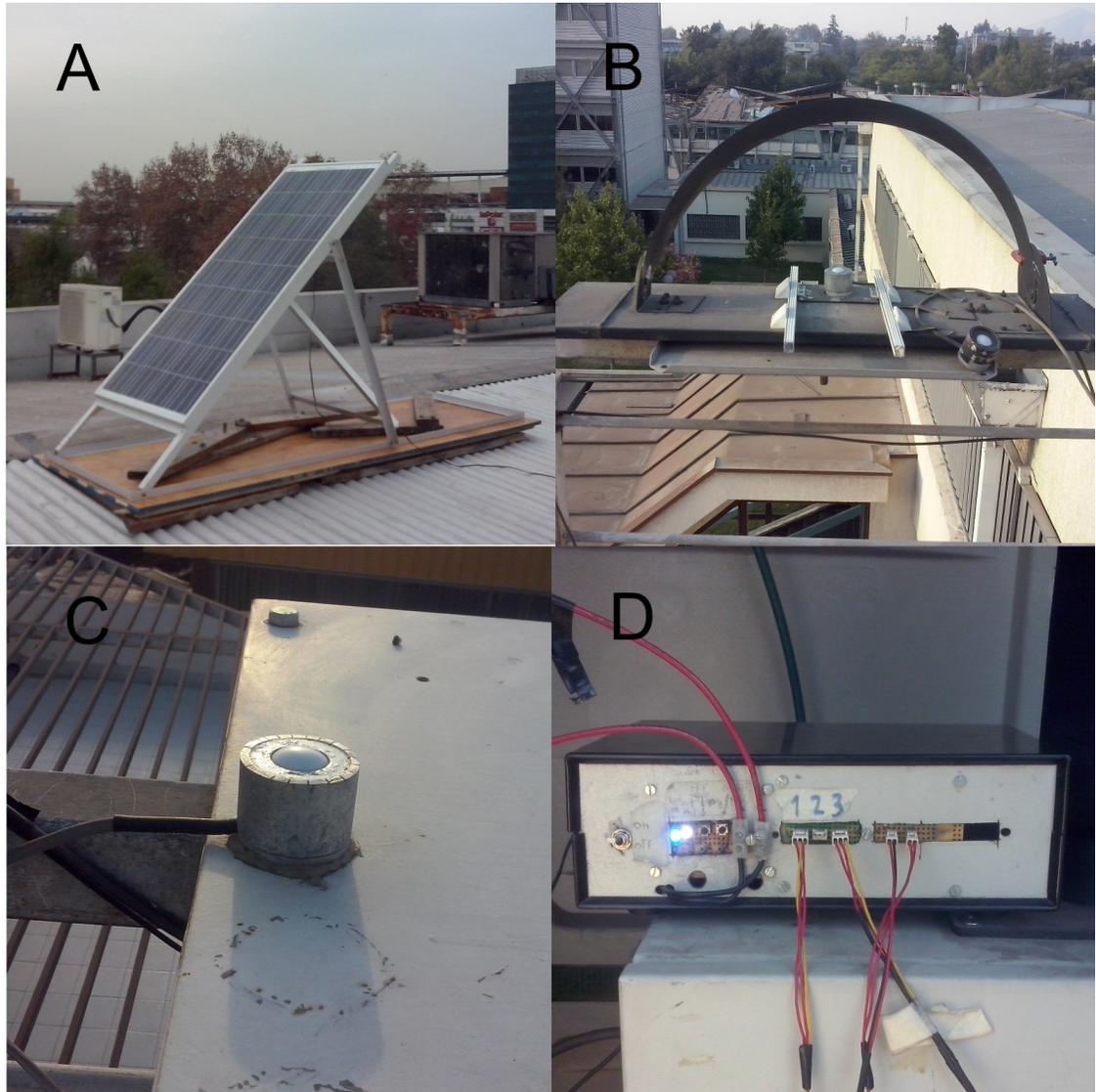


Figura 2.22: Montaje de los equipos utilizados: A - Panel solar, B - Piranómetro y banda de sombra, C - Piranómetro, D - Equipo adquisición de datos.

## **Capítulo 3**

# **Implementación y medición**

## 3.1 Implementaciones de Código

A lo largo de este capítulo se tratarán las distintas implementaciones de código realizadas para la operación de los equipos. Estos han sido escritos en distintos lenguajes según la facilidad o nivel de necesidad. Python y Matlab fueron los lenguajes más utilizados, sin contar que para la implementación de algunas funciones en Raspberry Pi fue necesario escribir directamente código en shell y la modificación de archivos. Los códigos utilizados se puede encontrar en el Anexo B.

### 3.1.1 Conversor análogo/digital MCP3208b

Para el uso del conversor análogo/digital (vital en todo tipo de mediciones de voltaje) fue necesario el uso del protocolo SPI [13] de comunicación. Tal como detallamos en el Capítulo 2 son necesarios 4 pines para comunicarse con un equipo o chip que utilice este protocolo (CS,SCLK,MISO,MOSI) y es de vital importancia enviar la información correcta a cada pin del conversor A/D y a su vez poder leer la respuesta del chip A/D.

Para poder leer un voltaje del conversor A/D es necesario:

- Levantar el pin CS para que el chip MCP3208 pueda enviar/recibir información.
- Hacer uso del pin SCLK para determinar cuando se envía/recibe un bit de información.
- Enviar un tren de bits por medio del pin MOSI para que pueda ser recibido por el chip (en sincronización con el pin SCLK).
- Leer el tren de bits enviado por el chip MCP3208 en respuesta para su decodificación e interpretación.
- Bajar el pin CS para que el chip deje de enviar/recibir información.

El protocolo de funcionamiento del MCP3208 necesita a lo menos de 19 bits para poder funcionar, tal como se aprecia en la figura 3.1 se necesita enviar un bit 1 de inicio/start para iniciar la conversión A/D seguido de un bit 1 para confirmar la orden. Los bits D2, D1 y D0 corresponden al canal solicitado por el A/D, los que corresponden del 0 al 7. En respuesta el chip manda un bit nulo (0) y procede a enviar en 12 bits el voltaje medido. Se debe considerar que el chip tiene un voltaje de referencia para la medición, y que el voltaje medido depende de dicho voltaje de forma lineal ( $4095 = V_{ref}$ ,  $0 = 0V$ ).

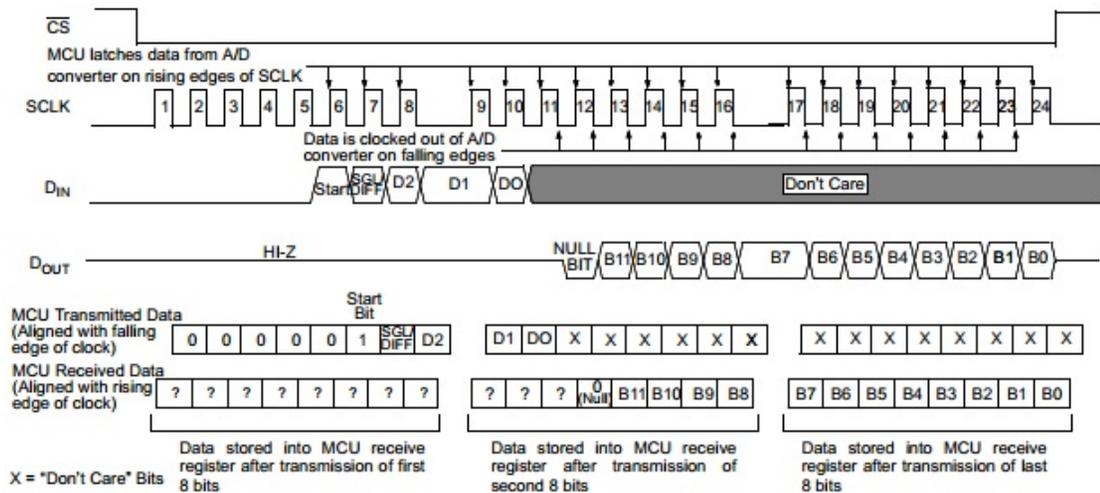


Figura 3.1: Protocolo de comunicación del chip integrado MCP3208b con otros equipos, basado en SPI.

Las instrucciones necesarias para operar al conversor análogo/digital fueron programadas en el lenguaje Python.

### 3.1.2 Medición en tiempo real

Una vez finalizados los sensores necesarios para la medición de voltaje, corriente, radiación y temperatura a nivel electrónico fue necesaria su implementación a nivel de código. Para ello se determinó primero un intervalo de tiempo de 2 minutos en el que se almacenara el promedio de todas las mediciones realizadas, a modo de compatibilidad con la estación meteorológica presente en el Departamento de Física. Se realizan 10 mediciones de cada uno de las variables a medir cada 0.5 segundos con el objetivo de minimizar el error en las mediciones y cada 2 minutos es almacenado en archivo de texto el promedio de las mediciones. Las mediciones son almacenadas por día en un archivo de texto plano con extensión ".dat"siguiendo el formato DD-MM-AAAA.dat.

Para determinar si el sistema está realizando mediciones se ha implementado ayuda visual a través de luces led que indican si hay energía y el estado de las mediciones en el equipo. Junto con ello fueron implementados 2 botones para interactuar con el equipo. El primero de ellos permite detener o reiniciar las mediciones mientras que el segundo es un botón de reinicio seguro del equipo, debido a que Raspberry Pi no tiene botón de apagado, por lo que se se realiza por

software.

A grosso modo, la implementación del código está explicado en el diagrama de la figura 3.2.

