



UNIVERSIDAD DE CHILE  
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MATEMÁTICA

DESARROLLO DE UN SISTEMA DE MONITOREO REMOTO DE PLANTAS  
FOTOVOLTAICAS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MATEMÁTICO

RODRIGO ALFONSO BRAVO MORENO

PROFESOR GUÍA:  
JUAN PEYPOUQUET URBANEJA

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:  
JOAQUÍN FONTBONA TORRES  
TOMÁS ACUÑA RUZ

Este trabajo ha sido parcialmente financiado por CMM ANID PIA AFB170001

SANTIAGO DE CHILE  
2020



# Resumen

En los últimos años varios proyectos de energía solar han iniciado en Chile. Las plantas solares, en particular, las plantas fotovoltaicas requieren obtener información de sus operaciones para poder tomar decisiones basadas en datos. Se desarrolló un sistema de monitoreo de plantas FV, el cual permite la obtención de un reporte con métricas relevantes para la operación y mantenimiento de la misma. Este sistema es de bajo costo en comparación a la instrumentación que usualmente se utiliza para el monitoreo de sistemas FV. El sistema desarrollado admite la integración de distintos dispositivos presentes en las plantas solares, logrando resumir en una plataforma la información de variadas plantas FV. El foco de esta memoria está en la estimación de la potencia eléctrica generada por una planta FV en el tiempo, modelo que es detallado, implementado y exhibido en resultados.



*Esta memoria está dedicada a mi familia, amigos y personas importantes en mi vida, las cuales me han acompañado no solo en este proceso de titulación universitaria, si no también, en mi proceso de desarrollo como ser humano.*



# Tabla de Contenido

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Introducción</b>   | <b>1</b>  |
| <b>1. Metodología</b>   | <b>3</b>  |
| 1.1. Materiales . . . . .   | 4         |
| 1.1.1. Planta Fotovoltaica . . . . .  | 4         |
| 1.1.2. Planta de Piloto . . . . .   | 5         |
| 1.1.3. Tecnologías de Información . . . . .                                     | 8         |
| 1.1.4. Bases de Datos de Proveedores . . . . .                                  | 8         |
| 1.2. Métodos . . . . .  | 11        |
| 1.2.1. Evaluación de Calidad de Bases de Datos Medioambientales . . . . .       | 11        |
| 1.2.2. Modelo de Datos del Sistema de Monitoreo Remoto . . . . .                | 14        |
| 1.2.3. Modelamiento de Potencia Eléctrica Generada . . . . .                    | 15        |
| 1.2.4. Reporte de KPIs de Planta . . . . .                                      | 21        |
| 1.2.5. Método de Estimación de Potencia Eléctrica Generada y KPIs . . . . .     | 23        |
| <b>2. Resultados</b>  | <b>24</b> |
| 2.1. Requerimientos para un Sistema de Monitoreo Remoto de Plantas FV . . . . . | 24        |
| 2.2. Modelamiento de Temperatura de Módulo y Radiación POA . . . . .            | 25        |
| 2.3. Calidad de bases de datos de radiación . . . . .                           | 26        |
| 2.3.1. Distribución del error . . . . .   | 27        |
| 2.4. Reporte Mensual de Indicadores de Planta FV . . . . .                      | 28        |
| <b>3. Discusión</b>   | <b>32</b> |
| 3.1. Calidad de bases de datos de radiación . . . . .                           | 32        |
| 3.2. Alternativas en el Modelamiento de Potencia Eléctrica Generada . . . . .   | 33        |
| 3.3. Reporte Mensual de Métricas para Planta FV . . . . .                       | 34        |
| <b>4. Conclusión</b>  | <b>35</b> |
| <b>Glosario</b>   | <b>36</b> |
| <b>Bibliografía</b>   | <b>37</b> |