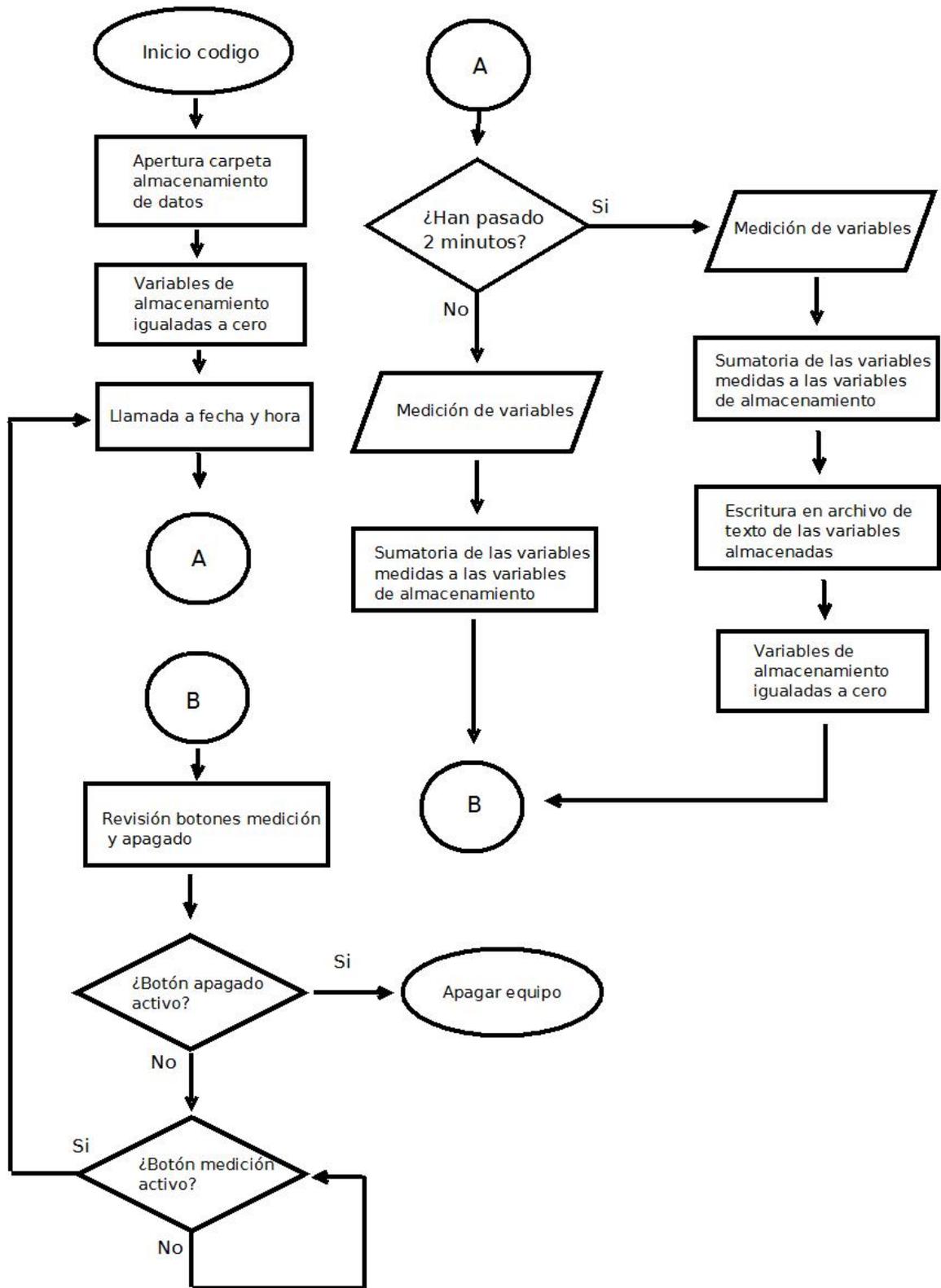


Figura 3.2: Diagrama de flujo del código utilizado para la adquisición y almacenamiento de datos en el equipo construido

El código escrito fue programado para iniciar automáticamente cuando el equipo es encendido, en el caso de corte de la alimentación del equipo el código vuelve inmediatamente a su operación. Para apagar el equipo es recomendable detener las mediciones, con el fin de no cortar un proceso crítico como la escritura del archivo de texto, lo que podría generar daños en el archivo y perder la información correspondiente al día de medición.

### **3.1.3 Posición del piranómetro bajo la banda de sombra**

Para determinar el Cenit y Azimut de la posición del sol en cualquier momento del día fue utilizada la librería "sun\_position.m" en Matlab, basada en el reporte técnico de algoritmos de posición solar para aplicaciones de radiación solar, realizado por NREL [16]. Para su uso es necesario conocer la hora del lugar, tiempo respecto al meridiano de Greenwich, latitud, longitud y altura respecto al mar.

Dado que el almacenamiento de los datos de radiación adquiridos es cada 2 minutos, fue programado un código que cumpliera las siguientes funciones:

- Parámetros de entrada: Día, mes y año en formato DD-MM-AAAA, radiación global, latitud, longitud, altura sobre el nivel del mar.
- Calcula cenit y azimut por medio de las librerías cada 2 minutos, específicamente a la mitad del intervalo de medición para el día seleccionado.
- Calcula la representación del cenit y azimut en coordenadas cartesianas y gráfica sólo la componente en  $\hat{x}$  (dirección Norte) y  $\hat{z}$  (Ortogonal al plano superficie).
- En base a que la banda cumple la proporción de perímetro  $\pi r$  para un medio círculo se calcula la posición del sensor para bloquear la radiación directa del sol.

Este cálculo debe ser realizado cada 2 o 3 días ya que debido al movimiento de rotación y traslación de la tierra en dicho intervalo de tiempo ha cambiado la posición aparente del sol a tal punto que no es bloqueada por la banda de sombra.

### **3.1.4 Radiación incidente en una superficie inclinada a lo largo del día**

La idea detrás de este algoritmo es ser usado como un subproceso de las mediciones, debido a que por el modelo BRL para el cálculo de la radiación difusa y directa es necesario tener los datos de radiación del día en su totalidad y no se puede calcular en tiempo real debido al

posible error generado por los parámetros de persistencia e índice de claridad diario. Puede ser implementado en su totalidad en Python para su operación en el equipo, pero por comodidad éste fue implementado en Matlab para análisis posteriores.

Siguiendo la línea del cálculo de posición del sol es necesario encontrar el ángulo que se produce entre el vector solar y el vector ortonormal a la superficie del panel fotovoltaico en el tiempo medio del promedio de la medición realizada, para determinar la radiación directa incidente en el panel fotovoltaico.

Debido a que sólo disponemos de la medición de radiación global, se aplica el modelo BRL para el cálculo de la radiación difusa, y en base a la diferencia de radiación global y difusa junto al ángulo entre el vector solar y la ortonormal al panel determinar la radiación directa. Respecto al índice de claridad se hicieron 2 variaciones: cálculo original horario de la radiación y cálculo cada 2 minutos de la radiación, esta última ajustándose a nuestro intervalo de tiempo en las mediciones.

El algoritmo cumple los siguientes pasos en su cálculo:

- Parámetros de entrada: Día, mes y año en formato DD-MM-AAAA, radiación global, latitud, longitud, altura sobre el nivel del mar, ángulo de inclinación del panel.
- Cálculo del cenit y azimut a lo largo del día cada 2 minutos.
- Determinación del vector solar.
- Cálculo del ángulo entre el vector solar y el vector ortonormal a la superficie del panel
- Cálculo de la radiación extraterrestre, índice de claridad cada 2 minutos y diario, tiempo solar aparente, ángulo de altitud solar y persistencia para cada una de las muestras.
- Implementación del modelo BRL, cálculo de la radiación difusa y directa en un plano horizontal.
- Aplicación del modelo de Klucker para el cálculo de la radiación difusa en plano inclinado.
- Aplicación del modelo isotrópico para el cálculo de la radiación de Albedo. Multiplicación de la radiación directa por el coseno del ángulo entre el vector solar y el vector ortonormal.
- Suma de los valores de radiación directa, difusa y albedo en plano inclinado.

- Escritura de los datos en un archivo con formato Excel.

## 3.2 Medición

### 3.2.1 Curva de caracterización V-I en condiciones reales

La curva de caracterización de un panel fotovoltaico corresponde a la relación entre voltaje y corriente para condiciones STC, tales como a temperatura constante ( $25^{\circ}$ ) y radiación incidente de  $1000 \frac{W}{m^2}$ . En condiciones reales la temperatura varía en base a la temperatura ambiente, viento incidente en el panel, corriente de salida y radiación incidente en el panel, por lo que la respuesta difiere de la entregada por el fabricante.

Para su caracterización fueron realizadas 2 series de medición con el panel fotovoltaico a una inclinación de  $20^{\circ}$  y  $0^{\circ}$ . Este último impide corrientes de aire en la cara inferior del panel fotovoltaico, por lo que la temperatura aumenta pero produce mayor estabilidad en las mediciones. Fue utilizado un set de resistencias de alta potencia de,  $0,125\Omega$ ,  $0,5\Omega$ ,  $1\Omega$ ,  $1,2\Omega$ ,  $1,5\Omega$ ,  $2\Omega$ ,  $2,2\Omega$ ,  $3\Omega$ ,  $4\Omega$ ,  $8\Omega$  y  $100\Omega$  con el fin de obtener distintos puntos de voltaje y corriente a lo largo de la curva.

Los resultados obtenidos se aprecian en la figura 3.3 para una radiación incidente de  $500 \frac{W}{m^2}$  y en la figura ?? considerando una radiación incidente de  $1000 \frac{W}{m^2}$ .