# Índice de Tablas

|   |    |
|---|----|
| 1.1. Coordenadas del punto geográfico del área de estudio . . . . .                   | 5  |
| 1.2. Datos generales de la planta piloto . . . . .                                    | 6  |
| 1.3. Valores nominales de los módulos FV instalados en la planta piloto . . . . .     | 7  |
| 1.4. Herramientas de Programación utilizadas . . . . .                                | 9  |
| 1.5. Descripción de componentes de la infraestructura tecnológica . . . . .           | 10 |
| 1.6. Tabla resumen de evaluación de datos de <i>Merra</i> en Buenos Aires, Argentina  | 11 |
| 2.1. Tabla de requerimientos para el sistema de monitoreo remoto . . . . .            | 25 |
| 2.2. Tabla de emparejamiento de requerimientos, materiales y métodos . . . . .        | 25 |
| 2.3. Tabla de Estadísticos para <i>GHI</i> de <i>Solcast</i> en tres sitios . . . . . | 26 |
| 2.4. Tabla de Estadísticos para <i>GHI</i> de <i>Merra</i> en dos sitios . . . . .    | 27 |



# Índice de Ilustraciones

|       |  |    |
|-------|--|----|
| 1.1.  | Diagrama de interacción de las componentes y recolección de información de una planta FV . . . . .   | 5  |
| 1.2.  | Ilustración explicativa de las componentes de un <i>array</i> fotovoltaico . . . . .   | 6  |
| 1.3.  | Área de estudio y ubicación de la planta piloto en San Bernardo, Santiago de Chile . . . . .   | 7  |
| 1.4.  | Ilustración explicativa de las componentes de una planta FV que utiliza el sistema de monitoreo desarrollado . . . . .                     | 12 |
| 1.5.  | Modelo de metadatos planta FV . . . . .  | 14 |
| 1.6.  | Esquema de datos ambientales . . . . .   | 15 |
| 1.7.  | Esquema de datos eléctricos . . . . .  | 16 |
| 1.8.  | Espectro de radiación solar extraterrestre y a nivel del suelo acumulada durante un año sobre una superficie horizontal en Dubai . . . . . | 17 |
| 1.9.  | Componentes de la radiación solar dentro de la atmósfera . . . . .   | 18 |
| 1.10. | Ángulo cenital y azimutal del Sol . . . . .  | 19 |
| 1.11. | Ángulo tilt de un panel FV . . . . .   | 19 |
| 1.12. | Diagrama general del método . . . . .  | 23 |
| 2.1.  | Gráfico de componentes de radiación POA modelada . . . . .   | 26 |
| 2.2.  | Gráfico de Temperatura de Módulo FV en Planta Piloto . . . . .   | 27 |
| 2.3.  | Gráfico de Potencia estimada y generada para Planta Texinco . . . . .  | 28 |
| 2.4.  | Distribución de e para proveedor <i>Solcast</i> en Cerro Calán . . . . .   | 29 |
| 2.5.  | Distribución de e para proveedor <i>Solcast</i> en Estación Central . . . . .  | 29 |
| 2.6.  | Distribución de e para proveedor Merra en Cerro Calán . . . . .  | 30 |
| 2.7.  | Distribución del error de Merra en Estación Central . . . . .  | 30 |
| 2.8.  | Reporte mensual de KPIs de planta FV . . . . .   | 31 |



# Introducción

El incremento en el consumo de combustibles fósiles ha provocado una variedad de efectos negativos en el medio ambiente, y en la población. Algunos de estos efectos son: Aceleración del calentamiento global, degradación del medio ambiente, daño en la capa de ozono, pérdida de tierras fértiles, además de problemas de salud en animales y humanos. Por esta razón se han impulsado energías alternativas a la producida por combustibles fósiles, entre ellas las llamadas energías renovables. Entre las energías renovables más comunes están la energía eólica, producción de biomasa, energía hídrica y energía solar. La energía solar tiene la ventaja de existir en diferentes tamaños, desde escalas domiciliarias a plantas de gran escala.

La promoción de energías renovables en Chile ha obtenido el apoyo del gobierno por medio de una legislación que exige que el 10 % de la energía eléctrica generada sea por energía renovable para el año 2024 [9], con un anuncio público, ya hecho, que dicta que la meta debe modificarse para alcanzar 20 % para el año 2020 [2].

Una de las formas de producir energía solar es a través de un sistema fotovoltaico. Estos son sistemas eléctricos que aprovechan el efecto fotoeléctrico para producir corriente eléctrica al pasar un haz de luz por un dispositivo que es llamado módulo fotovoltaico. Entre las componentes de una planta o sistema fotovoltaico se considera que poseer un sistema de monitoreo de planta FV es una práctica de operación y mantenimiento recomendable [6]. Un sistema de monitoreo es un artefacto que permite la recolección y análisis de información de un objeto o fenómeno observado, su finalidad es la detección de anomalías del objeto en observación. En la práctica, existen plantas FV de pequeña y mediana escala que no poseen un operador calificado *in situ*.