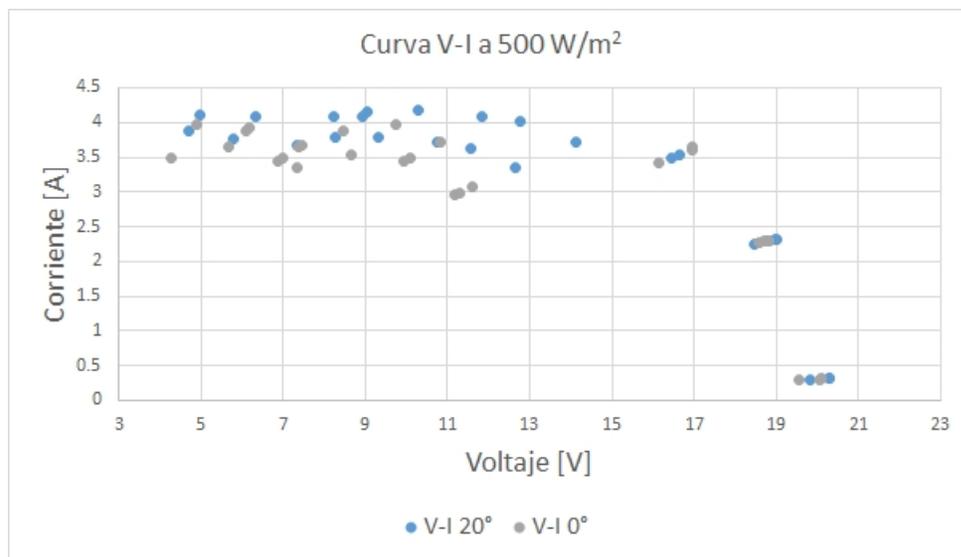


Figura 3.3: Curva de caracterización del panel fotovoltaico, ángulo de inclinación del panel de  $0^{\circ}$  (gris) y  $20^{\circ}$  (azul) para una radiación incidente de  $500 \frac{W}{m^2}$

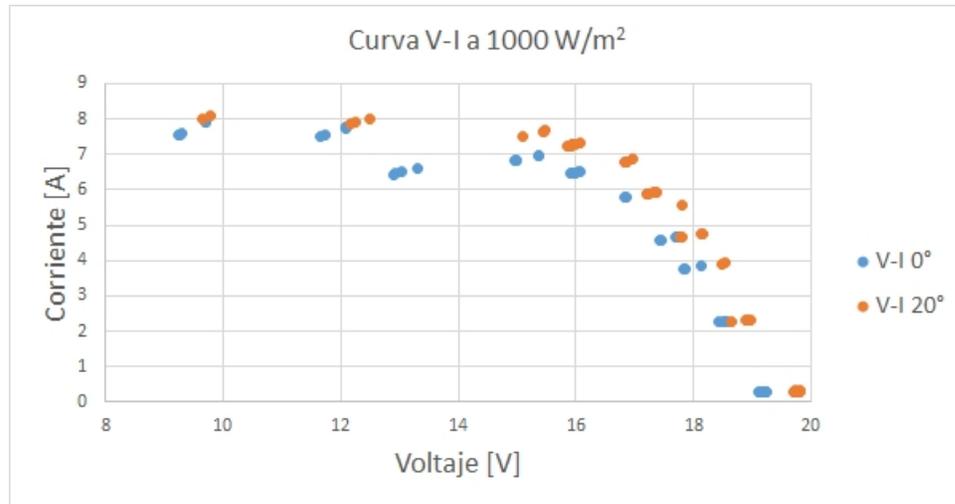


Figura 3.4: Curva de caracterización del panel fotovoltaico, ángulo de inclinación del panel de 0° (azul) y 20° (naranja) para una radiación incidente de 1000  $\frac{W}{m^2}$

Se observa en el gráfico de la figura 3.3 similitud en los puntos de la curva de caracterización a mayor voltaje, a medida que la corriente aumenta la dispersión en la curva aumenta, esto se debe a la mayor corriente de salida en conjunto con las condiciones ambientales, debido a que las mediciones fueron realizadas a lo largo de varios días soleados pero con distintas condiciones meteorológicas que afectan en los resultados.

Al analizar la segunda curva de caracterización se aprecia claramente la diferencia en potencia que implica permitir la circulación de aire por la superficie inferior del panel fotovoltaico. Para una misma resistencia la diferencia en la potencia puede ser entre un 7% a un 12% solo por permitir la disipación de la energía térmica en el panel.

La curva de respuesta del panel fotovoltaico indica que tanto el voltaje como corriente varían a medida que aumenta la radiación incidente en la superficie del panel de forma no proporcional entre ellos, por lo que a medida que la radiación aumenta se aprecia una disminución en la 'resistencia' en que es encontrada el punto máximo de potencia, por lo que el uso de un MPPT (Maximum Power Point Tracker) en una instalación fotovoltaica es vital para no tener pérdidas debido a la carga del panel en un tiempo determinado.

Finalmente, se puede indicar que el comportamiento del panel fotovoltaico bajo condiciones reales será variable y dependiente de las condiciones tanto de instalación,

optimización del MPPT, carga y condiciones meteorológicas.

### 3.2.2 Variación de la eficiencia en torno a la temperatura

Uno de los principales puntos para la optimización de los paneles fotovoltaicos es la temperatura de la celda. La eficiencia desciende a un orden de 0.5 % por cada grado que aumenta y aproximadamente a los 270°C no hay corriente de salida. Para modelar el comportamiento del panel fotovoltaico distintos modelos han sido usados, tales como [17]:

$$\eta = \eta_{ref}(1 - \beta(T_c - T_{ref})) \quad (3.1)$$

$$\eta = \eta_{ref} \left( 1 - \beta \left( T_a - T_{ref} + (T_{NOCT} - T_a) * \left( \frac{I}{I_{NOCT}} \right) \right) \right) \quad (3.2)$$

Donde:

- $T_{ref}$  = Temperatura de referencia (25°C).
- $\eta_{ref}$  = Eficiencia del panel a la temperatura de referencia.
- $T_C$  = Temperatura del panel fotovoltaico.
- $T_a$  = Temperatura ambiente.
- $I$  = Radiación incidente en la superficie del panel.
- $I_{NOCT}$  = Radiación incidente en el panel bajo prueba NOCT ( $800 \frac{W}{m^2}$ ).
- $T_{NOCT}$  = Temperatura del panel fotovoltaico bajo prueba NOCT.

$\beta$  corresponde a un factor dado por la diferencia entre la temperatura de referencia y la temperatura en que la eficiencia es cero, esta es:

$$\beta = \frac{1}{T_o - T_{ref}} \approx 0,0045^\circ C^{-1} \quad (3.3)$$

Ambos modelos corresponden a la eficiencia en el punto máximo de potencia del sistema. Para sistemas de resistencia fija este modelo no funciona debido a que la respuesta de un panel fotovoltaico en términos de voltaje y corriente es distinto, la variación de la corriente es mucho mayor que la variación del voltaje, tal como se aprecia en la figura 2.9. Por lo que la resistencia fija fuerza al sistema a un punto no ideal en potencia, la que puede ser modelada en conjunto a las ecuaciones previas.

Para considerar el modelamiento de la eficiencia haciendo uso de una resistencia fija primero se deben hacer las siguientes indicaciones:

- Lo ideal es usar una resistencia cercana a la 'resistencia' en el punto de máxima potencia ( $R = \frac{V_{PMP}}{I_{PMP}}$ ), resistencias lejanas a este valor estarán lejos del punto de máxima potencia y no tendrán una buena respuesta del modelo.

- A medida que la radiación incidente es menor que  $1000 \frac{W}{m^2}$  la resistencia debe ser mayor.

- La temperatura dependerá de la corriente de salida en el panel fotovoltaico, pero no será considerada en el cálculo.

La idea es hacer uso de la función gaussiana dependiente de la radiación incidente como factor multiplicador de la eficiencia, debido a que el aumento de la curva hasta su punto máximo cumple con la primera mitad de la curva, mientras que después del punto máximo se da una disminución de forma lineal la que puede ser modelada pero con un mayor error. Para el análisis se consideraron las mediciones de los días 3, 4, 5 y 7 de febrero del 2015, condiciones soleadas y con distintos valores de temperatura, resistencia de carga de  $2,2\Omega$ , ángulo de inclinación del panel de  $0^\circ$ .

La ecuación obtenida es de la forma:

$$\eta = \eta_{ref} * \exp\left(\frac{I-961,8}{518,8}\right)^2 (1 - 0,0045(T_C - 25^\circ C)) \quad (3.4)$$

Para efectos de calculo fue utilizado  $\eta_{ref} = 0,117$  utilizando métodos de minimización de error, debido a que el valor de eficiencia de 13.6% (entregado por el fabricante) no fue capaz de modelar la ecuación, por lo que se buscó un valor que minimizara su error. Esto puede deberse a pérdidas de potencia no consideradas previamente.

Su gráfica se muestra en la figura 3.5.

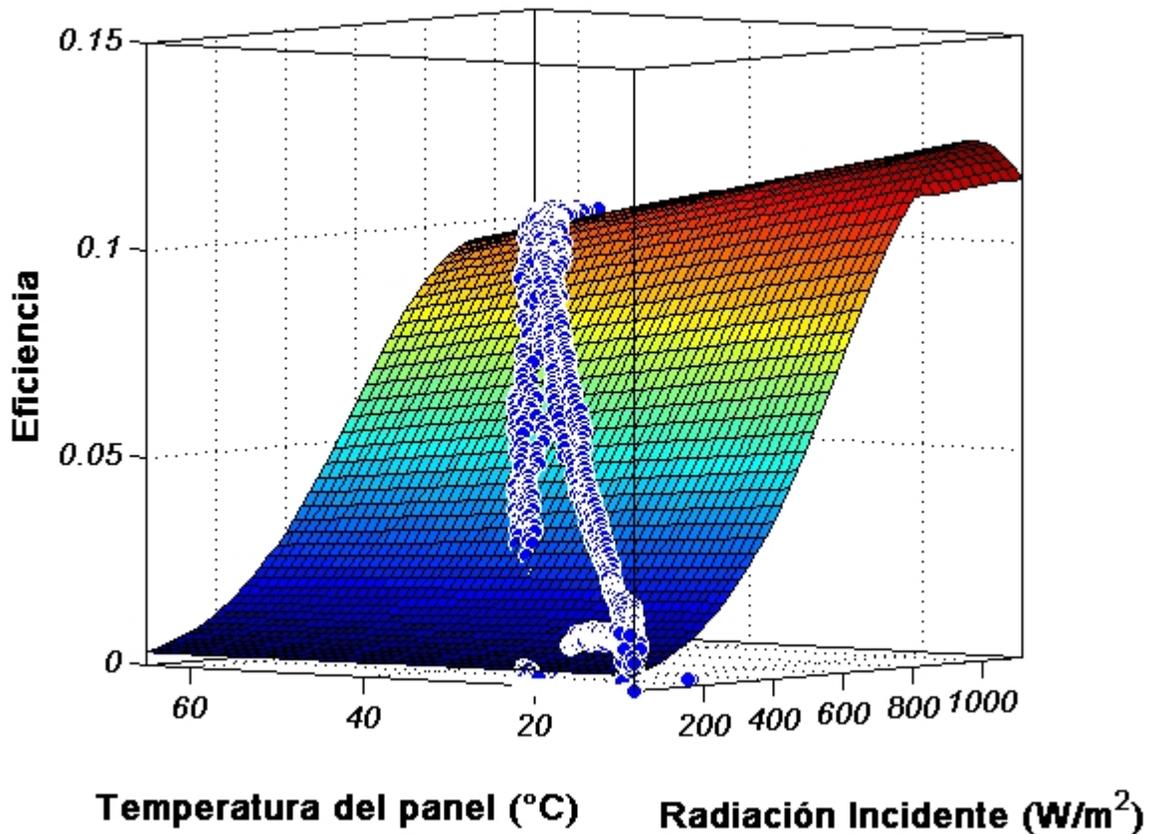


Figura 3.5: Gráfico de la eficiencia modelada (superficie) y medida (puntos) del panel fotovoltaico en función de la radiación incidente y la temperatura del panel.

La función calculada tiene un coeficiente de determinación ( $R^2$ ) de 0.987 y su error medio de raíz cuadrada (RMSE) corresponde a 0.005. El modelamiento realizado sólo es válido para nuestro panel fotovoltaico y la resistencia de referencia utilizada. La media ( $b=961.8$ ) de la distribución corresponde a la radiación incidente en el que la eficiencia será máxima según la 'resistencia' usada a  $25^{\circ}C$ .

### 3.2.3 Validación del modelo BRL

Para la validación del modelo BRL [10, 11] es necesaria la medición de la radiación difusa y directa en Santiago de Chile, para ello han sido usados los datos de radiación medidos por el Dr. Rodrigo Escobar, en el Campus San Joaquín de la Universidad Católica.

Para el análisis de la respuesta del modelo BRL en Santiago de Chile fueron realizadas

mediciones de radiación solar directa, difusa y global en intervalos de un minuto. Por medio del uso de los datos de radiación global se aplicó el cálculo de radiación difusa y directa según la sección 3.1.4 para los meses entre junio y noviembre del 2014. Para el calculo del error se uso el modelo MeAPE y MBE.

El error obtenido en la muestra fue de:

Mes	MeAPE	MBE
Junio	16,41 %	0,022
Julio	15,93 %	0,020
Agosto	17,79 %	0,014
Septiembre	12,05 %	0,004
Octubre	22,48 %	0,019
Noviembre	29,20 %	0,006

Tabla 3.1: Error en el modelamiento de la radiación difusa bajo el modelo de Boland para los meses entre Junio y Noviembre de 2014

De lo observado en la tabla 3.1 podemos inferir que este modelo tiene un mejor rendimiento en los meses con una mayor presencia de nubosidad, mientras que en meses como Octubre - Noviembre en donde los días son en su mayoría despejados el modelo de Boland tiende a sobreestimar la radiación. Esto se aprecia significativamente al observar los datos de radiación difusa medida y calculada entre el 7 y 20 de septiembre en la figura 3.6, que a pesar de tener el menor error en el modelamiento indica claramente esta diferencia.

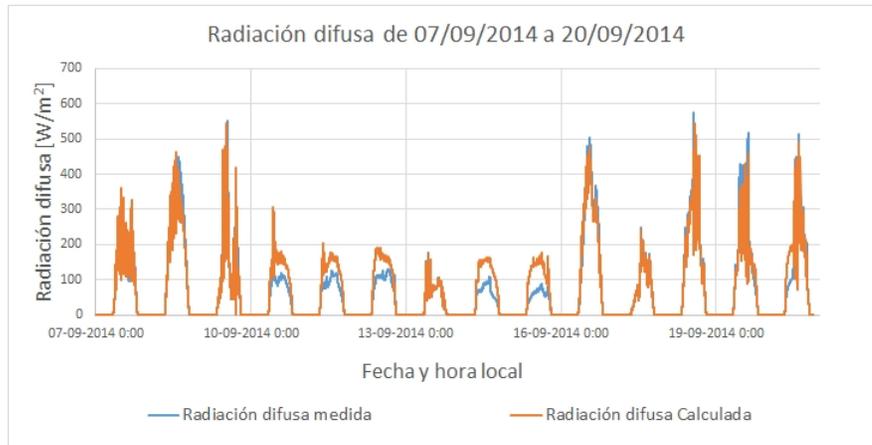


Figura 3.6: Gráfica de la radiación difusa medida y calculada entre 07/09/2014 al 20/09/2014

Un punto interesante de análisis es la relación producida entre la fracción difusa y el índice de claridad con el fin de analizar la respuesta del modelo respecto a uno de sus principales parámetros de cálculo. En la figura 3.7 los meses bajo análisis corresponden a septiembre (mes de menor error MeAPE) y noviembre (mayor error MeAPE)

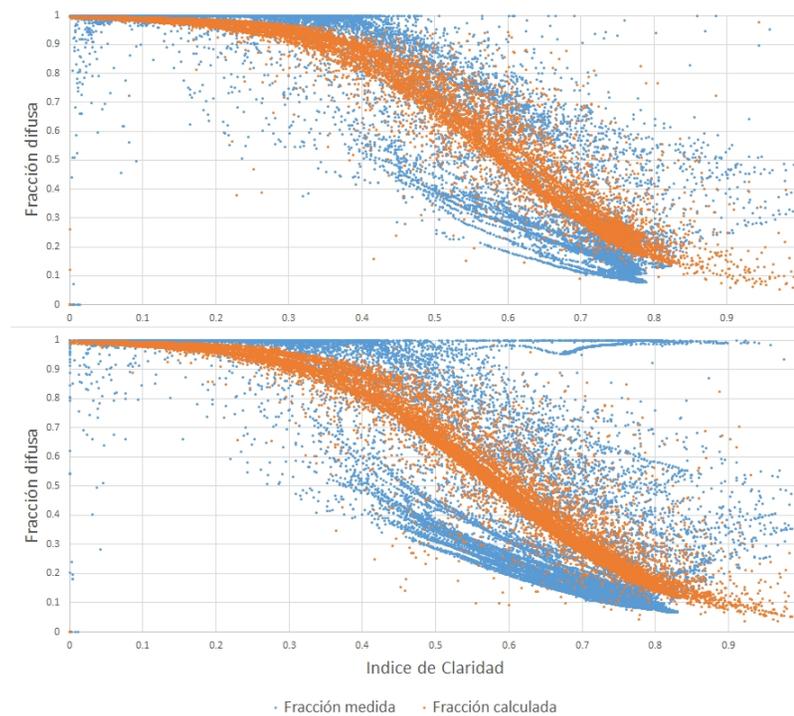


Figura 3.7: Gráfica de la fracción difusa respecto al índice de claridad para los meses de septiembre (arriba) y noviembre (abajo).

Para valores bajos del índice de claridad (días nublados) la diferencia entre la fracción difusa medida y calculada es baja, mientras que para un alto índice de claridad se aprecia que el sistema sobredimensiona los valores, por lo que un punto interesante para disminuir el error es calcular nuevas constantes de la función logística que caractericen de mejor forma la radiación difusa en Santiago. El modelo en si ofrece un error tolerable en la medición de radiación difusa y directa.

## **Capítulo 4**

# **Análisis económico del equipo**

## 4.1 Costos del piranómetro y equipos similares

### 4.1.1 Introducción

La idea principal de este capítulo es comparar y analizar la viabilidad de la producción y venta de los piranómetros construidos junto al sistema de adquisición de datos. Para ello se analizarán 2 puntos:

- 1- Precio y ventas necesarias para solventar la construcción de una cantidad mínima de piranómetros a la venta.
- 2- Costo individual de materiales y opción de sistema Open Hardware.

Ambas opciones son excluyentes en términos económicos, si el sistema es viable económicamente no es necesaria una estructura open hardware del sensor, en cambio, si no es viable la primera opción, entonces la liberación de los planos de construcción es una oportunidad para futuras replicas del trabajo realizado. No se elegirá una opción sobre la otra, se analizarán ambas opciones y se entregaran herramientas para cada una de ellas. Al final del punto se realizará una comparación respecto a los piranómetros comerciales, en segundo plano se analizará el sistema de adquisición de datos.

### 4.1.2 Desglose de costos variables en construcción del piranómetro

Para la construcción del piranómetro fueron necesarios los siguientes componentes, que se listan en la tabla 4.1.

Materiales	Costo (en dólares)
Cuerpo aluminio	50
Teflón	15
Circuito impreso	5
Chip TLC2201CP	5,26
Fotodiodo BPW34 OSRAM	1,05
Cableado 5 mts	30
Otros	30

Tabla 4.1: Costos de los materiales para la construcción de un piranómetro

Por la sola construcción de un piranómetro sus costos ascienden a 109.31 dólares. Se debe considerar en la producción a gran escala el descenso de los costos de materiales, como se puede ver en los chip TLC2201 y fotodiodo BPW34, por ejemplo, que tienen un precio de 2.81 y 0.565 dolares, respectivamente si se compran mas de 500 unidades. Considerando el uso de aluminio, teflón y el resto de los materiales el costo total de los elementos necesarios para la construcción de un piranómetro puede descender un 30 % aproximadamente al realizar la compra y elaboración a gran escala.

Otro factor importante a considerar es el costo en HH (horas hombre) para la construcción del piranómetro. Considerando el armado, verificación de errores y análisis del correcto funcionamiento toma alrededor de 2 horas por piranómetro. Considerando un costo de 10 dólares por hora hombre para un técnico previamente capacitado el costo de construcción del equipo sube a 129.31 dolares por unidad, sin considerar producción en masa.