El Ministerio de Energía en conjunto con el Departamento de Geofísica de la Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile ya están trabajando en una base de radiación solar pública (Explorador Solar) para facilitar la planificación de nuevas plantas [10]. Información similar, derivada de la percepción remota satelital, puede ser aprovechada para el monitoreo remoto de plantas FV utilizando los modelos adecuados para su simulación [1], [8], [16].

El trabajo expuesto en esta memoria ha sido realizado en la empresa ECOINNOVA SpA, en el proyecto SolarTracker. Este emprendimiento tiene por objetivo dar soluciones a temáticas relacionadas a la generación distribuida. Los servicios diseñados para plantas fotovoltaicas son: monitoreo en tiempo real, sistema de alertas de fallas, medición de calidad de datos satelitales y servicios relacionados a la operación y mantenimiento.

# Objetivos

## Objetivo General

Desarrollar un sistema de monitoreo remoto de plantas fotovoltaicas, que reporte métricas relevantes para la evaluación del desempeño respecto de la generación de energía eléctrica.

## Objetivos Específicos

1. Identificar requerimientos para el desarrollo de un sistema de monitoreo remoto de plantas fotovoltaicas
2. Modelar potencia eléctrica generada y evaluar su incertidumbre
3. Diseñar reporte con métricas relevantes para el sistema de monitoreo remoto

# Capítulo 1

## Metodología

La metodología para el desarrollo del sistema de monitoreo remoto utilizó métodos de desarrollo Scrum, aplicados por un equipo multidisciplinario conformado por ingenieros de las especialidades: civil eléctrica, civil en computación, civil matemática y recursos naturales renovables. La primera parte del trabajo realizado corresponde al modelamiento de la potencia eléctrica generada por una planta FV. En esta etapa se utilizaron métodos de programación computacional y de modelamiento matemático, en donde los resultados se validaron cualitativamente por los ingenieros civil eléctricos. Luego, el equipo pasó a la etapa de modelamiento de KPIs de planta FV, se seleccionaron KPIs estándar para el monitoreo de una planta FV. La implementación de los KPIs fue empleada por el equipo de desarrollo, revisada por el encargado de modelamiento y validada por los ingenieros civil eléctricos. Finalmente se automatizó el proceso de extracción, almacenamiento y generación de reportes por parte de los ingenieros civil en computación utilizando prácticas de ingeniería de software.

En general, los sistemas FV solo monitorean indicadores eléctricos de operación, como lo son corriente, voltaje y potencia [7]. El no monitorear indicadores medioambientales limita la información disponible para el operador. En plantas FV de mayor potencia se considera la obtención de datos de radiación incidente al módulo FV, mediante un sensor instalado en el mismo plano de los arreglos FV; como también la obtención de los datos de temperatura del módulo FV y velocidad del viento a la altura de la planta. Si los instrumentos mencionados cuentan con conexión remota, entonces esta práctica otorga toda las características deseables para un sistema de monitoreo remoto. Sin embargo, el costo y mantenimiento de estos instrumentos tiene un valor elevado. Por esta razón es que se quiso incorporar el modelamiento de la potencia eléctrica generada, sin perder demasiada información.

Desde hace algunas décadas existen empresas dedicadas a la percepción remota satelital de variables medioambientales, en particular, aquellas dedicadas a la percepción remota satelital de la radiación solar terrestre. Para añadir la información obtenida mediante percepción remota satelital, se hizo uso de herramientas computacionales modernas para facilitar la integración de esta información en una plataforma que permita desarrollar el sistema de monitoreo remoto. La mayoría de las herramientas usadas son gratuitas o tienen un costo bajo en comparación a la instalación de sensores de radiación y/o estaciones meteorológicas en una planta FV.

En este capítulo se presenta la metodología utilizada para el desarrollo del sistema de un sistema de monitoreo remoto para plantas FV. El capítulo se divide en dos secciones: materiales usados en el desarrollo 1.1 y métodos utilizados para la elaboración del sistema de monitoreo remoto 1.2.