Para la producción del equipo de adquisición de datos, son necesarios los componentes listados en la tabla 4.2.

Materiales	Costo (en dólares)
Raspberry pi	60
Comp. electronica	60
Memoria SD	8
Caja equipo	20
Conectores	20
Otros	30

Tabla 4.2: Costos de los materiales para la construcción del equipo de adquisición de datos

El costo de producción del sistema de adquisición de datos asciende a 198 dólares aproximadamente, se debe considerar que estos precios hacen referencia a la compra de los artículos desde Chile a baja escala, por lo que los precios descienden al comprar en grandes proporciones y desde el extranjero. ejemplo de ello es la Raspberry Pi, cuyo costo aproximado en Chile puede llegar hasta los 80 90 dolares, mientras que en el extranjero tienen un costo de 35 dolares sin costos de envío. Considerando descuentos al comprar en grandes volúmenes, costos de importación, aduana y otros impuestos asociados el valor puede descender hasta en un 25%.

La construcción y prueba de errores del equipo puede tomar un tiempo de 4 a 6 HH, por lo que el sistema de adquisición de datos aumenta su valor en un 25% aprox., llegando a un promedio de 248 dólares. No se consideran costos de software debido a que este ya ha sido terminado, se pueden considerar mayores costos por software y pruebas en el caso de buscar agregar funcionalidades adicionales al equipo.

### 4.1.3 Costos fijos en la producción de un piranómetro

Se analizarán los costos fijos mensuales para mantener la producción de piranómetros y los costos fijos iniciales o inversiones, necesarias al inicio del proyecto tales como muebles, maquinaria y capacitación.

Los costos fijos mensuales dentro del proyecto son bajos, estos corresponden principalmente a consumo de servicios básicos, electricidad, arriendo de un lugar de trabajo, transporte y alimentación del trabajador o trabajadores involucrados. Sus costos asociados corresponden a 1.900 dolares aproximadamente por mes, considerando el arriendo de una parcela en Melipilla mas lo anteriormente indicado.

Los costos iniciales corresponden a la compra del mobiliario necesario para la construcción de los equipos, estaciones de soldado, materiales generales de trabajo, equipo de protección, 2 computadores para uso de consulta, herramientas en general y una capacitación para la correcta elaboración de los equipos. Un punto especial es la plataforma web, necesaria para realizar las ventas a nivel internacional debido a que el mercado chileno no es viable para la venta de piranómetros. Sus costos están listados en la tabla 4.3.

Inversión necesaria	Costo (en dólares)
Mobiliario	3,100
Capacitación	1,000
Maquinaria	850
Herramientas	850
Computadores	1,100
Plataforma web	3,500

Tabla 4.3: Inversiones necesarias en el año 0 para la ejecución del proyecto.

Costos fijos de inversión específicos de este proyecto corresponden a la calibración de los piranómetros construidos. Para ello es necesario tanto equipos de adquisición de datos como una referencia en medición, bajo esta idea se elaboran 4 equipos de adquisición de datos con capacidad de medición y almacenamiento de datos para 16 piranómetros, con un costo aproximado de 400 dólares por equipo. Para la medición de referencia se solicita un Solar tracker, con el fin de extender a futuro el área de interés a mediciones de radiación difusa y directa. El costo de un equipo Solys 2 de Kipp & Zonen corresponde a los valores expuestos en la tabla 4.4.

Equipo	Costo (en dólares)
Tracker solys 2	9,740
Pirheliometro CHP1	2,415
2 Piranómetro CMP21	4,700
Pirgeometro CGR3	1,150
Sun sensor kit	770
Datalogger CR1000	1611,5
Otros	2,390

Tabla 4.4: Costo de un equipo de seguimiento solar con todos los sensores necesarios para su correcto funcionamiento y medición.

El costo total del solar tracker con el fin de calibración es de 22776 dólares sin costos de envío e instalación. Su costo total es de 28000 dolares, considerando costos de envío, aduana y otros impuesto. Una opción económica es comprar solo los 2 piranómetros CMP21 y el respectivo datalogger, con un costo de 8500 dólares considerando envío, aduana e impuestos.

Adicionalmente, se necesita un capital de entrada, cumplir las leyes de medio ambiente, ayuda legal para la inscripción de la marca, permiso legal de operaciones y otros puntos que no serán considerado debido a que sólo hablaremos de la construcción del equipo. Tampoco serán considerados los costos de envío, éstos son un recargo adicional a la venta.

#### 4.1.4 Análisis de producción y venta mensual

Para la estimación de los precios se considerará un número inicial de producción de 1000 unidades que serán vendidas a lo largo de un año. Se puede considerar periodos de mayor duración para distintos volúmenes de venta, pero nuestro objetivo es analizar en el corto plazo. El

capital de trabajo necesario corresponderá a 3 meses, con un costo aproximado de 38000 dólares. Han sido contratadas 4 personas para labores de construcción de piranómetros, venta y gestión web hasta el décimo mes, donde se ha detenido la producción de piranómetros, el sueldo de cada una de ellas equivale a 1600 dólares.

La depreciación de los equipos se lista en la tabla 4.5.

Equipo	Depreciación (en años)
Tracker solys 2	4
Equipos adquisición datos	1
Maquinaria	3
Computadores	3
Herramientas	1
Muebles	2

Tabla 4.5: Tabla de depreciación de los distintos equipos utilizados

El costo de producción se estimó a 76,517 dólares por unidad solo en materiales. Se considera una venta de 1000 piranómetros a lo largo del año, distribuido de forma no uniforme entre los 12 meses de análisis, donde al final del periodo se generan las mayores ventas debido al mayor conocimiento del producto.

Bajo el precio de venta estimado de 250 dólares, obtenemos un VAN al 15% de 51.549 dolares en el primer año, con un costo de inversión de 78255 dólares, por lo que la rentabilidad de cada dolar invertido es de 0.655 dolares por el proyecto, cálculo expuesto en el Anexo C. Manteniendo un precio de 250 dólares, el mínimo de unidades que es necesario vender es de 743 piranómetros, en cambio, si se venden 1000 unidades su precio mínimo es de 193 dólares.

Fuera de las posibles ganancias se deben evaluar algunos puntos adicionales previos a la realización del proyecto, tales como:

- Existe un mercado capaz de comprar 1000 piranómetros por año.
- Costos legales, publicidad, patentes e investigación no han sido considerados. Específicamente en el último punto se supone que la investigación para el desarrollo del producto ya ha terminado y se evaluá solo su viabilidad económica.

- Inversión. La necesidad de obtener recursos y el posible interés por ello no ha sido considerado. Se ha dimensionado el dinero total para un préstamo o fondo semilla.

Una vez considerado estos puntos es posible finalizar la evaluación, pero a primera vista ya tenemos certeza del costo de producción y precio de venta de un piranómetro para compararlo con la oferta del mercado.

#### **4.1.5 Open Hardware**

La liberación de los planos de construcción tanto del piranómetro como del sistema de adquisición de datos genera beneficios a nivel de desarrollo y problemas de elaboración que no existen en un desarrollo industrial. La retro-alimentación de la comunidad de investigadores e ingenieros en el área solar generará mejoras en el piranómetro junto al avance del tiempo, ya que el uso de una licencia Creative Commons [18] considera la publicación de toda modificación al sistema original.

A nivel de Hardware, pueden cambiar algunas piezas por otras, pero en costos, el precio no variará mucho en el piranómetro, a menos que se genere un gran cambio como la miniaturización del sensor, resistencia a elementos específicos o la necesidad que tenga el desarrollador. En el caso del sistema de adquisición de datos las modificaciones serán mas rápidas, ya que se pueden usar otros sistemas de lectura de voltaje en 5V tales como Arduino o Beaglebone Black con el fin de tener distintas prestaciones, minimizar espacio, abaratar costos o cualquiera sea el objetivo de la comunidad.

El principal problema involucrado en la construcción de un piranómetro es su calibración. Es necesario otro piranómetro calibrado con un error menor que el piranómetro a calibrar, por lo que la construcción está amarrada a un segundo piranómetro de alto costo. Una posible solución a este problema es el uso de bases de datos públicas para la medición de radiación global, siempre y cuando la distancia física entre el piranómetro de referencia y por calibrar sea menor a 20 kilómetros, fuera de ese rango no se puede asegurar la similitud de las mediciones.

Se mantendrán los costos de los materiales tanto para el piranómetro como el sistema de adquisición de datos, estos son de 109.31 y 198 dólares respectivamente. Un costo implícito es el costo de la persona que desarrolle el nuevo prototipo o solo lo construya, con tiempos de trabajo mucho mayores que en un sistema industrializado, debido al desconocimiento del equipo

y la realización del trabajo por completo.

#### **4.1.6 Comparación con piranómetros en el mercado**

Un piranómetro difiere en precio de otro principalmente por 2 puntos:

- Materiales del equipo.
- Precisión.

Un piranómetro basado en termopila con un 2% de error puede quintuplicar el precio de un piranómetro basado en silicio con un error de un 5%, por lo que sólo consideraremos piranómetros de silicio en el mercado para las comparaciones a realizar. No se considerará el costo del equipo de adquisición de datos, que tiene grandes diferencias.

En el extranjero el mercado de la medición solar está dominado por Kipp & Zonen [19], empresa de origen en los Países Bajos, que ofrece una amplia gama de piranómetros, pirheliómetros, seguidores solares y otros productos según las necesidades del cliente. Su piranómetro SPLite 2, con un costo de 322 dólares tiene características similares al piranómetro construido para efectos de esta tesis.

Otra empresa con amplia presencia en la medición solar es LI-COR [20], empresa de origen estadounidense y con una amplia gama de áreas de trabajo relacionadas a la investigación. El piranómetro LI-200 ofrecido por la empresa tiene prestaciones similares a las del piranómetro fabricado para efectos de esta tesis. Su costo es de 600 dólares. Este piranómetro tiene un alto uso en sistemas de medición rotating debido a su reducido tamaño, justificando su alto costo en comparación.

Los precios de las distintas opciones al momento de comprar un piranómetro se listan en la tabla 4.6, en la lista se incluyen las opciones de piranómetro propuestas en este trabajo de tesis.

Equipo	Costo (en dolares)
SPlite 2 Kipp & Zonen	322
Li-200 LI-COR	600
Piranómetro CMP21	2,350
Piranómetro tesis industrializado	250
Piranómetro tesis Open Hardware	109,31

Tabla 4.6: Piranómetros en el mercado y sus precios respecto al piranómetro propuesto en la tesis presente. Se ha agregado el piranometro CHP21 de Kipp & Zonen a modo de comparación entre un piranómetro de silicio y uno basado en termopila.

Considerando la investigación solar como publico objetivo son adecuadas las soluciones ofrecidas tanto por el piranómetro LI-200, CMP21 o la construcción de piranómetros basados en el modelo Open Hardware por el mismo centro investigador, con el fin de tener un control pleno de los equipos a instalar y junto con ello abaratar costos, mientras que para un uso específico, modelamiento de radiación incidente o mediciones de referencia son útiles tanto el piranómetro SPlite2 como el piranómetro basado en la tesis producido en masa, son de rápida instalación, ofrecen un error aceptable (5%) y tienen un precio bajo en comparación a las otras alternativas. En el caso de docencia son útiles tanto el piranómetro SPlite 2 y las 2 versiones del piranómetro propuesta en la tesis, con el fin de enseñar sobre el sol, su medición, su naturaleza y la electrónica presente en el equipo y enfocada a la adquisición de datos. En base al uso final a entregar el piranómetro propuesto en esta tesis, se puede volver una real opción de trabajo, especialmente en docencia y usos específicos. Si se espera usar en investigación su error no está dentro del intervalo aceptable, pero su uso en conjunto con otros piranómetros de mayor precisión pueden arrojar interesante información para el mapeo del comportamiento solar en un área o región definida, lo que es especialmente útil en los estudios para la evaluación de proyectos energéticos en base a energía fotovoltaica.

## **Capítulo 5**

# **Conclusiones**

## 5.1 Conclusiones

En base a los objetivos previamente planteados, se indica que:

- La construcción de uno o más piranómetros para la medición de la radiación difusa y directa es posible y factible económicamente utilizando materiales disponibles en un laboratorio de física y sensores de silicio. Se ha obtenido un error asociado a las mediciones del orden de 5 %, lo que es razonable, dado su bajo costo.
- Es posible realizar una medición de radiación difusa mediante el uso de una banda de sombra que bloquea el sol. Un error en la medición es que la banda de sombra cubre un área mayor a la esperada, por lo que en días soleados la medición de radiación difusa es subestimada. La solución propuesta es que la banda de sombra no cubra un ángulo mayor a  $5^\circ$  al igual que en la medición de radiación directa con el objetivo de minimizar el error. Se debe hacer un estudio a futuro sobre el tema.
- La implementación del modelo BRL como herramienta de caracterización de la radiación difusa y directa nos entrega una nueva opción para obtener este parámetro, con un error asociado de 19%, una vez adaptado a las condiciones específicas de Santiago su error puede descender por debajo del 10 %. El uso de un modelo en vez de la medición a través de sensores específicos abarata los costos y puede ser usado como medición de referencia y secundaria junto a sistemas de seguimiento solar.
- Ha sido posible cuantificar con un bajo porcentaje de error una parte importante de los parámetros operacionales de un panel fotovoltaico en condiciones reales y en base a ello ha sido posible modelar de forma simple su funcionamiento. En base a las mediciones realizadas se han desarrollado distintos modelos de cálculo que facilitan la interpretación y análisis de los datos obtenidos con el fin de calcular eficiencia, tiempo de funcionamiento, potencia total, radiación incidente en planos inclinados o un sistema matemático de seguimiento solar para el uso de un piranómetro junto a una banda de sombra.
- Se ha obtenido la curva de caracterización de un panel fotovoltaico bajo condiciones reales. Una observación importante es el efecto de la temperatura en la eficiencia de conversión, ya que para una misma radiación incidente la potencia de salida siempre es mayor antes del mediodía solar, producto del rápido aumento de temperatura ambiente durante la mañana en comparación con el descenso de la temperatura durante la tarde.

- Se ha analizado económicamente la rentabilidad de la producción del piranómetro propuesto en esta tesis, enfocándolo como producto didáctico/educacional, para mediciones específicas y de monitoreo. Se ha encontrado un precio óptimo de 250 dólares con un IVAN de 0.655 dolares considerando una tasa de 15 % en el cálculo de la VAN para la producción industrial. En el caso Open Hardware reduce los costos de producción de piranómetros siempre limitado por la calibración de los mismos, permite modificaciones específicas según lo que necesite la empresa o ingeniero a cargo. Es necesario un mayor análisis del mercado a nivel internacional para mejores resultados.

Nuevas ideas que se pueden sumar al proyecto son la inclusión de una sistema de banda ancha móvil (con un costo en equipos menor a 60 dólares y un plan mensual de datos) para el envío de datos y revisión de los sistemas de forma remota. A la vez el uso de un sistema de GPS permitiría ajustar algunos parámetros del modelo BRL y el sistema de sombra para radiación difusa de tal forma que no sea necesario el ajuste cada 2 días del sensor junto con la inclusión de un pequeño motor que cambie la posición del piranómetro y la banda de sombra según sea necesario (El sistema rotatorio ya está patentado, es mejor buscar otras opciones). También puede ser implementado un panel solar en conjunto con un MPPT y un juego de baterías de modo que no sea necesaria una conexión al sistema eléctrico.

Una implementación de los equipos realizados bajo Arduino es también posible, realizando algunos cambios para tener un sistema ADC de 12 bits en vez de 10 bits con el fin de no aumentar el error. Esto nos permitiría ahorrar en energía (Raspberry Pi consume más que algunos modelos de Arduino) y algunas mejoras a nivel de acceso y manipulación de datos, siempre considerando la menor potencia, velocidad y el aumento en costos debido a que los distintos módulos a utilizar elevan el precio del equipo.

# Bibliografía

- [1] Laskar J.; Fienga A.; Gastineau M.; Manche H. La2010: A new orbital solution for the long-term motion of the earth. *Astronomy and Astrophysics* 532, 2011.
- [2] Gueymard CA. The sun's total and spectral irradiance for solar energy application and solar radiation models. *Sol Energy* 76:423–453, 2004.
- [3] V. Paulescu M.; Paulescu E.; Gravila P.; Badescu. Weather modeling and forecasting of pv systems operation. *Green Energy and Technology, Springer-Verlag London*, 2013.
- [4] Centro de energías renovables. Reporte cer octubre. 2014.
- [5] <http://solargis.info/doc/free-solar-radiation-maps> DNI. Free solar maps. solargis. 2014.
- [6] Gulin M.; Vasaky M.; Baotić M. Estimation of the global solar irradiance on tilted surfaces. *17th International Conference on Electrical Drives and Power Electronics (EDPE 2013)* (pp. 334-339), 2013.
- [7] Cordero R.; Damiani A.; Ferrer J.; Jorquera J.; Tobar M.; Labbe F.; Carrasco J.; Laroze D. Uv irradiance and albedo at union glacier camp (antarctica): A case study. *PLoS ONE* 9(3): e90705. doi:10.1371/journal.pone.0090705, 2014.
- [8] ISO 9060:1990. Solar energy – specification and classification of instruments for measuring hemispherical solar and direct solar radiation.
- [9] Middleton Solar. Pyranómetro classification. <http://www.middletonsolar.com/documents/pyrclass.pdf>.
- [10] Ridley B.; Boland J.; Lauret P. Modelling of diffuse solar fraction with multiple predictors. *Renewable Energy, Volume 35, Issue 2*, 2010.
- [11] Boland J.; Huang J.; Ridley B. Decomposing global solar radiation into its direct and diffuse components. *Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 28*, 2013.

- [12] Raspberry Pi foundation. Raspberry pi, miniordenador de bajo costo. [www.raspberrypi.org](http://www.raspberrypi.org).
- [13] Leens F. An introduction to i2c and spi protocols. *Instrumentation and Measurement Magazine, IEEE*, 2009.
- [14] Oliveira A.; Machado A. A new shadow-ring device for measuring diffuse solar radiation at the surface. *Atmospheric and Oceanic Technology*, 2001.
- [15] Steinhart J.; Hart S. Calibration curves for thermistors. *Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts*, 1968.
- [16] Reda I.; Andreas A. Solar position algorithm for solar radiation applications. *National Renewable Energy Laboratory*, 2008.
- [17] Dubey S.; Sarvaiya J.; Seshadri B. Temperature dependent photovoltaic (pv) efficiency and its effect on pv production in the world - a review. *Energy Procedia 33*, 2012.
- [18] Center for the Public Domain. Creative commons licenses. <http://creativecommons.org/licenses/>, Revisado en Abril 2015.
- [19] [www.kippzonen.com](http://www.kippzonen.com).
- [20] [www.licor.com](http://www.licor.com).

## Apéndice A

# Raspberry Pi

Raspberry Pi (figura A.1) corresponde a una serie de computadores de bajo costo desarrollados en Inglaterra por Raspberry Pi Foundation, con la intención de enseñar ciencias de la computación a nivel básico en escuelas. Su fecha de lanzamiento fue en febrero de 2012.

Los computadores Raspberry Pi destacan por un tamaño reducido, comparable con el de una tarjeta de crédito, bajo consumo energético y capaces de correr sistemas operativos basados en linux tales como Raspbian (fork de Debian), Android, RISC OS, FreeBSD y otros. Tienen una gran variedad de modelos según su época de desarrollo, siendo los modelos A y B los iniciales y sus revisiones A+ y B+ mejoras a nivel de hardware y facilidad de uso.

Su versión original está basada en el SoC Broadcom BCM2835, el que consiste de un procesador single core ARM de 700 MHz y GPU Videocore IV. Dependiendo del modelo de Raspberry es posible tener RAM de 256MB, 512MB y 1GB, siendo la primera de éstas la que viene en el modelo original. Hace pocos meses se lanzo la Raspberry Pi 2, la cual trae un procesador Quad core ARM V7 a 900 MHz, 1 GB en RAM, 4 puertos USB entre sus principales características.