## 1.1. Materiales

La sección materiales comienza explicitando las partes involucradas en el modelamiento de la potencia eléctrica generada de una planta FV. En el caso de la planta piloto, esta información es detallada en tablas. Luego, presentan las tecnologías de información utilizadas para el desarrollo del sistema de monitoreo remoto de plantas FV. Después se presentan las bases de datos usadas para recolectar los datos necesarios. Finalmente se explicitan los modelos usados para estimar la potencia eléctrica generada y las fórmulas para el cálculo de los KPIs.

### 1.1.1. Planta Fotovoltaica

Una planta FV es un sistema complejo capaz de aprovechar la energía solar y convertirla en energía eléctrica, es decir, llevan a cabo la generación fotovoltaica. Los sistemas FV son esencialmente únicos en su composición. Sin embargo, comparten ciertos componentes y funciones. En esta sección se dan a conocer los equipamientos y funciones necesarias para el modelamiento de la generación FV. Las componentes de interés para el modelamiento de la generación FV son:

- **Módulos fotovoltaicos y estructura de soporte:** Los módulos FV son el medio expuesto a la radiación solar para producir corriente eléctrica. Estos son montados sobre una estructura de soporte, la cual permite dar inclinación, ventilación y resguarda la integridad física de los módulos.
- **Inversores:** Un inversor es un dispositivo electrónico que permite la conversión de corriente eléctrica continua en corriente eléctrica alterna, donde esta última es el tipo de corriente permitido en los sistemas de distribución eléctrica de Chile.
- **Data Manager:** Interfaz que almacena datos de corriente, voltaje y potencia eléctrica del inversor. Puede tener la función de enviar datos vía internet.
- **Sensores de radiación:** Corresponden a los instrumentos llamados piranómetro y pirheliómetro. Estos permiten la medición de la radiación solar en el sitio de instalación del sensor.
- **Estación climática:** Estos instrumentos sirven para medir métricas relacionadas a la nubosidad y velocidad de viento.

Estos componentes interactúan para llevar a cabo el proceso de generación eléctrica. La funcionalidad de la planta FV que se explotó fue la extracción de datos del inversor a una base de datos para el sistema de monitoreo remoto. El diagrama 1.1 representa el funcionamiento usual de una planta FV. Notar que en esta figura están presentes tanto el sensor de radiación como la estación meteorológica.

Para una idea más acabada del medio fotovoltaico se deben entender los conceptos de



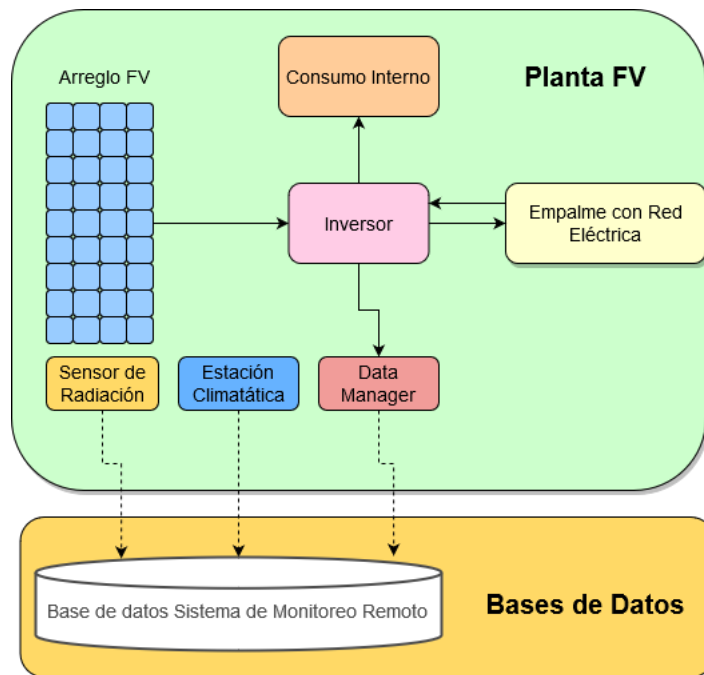


Figura 1.1: Diagrama de interacción de las componentes y recolección de información de una planta FV

módulo, *string* y *array* fotovoltaico, esto se ilustra en la figura 1.2. Los módulos son la unidad fundamental para la construcción de sistemas fotovoltaicos. Un conjunto de módulos en serie es llamado *string*. Un conjunto de *string* en paralelo es llamado *array*. El proceso de generación comienza con la exposición de un *array* FV a la radiación solar. La exposición genera corriente continua (CC) en la planta, la cual es procesada por un inversor, el cual convierte la corriente continua en corriente alterna (CA). Finalmente, luego de pasar por el circuito CA, es inyectada a la red de distribución eléctrica del país.

### 1.1.2. Planta de Piloto

La planta FV utilizada para el piloto de la solución está ubicada en una planta de gestión de residuos industriales, al norte de la comuna de San Bernardo en Santiago de Chile. En la figura 1.3 se muestra la ubicación de la planta FV.

La correcta definición del sitio de estudio es necesaria para el trabajo con bases de datos ambientales, esto pues las bases de datos dividen sus datos por punto geográfico. Los parámetros de localización del área de estudio se muestran en la tabla 1.1. Las coordenadas del punto geográfico de la 1.1 son el parámetro de entrada para obtener la radiación, temperatura y velocidad del viento en la planta piloto.

|          |             |
|----------|-------------|
| Latitud  | -33.5655065 |
| Longitud | -70.7195752 |

Tabla 1.1: Coordenadas del punto geográfico del área de estudio

La planta piloto comenzó su operación el 12 de Septiembre del 2018 con dos inversores de

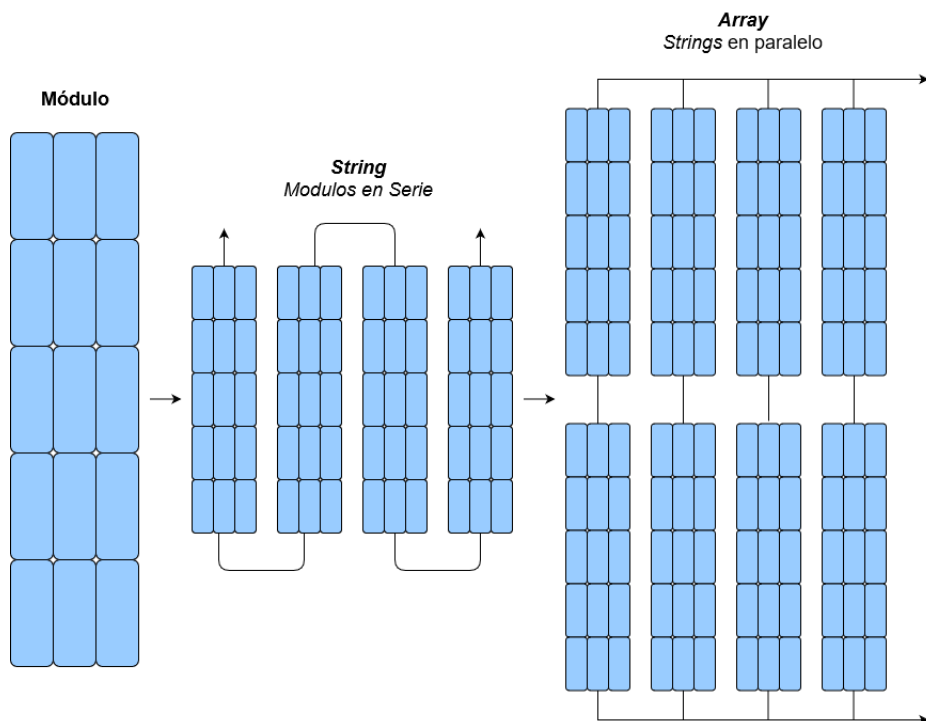


Figura 1.2: Ilustración explicativa de las componentes de un *array* fotovoltaico

la marca *Fronius* de  $20\text{ kW}$  de potencia nominal cada uno. Esto implica que la planta posee una potencia eléctrica nominal de  $40\text{ kW}$  con una potencia peak de módulo de  $39,6\text{ kW}$ . Estos dos primeros inversores son del modelo *Fronius* SYMO 20.0-3M. Luego se agregó un tercer inversor el 10 de Agosto del 2019, de modelo *Fronius* ECO 25.0-3-S con una potencia eléctrica nominal de  $25\text{ kW}$  y una potencia peak de módulo FV de  $25,08\text{ kW}$ . Los detalles de planta se resumen en la tabla 1.2