Gracias a su sistema operativo puede ser usado como un computador de escritorio o trabajar en aplicaciones específicas. La disponibilidad de 26 pines (modelos A y B) o 40 pines (modelos A+, B+ y Pi 2) permite la interacción de Raspberry con distintos componentes electrónicos. Los protocolos I2C, SPI, UART permiten una rápida interacción con distintos chips e instrumentos de medición, por lo que su uso como datalogger, base de datos o servidor de almacenamiento es posible sin mayor problemas.



Figura A.1: Raspberry Pi A+ (izquierda) y Raspberry Pi 2 (derecha).

# Apéndice B

## Código usado

### B.1 Códigos

#### B.1.1 Medición en tiempo real

Código escrito en Python usado para la medición de datos en tiempo real por el equipo construido.

```
import RPi.GPIO as GPIO
import spidev
import time
import os
import math

GPIO.setmode(GPIO.BCM)
GPIO.setup(24,GPIO.IN)
GPIO.setup(23,GPIO.IN)
GPIO.setup(18,GPIO.OUT)
prev_input= 0
led = 1
GPIO.output(18,1)

spi=spidev.SpiDev()
spi.open(0,0)

def adc(channel):
    if ((channel>7) or (channel<0)):
        return -1
```

```

com=24+channel
bt1=com >>2
bt2=(com & 3)<< 6
inp=spi.xfer2 ([bt1 ,bt2 ,0])
out= (((inp[1]&15)<<8) + inp[2])
return out

def temp(channel):
# Sector adq. de datos
if ((channel>7) or (channel<0)):
return -1
com=24+channel
bt1=com >>2
bt2=(com & 3)<< 6
inp=spi.xfer2 ([bt1 ,bt2 ,0])
out= (((inp[1]&15)<<8) + inp[2])
Rp=9890.0
Vi=5.00
Vout=out*(Vi/4095)
if (Vout==0.0):
Rth=0.0
else:
Rth=((Rp*Vi)/Vout)-Rp
# Sector temperatura
a=720.3
b=-0.1533
c=-150.6
if (Rth==0.0):
T=-273.15
else:
T=(a*(Rth**b))+c # Relacion Resistencia – Temperatura para un termistor
return T

a=1
cmed=0
alm1=0.0
alm3=0.0
alm4=0.0
alm5=0.0
alm6=0.0
alm7=0.0

try:

```

```

#creacion de carpeta data
flag=0
os.chdir('/home/pi/')
fich=os.listdir('/home/pi/')
for i in fich:
if i=='med_final':
flag=1
if flag==0:
os.mkdir('/home/pi/med_final')
os.chdir('/home/pi/med_final')

# tiempo entre cada medicion (no hacer menor a 30 milisegundos – dependiendo del codigo)
wait= 120000 # Tiempo en milisegundos
cont=-1 # semilla del contador, para que no se den mediciones en el mismo intervalo

# Mediciones de temperatura
while a==1:
t=time.time()
num=int(1000*t/wait) # medicion actual en base al tiempo (para no repetir mediciones)

# sistema de eleccion de medicion
inpled = GPIO.input(23)
if (inpled == True and led ==1):
GPIO.output(18,0)
led=0
elif ( inpled == True and led ==0):
GPIO.output(18,1)
led=1

#Medicion de la radiacion solar visible
if led == 1:
for i in range(10):
te1=adc(0)*(5.00/4095) # Rad. Difusa
alm1=alm1+te1
te3=adc(2)*(5.00/4095) # Rad. Global
alm3=alm3+te3
te4=adc(3)*(5.00/4095) # Voltmetro = 5.5251 multiplicador
alm4=alm4+te4
te5=adc(5)*(5.00/4095) # Amperimetro de efecto hall
alm5=alm5+te5
te7=temp(4) # Termistor
alm7=alm7+te7

```

```

cmed=cmed+1

#Almacenamiento de los datos
if (cont!=num and led == 1):
cont=num
alm1=alm1/(cmed) # Rad. Difusa
alm3=alm3/(cmed) # Rad. Global
alm4=alm4/(cmed) # Voltmetro = 5.5251 multiplicador
alm5=alm5/(cmed) # Amperimetro de efecto hall
alm7=alm7/(cmed) # Termistor
alm1=250*alm1
alm3=340*alm3
alm4=5.5251*alm4
alm5=alm5-2.50
alm5=alm5/0.1
alm6=alm4*alm5 # Potencia (Volt*Amp)
fecha=(time.strftime('%d-%m-%Y')+'.dat')
hora=time.strftime('%t:%M%S')
file=open(fecha,'a')
file.write('%s\t%.5f\t%.5f\t%.5f\t%.5f\t%.5f\t%.5f\n'%(hora,alm1,alm3,alm4,alm5,alm6,
alm7))
file.close()
alm1=0.0
alm2=0.0
alm3=0.0
alm4=0.0
alm5=0.0
alm6=0.0
alm7=0.0
cmed=0

#modulo de apagado del equipo
input=GPIO.input(24)
if ((not prev_input) and input):
os.system("sudo_halt")
#print input
prev_input=input
time.sleep(0.5)

except KeyboardInterrupt:
spi.close()
spi.close()

```

## B.1.2 Posición del piranómetro bajo la banda de sombra

Código escrito en Matlab, consiste en 2 partes, el primer algoritmo calcula vector solar y las posiciones del sol para análisis generales, mientras que el segundo analiza la posición del piranómetro en base al primer cálculo.

```
1%datos default, solo para tener algo previo
2format long
3
4location.altitude=516;
5location.latitude=-33.450354;
6location.longitude=-70.6839913;
7time.year=2014;
8time.month=01;
9time.day=01;
10time.hour=1;
11time.min=1;
12time.sec=0;
13time.UTC=-3;
14
15res=sun_position(time, location);
16
17R=input('Ingrese fecha de analisis con el siguiente formato (dd-mm-yyyy)=_', 's');
18ang=input('Ingrese el angulo de inclinacion del panel (en grad)=_');
19ang=ang*(pi/180);
20year=str2num(R(7:10));
21day=str2num(R(1:2));
22month=str2num(R(4:5));
23
24out=0; %matriz almacenamiento de informacion
25
26%primer punto 0:00:00 corresponde a 23:59:00 del dia anterior
27
28dif=year-4*floor(year/4); \% analisis anos bisiestos (valido de 1901 a 2099)
29
30if dif==0 && day==1
31    sum=[31 29 31 30 31 30 31 31 30 31 30 31];
32    if month==1
33        defday=sum(12);
34        defmonth=12;
35        defyear=year-1;
36    else
37        defyear=year;
```

```

38         defday=sum(month-1);
39         defmonth=month-1;
40     end
41 elseif day==1
42     sum=[31 28 31 30 31 30 31 31 30 31 30 31];
43     if month==1
44         defday=sum(12);
45         defmonth=12;
46         defyear=year-1;
47     else
48         defyear=year;
49         defday=sum(month-1);
50         defmonth=month-1;
51     end
52 else
53     defyear=year;
54     defday=day-1;
55     defmonth=month;
56 end
57
58 % Caso base
59 time.year=defyear;
60 time.month=defmonth;
61 time.day=defday;
62 time.hour=23;
63 time.min=59;
64 time.sec=0;
65 time.UTC=-3;
66
67 res=sun_position(time, location);
68 out(1,1)=res.zenith; % Zenith
69 out(1,2)=res.azimuth; % Azimuth
70 zen=out(1,1)*(pi/180);
71 azi=out(1,2)*(pi/180);
72 vsol=[sin(zen)*cos(azi) sin(zen)*sin(azi) cos(zen)]; % vector solar
73 vnor=[sin(ang) 0 cos(ang)]; % vector ortogonal al panel
74     a1=(vsol.*vsol);
75     suma1=a1(1)+a1(2)+a1(3);
76     nsol=(suma1)^(1/2);
77     a2=(vnor.*vnor);
78     suma2=a2(1)+a2(2)+a2(3);
79     nnor=(suma2)^(1/2);
80     a3=(vsol.*vnor);

```

```

81     suma3=a3(1)+a3(2)+a3(3);
82     cosang=suma3/(nsol*nnor);
83 out(1,3)=acos(cosang);
84 out(1,4)=out(1,3)*(180/pi);
85
86 %variable inicio medicion
87 time.year=year;
88 time.month=month;
89 time.day=day;
90 time.hour=0;
91 time.min=1;
92 time.sec=0;
93
94 for i=2:720
95     res=sun_position(time, location);
96     out(i,1)=res.zenith; %Zenith
97     out(i,2)=res.azimuth; %Azimuth
98     zen=out(i,1)*(pi/180);
99     azi=out(i,2)*(pi/180);
100    vsol=[sin(zen)*cos(azi) sin(zen)*sin(azi) cos(zen)]; %vector solar
101    vnor=[sin(ang) 0 cos(ang)]; %vector ortogonal al panel
102    a1=(vsol.*vsol);
103    suma1=a1(1)+a1(2)+a1(3);
104    nsol=(suma1)^(1/2);
105    a2=(vnor.*vnor);
106    suma2=a2(1)+a2(2)+a2(3);
107    nnor=(suma2)^(1/2);
108    a3=(vsol.*vnor);
109    suma3=a3(1)+a3(2)+a3(3);
110    cosang=suma3/(nsol*nnor);
111    out(i,3)=acos(cosang); %Angulo entre panel y sol (rad)
112    out(i,4)=out(i,3)*(180/pi); %Angulo entre panel y sol (grad)
113    time.min=time.min+2;
114    if time.min>60
115        time.min=1;
116        time.hour=time.hour+1;
117    end
118 end