| Modelo del Inversor    | <i>Fronius</i> SYMO 20.0-3M | <i>Fronius</i> ECO 25.0-3-S |
|------------------------|-----------------------------|-----------------------------|
| Cantidad de Inversor   | 2                           | 1                           |
| Potencia Nominal       | $25\text{ kW}$              | $20\text{ kW}$              |
| Cantidad de Módulos FV | 76                          | 60                          |
| Azimuth                | $15^\circ$                  | $49^\circ$                  |
| Tilt                   | $15^\circ$                  | $13^\circ$                  |

Tabla 1.2: Datos generales de la planta piloto

En la tabla 1.2 aparecen dos campos: tilt y azimuth. Estos campos refieren a los ángulos de inclinación y orientación, respectivamente, de los módulos. Los inversores reciben corriente de los módulos FV, los cuales tienen las siguientes características 1.3.

Es importante mencionar que la planta piloto no cuenta con estación climática. Sin embargo, se instaló un sensor de radiación para medir radiación global horizontal.



Figura 1.3: Área de estudio y ubicación de la planta piloto en San Bernardo, Santiago de Chile

|  |         |
|--|---------|
| Potencia Nominal ( $P_{max}$ )           | 330 W   |
| Voltaje de Operación ( $V_{mp}$ )        | 37,2 V  |
| Corriente de Operación ( $I_{mp}$ )      | 8,88 A  |
| Voltaje de Circuito Abierto ( $V_{oc}$ ) | 45,6 V  |
| Corriente de Cortocircuito ( $I_{sc}$ )  | 9,45 A  |
| Eficiencia de Módulo                     | 16,97 % |

Tabla 1.3: Valores nominales de los módulos FV instalados en la planta piloto

### Información de Diseño de Planta FV

La información de diseño de las plantas FV proviene de los planos certificados por el ingeniero a cargo de la elaboración de los planos. En estos planos aparece información relevante para el modelamiento de la energía eléctrica generada. Esta información que llamamos parámetros de planta se enlistan a continuación:

- Nombre de la planta FV.
- Marca y modelo de inversores.
- Marca y modelo de módulos FV.
- Fecha de inicio de operaciones.
- Potencia nominal inversores.
- Potencia nominal módulos FV.
- Ángulo azimuth de arreglos FV.
- Ángulo tilt de arreglos FV.
- Número de módulos instalados en cada inversor.

Esta información es obtenida de los planos eléctricos de la planta FV, tal y como se mostró en la tabla 1.2.

### 1.1.3. Tecnologías de Información

Un sistema de monitoreo remoto de plantas FV, con la capacidad de mostrar KPIs en tiempo real y generar reportes de manera automática, debe seguir un protocolo definido. Este protocolo se resumen en:

1. Extracción automática de datos de la planta FV.
2. Extracción automática de bases de datos ambientales.
3. Almacenamiento automático de datos extraídos en base de datos para el sistema de monitoreo remoto.
4. Extracción de datos desde la base de datos del sistema de monitoreo.
5. Procesamiento de datos extraídos desde la base de datos del sistema de monitoreo para modelamiento de la potencia eléctrica generada.
6. Procesamiento de datos de potencia eléctrica generada real y modelada para cálculo de KPIs.
7. Generación automática de gráficos para la visualización en tiempo real de curvas relevantes.
8. Generación automática de reportes con KPIs de la planta FV.

### Herramientas de Programación

Las herramientas de programación es un conjunto de tecnologías asociadas a la programación. Estas tecnologías facilitaron el desarrollo del sistema de monitoreo y el cumplimiento de los requisitos funcionales. Las herramientas de programación usadas en la solución se resumen en la tabla 1.4.

### Infraestructura Tecnológica

La infraestructura tecnológica corresponde a los elementos físicos o virtuales utilizados para el desarrollo de la solución. Es decir, corresponde a: computadoras, servidores, máquinas virtuales, *data managers*, plataformas *cloud*, etc. Toda esta infraestructura es la base sobre la cual se pueden desarrollar los procesos necesarios para el sistema de monitoreo remoto. En la tabla 1.5 se describen los componentes de la infraestructura tecnológica usadas para el desarrollo.

### 1.1.4. Bases de Datos de Proveedores

El sistema de monitoreo remoto se logra descargando datos vía internet y procesando estos datos con modelos para el cálculo de los resultados. En esta sección se presentan las bases de datos de las cuales se obtiene la información.

|                |   |
|----------------|---|
| Python         | Lenguaje de programación interpretado, multiparadigma que soporta programación orientada a objetos  |
| pvlib          | Biblioteca que provee un conjunto de funciones documentadas para la simulación de sistemas fotovoltaicos                                      |
| NumPy          | Extensión de Python, que agrega mayor soporte para operaciones de vectores, matrices; y cuenta con una biblioteca de funciones matemáticas    |
| Pandas         | Extensión de NumPy para manipulación y análisis de datos. Ofrece estructuras de datos y operaciones para manipular tablas y series temporales |
| Matplotlib     | Biblioteca para la generación de gráficos a partir de datos   |
| Scipy          | Extensión de Python de herramientas y algoritmos matemáticos  |
| BigQuery       | Servicio web RESTful que permite el almacenamiento de datos en Google Cloud Storage y trabaja con sintaxis SQL.                               |
| MongoDB        | Sistema de base de datos NoSQL orientado a documentos   |
| PyCharm        | Entorno de desarrollo integrado utilizado en la programación con Python   |
| Apache Airflow | Plataforma de gestión de flujo de datos de código abierto   |
| GitHub         | Forja para alojar proyectos utilizando el sistema de control de versiones Git.  |
| LaTeX          | Sistema de composición de textos, orientado a la creación de documentos escritos que presenten una alta calidad tipográfica                   |

Tabla 1.4: Herramientas de Programación utilizadas

## Información de Planta FV

Se estructura la información de diseño de la planta 1.1.2 de manera no relacional para alojar esta información en la base de datos 'BD Planta FV'. El modelo de datos o 'metadatos' en este caso, sigue el modelo presentado en la figura 1.5. Para incorporar una nueva planta al sistema de monitoreo se debe ingresar la información de planta a esta base de datos.

## Variables Eléctricas de Planta

Estos datos están disponibles en el inversor maestro de la planta FV. Se instaló un *Data Manager* para enviar la información del inversor al servidor de la marca del inversor. La marca de inversores de la planta de estudio cuenta con una plataforma *web* para la supervisión y el análisis de instalaciones FV, es decir, un sistema de monitoreo remoto para plantas FV. Además el servicio ofrecido por *Fronius* cuenta con su propia API, la cual permite la extracción de los datos eléctricos de planta como la corriente CC/CA, voltaje CC/CA a través de su servidor *Fronius Solar.web*.

## Variables Medioambientales del Sitio

En esta sección se resumen las bases de datos medioambientales utilizadas en la elaboración del sistema de monitoreo remoto para plantas FV. En la selección de estas bases de datos fueron considerados tres aspectos: facilidad de implementación en la extracción de datos, cantidad de consultas gratuitas, y presencia en Santiago de Chile.

|                    |  |
|--------------------|--|
| Data Manager       | Dispositivo electrónico que transmite datos medidos por el inversor como corriente, voltaje y potencia; hacia un servidor web. |
| DW                 | Alojada en BigQuery. Es en donde se almacenan todos los datos relevantes para el modelamiento.                                 |
| BD Eléctrica       | Alojada en BigQuery. Es en donde se almacenan todos los datos eléctricos relevantes.   |
| BD Ambiental       | Alojada en BigQuery. Es en donde se almacenan todos los datos medioambientales relevantes                                      |
| BD Planta FV       | Alojada en MongoDB. Es en donde se alojan los datos característicos de cada planta FV.   |
| Máquinas Virtuales | Alojadas en Digital Ocean. Es la máquina encargada de realizar los procesos del ELT.   |
| Piranómetro        | Es un sensor de radiación que mide la radiación global horizontal del sitio con un frecuencia de 5 minutos.                    |
| Computadoras       | Para el análisis en tiempo real de la planta FV.   |

Tabla 1.5: Descripción de componentes de la infraestructura tecnológica

Cada base de datos medioambiental posee sus propios modelos para la estimación de las variables ambientales. Estos modelos no son presentados en esta memoria pues no son relevantes para la elaboración de un sistema de monitoreo remoto. No obstante, puede ser necesario su uso para una mejora en la calidad de los datos otorgados por el sistema de monitoreo remoto.