```

```
format long
```

```
2
```

```
do=size(out); %variable test tiene angulo y dif. radiacion
```

```
con=1;
```

```

alm=0;
for i=1:lo(1)
7     if out(i,1)<90
8         alm(con,1)=out(i,1);
9         alm(con,2)=out(i,2);
10        alm(con,3)=(alm(con,1)*pi)/180;
11        alm(con,4)=(alm(con,2)*pi)/180;
12        alm(con,5)=sin(alm(con,3))*cos(alm(con,4));
13        alm(con,6)=cos(alm(con,3));
14        con=con+1;
15    end
end
17plot(alm(:,5),alm(:,6))
18[c,r]=max(alm(:,6));
19% = 0.9132;
20% = 195;
21[e,w]=min(alm(:,6));
22x=alm(r,5)-alm(w,5)
23y=alm(r,6)
24ang=atan(y/x)*(180/pi)
25desp=alm(w,5)*28.6 %desplazamiento del sensor desde el punto 0

```

### B.1.3 Radiación incidente en una superficie inclinada a lo largo del día

Algoritmo escrito en Matlab, usado para conocer la radiación difusa según el ángulo de inclinación del panel usado. Es la versión mas simple del mismo código.

```

1%%Llamadas a sun_position.m
2%e necesita la matriz dataprev con la informacion de rad. difusa (1) y global
3%2)
4
5%datos default, solo para tener algo previo
6location.altitude=516;
7location.latitude=-33.450354;
8location.longitude=-70.6839913;
9time.year=2014;
10time.month=01;
11time.day=01;
12time.hour=1;
13time.min=1;
14time.sec=0;
15time.UTC=-3;

```

```

16
17 res=sun_position(time, location);
18
19 R=input('Ingrese_fecha_de_analisis_con_el_siguiete_formato_(dd-mm-yyyy)=', 's');
20 ang=input('Ingrese_el_angulo_de_inclinacion_del_panel_(en_grad)=');
21 ang=ang*(pi/180);
22 year=str2num(R(7:10));
23 day=str2num(R(1:2));
24 month=str2num(R(4:5));
25
26 data=0; %matriz almacenamiento de informacion
27 la=length(dataprev);
28
29 %primer punto 0:00:00 corresponde a 23:59:00 del dia anterior
30
31 dif=year-4*floor(year/4); % analisis anos bisiestos (valido de 1901 a 2099)
32
33 if dif==0 && day==1
34     sum=[31 29 31 30 31 30 31 31 30 31 30 31];
35     if month==1
36         defday=sum(12);
37         defmonth=12;
38         defyear=year-1;
39     else
40         defyear=year;
41         defday=sum(month-1);
42         defmonth=month-1;
43     end
44 elseif day==1
45     sum=[31 28 31 30 31 30 31 31 30 31 30 31];
46     if month==1
47         defday=sum(12);
48         defmonth=12;
49         defyear=year-1;
50     else
51         defyear=year;
52         defday=sum(month-1);
53         defmonth=month-1;
54     end
55 else
56     defyear=year;
57     defday=day-1;
58     defmonth=month;

```

```

54end
55
56
57% Caso base
58time.year=defyear;
59time.month=defmonth;
60time.day=defday;
61time.hour=23;
62time.min=59;
63time.sec=0;
64
65
66alb=[0.089 0.085 0.086 0.083 0.084 0.038 0.094 0.094 0.082 0.085 0.087 0.091];
67
68
69res=sun_position(time, location);
70data(1,1)=dataprev(1,1);
71data(1,2)=dataprev(1,2);
72if data(1,2)==0
73    data(1,2)=0.0001;
74end
75data(1,3)=res.zenith; % Zenith
76zen=data(1,3)*(pi/180);
77azi=res.azimuth*(pi/180);
78vsol=[sin(zen)*cos(azi) sin(zen)*sin(azi) cos(zen)]; %vector solar
79vnor=[sin(ang) 0 cos(ang)]; %vector ortogonal al panel
80msol=0;
81
82    for w=1:length(vsol)
83        msol=msol+vsol(w)*vsol(w);
84    end
85    nsol=(msol)^(1/2);
86    mnor=0;
87    for w=1:length(vnor)
88        mnor=mnor+vnor(w)*vnor(w);
89    end
90    nnor=(mnor)^(1/2);
91    tras=0;
92    for w=1:length(vnor)
93        tras=tras+vnor(w)*vsol(w);
94    end
95    cosang=tras/(nsol*nnor);
96data(1,4)=acos(cosang);
97
98
99F=1-((data(1,1)/data(1,2))^(1/2));
100prev=(1+F*((cos(data(1,4)))^2)*((sin(data(1,3)))^3));
101data(1,5)=(1/2)*data(1,1)*(1+cos(ang))*(1+F*((sin(ang/2))^3))*prev; % (1+F*((cos(data(i,4)

```

```

    ))^2)*((sin(data(i,3)))^3));
102 data(1,6)=(1/2)*data(1,1)*alb(month)*(1-cos(ang));
103 dif=data(1,2)-data(1,1);
104 if dif<2
105     dif=0;
106 end
107 data(1,7)=(dif)/cos(data(1,3));
108 data(1,8)=data(1,7)*cos(data(1,4));
109 data(1,9)=data(1,5)+data(1,6)+data(1,8);
110
111
112 %variable inicio medicion
113 time.year=year;
114 time.month=month;
115 time.day=day;
116 time.hour=0;
117 time.min=1;
118 time.sec=0;
119
120 for i=2:la
121     res=sun_position(time, location);
122     data(i,1)=dataprev(i,1)*1.2063;
123     data(i,2)=dataprev(i,2);
124     if data(i,2)==0
125         data(i,2)=0.0001;
126     end
127     data(i,3)=res.zenith*(pi/180); %Zenith
128     zen=data(i,3);
129     azi=res.azimuth*(pi/180);
130     vsol=[sin(zen)*cos(azi) sin(zen)*sin(azi) cos(zen)]; %vector solar
131     vnor=[sin(ang) 0 cos(ang)]; %vector ortogonal al panel
132     msol=0;
133     for w=1:length(vsol)
134         msol=msol+vsol(w)*vsol(w);
135     end
136     nsol=(msol)^(1/2);
137     mnor=0;
138     for w=1:length(vnor)
139         mnor=mnor+vnor(w)*vnor(w);
140     end
141     nnor=(mnor)^(1/2);
142     tras=0;
143     for w=1:length(vnor)

```

```

144         tras=tras+vnor(w)*vsol(w);
145     end
146     cosang=tras/(nsol*nnor);
147     data(i,4)=acos(cosang); %Angulo entre panel y sol (rad)
148     time.min=time.min+2;
149     if time.min>60
150         time.min=1;
151         time.hour=time.hour+1;
152     end
153
154     F=1-((data(i,1)/data(i,2))^(1/2));
155     %Rad. difusa en plano inclinado
156     prev=(1+F*((cos(data(i,4)))^2)*((sin(data(i,3)))^3));
157     data(i,5)=(1/2)*data(i,1)*(1+cos(ang))*(1+F*((sin(ang/2))^3))*prev;
158     %ad. albedo en plano inclinado
159     data(i,6)=(1/2)*data(i,2)*alb(month)*(1-cos(ang));
160     %Rad. directa solar
161     dif=data(i,2)-data(i,1);
162     if dif<2
163         dif=0;
164     end
165     data(i,7)=(dif)/cos(data(i,3));
166     if data(i,7)<0
167         data(i,7)=0.1;
168     end
169     %Rad. directa en plano inclinado
170     data(i,8)=data(i,7)*cos(data(i,4));
171     if data(i,8)<0
172         data(i,8)=0.1;
173     end
174     %Rad. total en plano inclinado
175     data(i,9)=data(i,5)+data(i,6)+data(i,8);
176     if data(i,9)<0
177         data(i,9)=0.1;
178     end
179
180 end

```

## **Apéndice C**

# **Cálculo del VAN para proyecto de producción industrial de piranómetros**

Se presenta a continuación el modelamiento y cálculo realizados para la determinación del VAN, expuesto en el Capítulo 4 'Análisis económico del equipo'.

	Año cero	Enero	febrero	marzo	abril	mayo	junio	julio	Agosto	septiembre	octubre
		0	0.02	0.05	0.06	0.08	0.09	0.1	0.11	0.12	0.13
Ventas		0	20	50	60	80	90	100	110	120	130
Producción		100	100	100	100	100	100	100	100	100	100
Ingreso ventas		0	5000	12500	15000	20000	22500	25000	27500	30000	32500
Empleados		-6400	-6400	-6400	-6400	-6400	-6400	-6400	-6400	-6400	-6400
Costos Fijos		-1100	-1100	-1100	-1100	-1100	-1100	-1100	-1100	-1100	-1100
Costos variables		-7651.7	-7651.7	-7651.7	-7651.7	-7651.7	-7651.7	-7651.7	-7651.7	-7651.7	-7651.7
Utilidad antes de impuesto		-15151.7	-10151.7	-2651.7	-151.7	4848.3	7348.3	9848.3	12348.3	14848.3	17348.3
Impuesto (19%)		2878.823	1928.823	503.823	28.823	-921.177	-1396.177	-1871.177	-2346.177	-2821.177	-3296.177
Utilidad desp. De impuesto		-12272.877	-8222.877	-2147.877	-122.877	3927.123	5952.123	7977.123	10002.123	12027.123	14052.123
Inversiones	-10400										
Solar tracker	-28000										
Equipos adquisición	-1600										
Capital de trabajo	-38255.1										
Arriendo parcela		-800	-800	-800	-800	-800	-800	-800	-800	-800	-800
Depreciación Solar Tracker		583	583	583	583	583	583	583	583	583	583
Dep. maquinaria, comp. Herramientas		106	106	106	106	106	106	106	106	106	106
Dep. equipo adquisición		133	133	133	133	133	133	133	133	133	133
Flujo neto	-78255.1	-12250.877	-8200.877	-2125.877	-100.877	3949.123	5974.123	7999.123	10024.123	12049.123	14074.123
	-78255.1	-12126.6996	-8035.46803	-2061.88506	-96.8487272	3752.993908	5619.876848	7448.527978	9239.53054	10993.45988	13622.38971
van 15%	51549.833										
ivan 15%	0.658740874										

Figura C.1: Cálculo realizado para la determinación de la VAN.