### *Solcast*

Desde el año 2017 la empresa *Solcast*, especializada en datos para estudios de plantas FV, ha ofrecido bases de datos medioambientales, con datos para cualquier lugar del planeta. Este proveedor valida su modelo de datos de radiación haciendo uso de mediciones en tierra por parte de sus *partners: Australian Bureau of Meteorology y US Earth System Research Laboratory* [14]. Los datos utilizados son de una resolución espacial de 1 kilómetro y tienen una periodicidad de 30 minutos. Para los días despejados dice poseer un sesgo de 1,5%. Por otra parte, para los días nublados anuncia un sesgo de 8% [13].

La extracción de datos es vía API, lo que permite diseñar un sistema de descarga de datos de manera periódica, y en consecuencia, da la funcionalidad de análisis en tiempo real al sistema de monitoreo. Además otorga a cada cuenta una cantidad de créditos para el libre uso de sus datos.

### *Merra*

Es un proveedor de datos de alcance global, que permite la descarga gratuita de estos. Poseen datos desde 1980 en su base de datos, lo cual lo hace atractivo para estudios históricos de datos ambientales. La resolución espacial de sus datos es de 32 kilómetros y tienen una periodicidad de 60 minutos, pudiendo obtener una periodicidad de 1 minuto vía ajuste lineal. La extracción de datos puede ser realizada vía HTTP, permitiendo una fácil integración con el desarrollo informático necesario para la extracción de datos.

La documentación de *Merra* asegura que sus datos son evaluados en distintos lugares del globo contra instrumentos de alta calidad (es decir, con un error menor o igual al 5%). Por no tener información del proveedor acerca del error en sus mediciones en Chile es que se presenta en la tabla 1.6 un resumen de un estudio de validación en Buenos Aires, Argentina (buscando cita).

| Componente de Radiación     | Raíz del Error Cuadrático Medio | Error de Sesgo Medio |
|-----------------------------|---------------------------------|----------------------|
| Radiación Global Horizontal | 103 %                           | -5 %                 |
| Radiación Horizontal Difusa | 83 %                            | 22 %                 |

Tabla 1.6: Tabla resumen de evaluación de datos de *Merra* en Buenos Aires, Argentina

## 1.2. Métodos

En esta sección se dan a conocer los métodos utilizados en el trabajo de memoria. Existen tres métodos empleados. Los primeros son utilizados para medir la calidad de los datos de radiación de los proveedores. Los segundos apuntan a la arquitectura tecnológica del sistema de monitoreo y el modelo de datos usado. Los terceros se utilizaron para el modelamiento de la potencia eléctrica generada y el cómputo de los KPIs de la planta FV.

La solución propuesta para el sistema de monitoreo remoto contempla un conjunto de componentes para la planta FV. Notar que las bases de datos de proveedores (Solcast y *Merra*) y la base de datos de la solución reemplazan al sensor de radiación y la estación climática, como se muestra en la figura 1.4 respecto de la figura 1.1.

Este conjunto de componentes se basa en datos ambientales disponibles y no en mediciones en la planta FV. Para lograr la adquisición y uso de los datos ambientales fue necesario desarrollar una arquitectura informática que está basada en las componentes de la planta y permitió el monitoreo remoto de la misma.

### 1.2.1. Evaluación de Calidad de Bases de Datos Medioambientales

La metodología consiste en comparar los datos de radiación *GHI* de los proveedores con datos medidos por un piranómetro en el área de estudio. La actividad consistió en el cálculo de estadísticos para la diferencia de los datos de proveedores y medidos en el sitio [11]. Además se hizo uso de datos proporcionados por dos universidades para poder realizar el estudio en tres sitios distintos, Universidad de Santiago de Chile en Estación Central, Universidad de Chile en el Cerro Calán y Planta Piloto, San Bernardo. La evaluación de los datos se resume en el cálculo de dos métricas, la raíz el error cuadrático medio (RMS) y la media del error parcial (MBE). Estas métricas deben satisfacer ciertas restricciones para poder considerar que la fuente de datos es de buena calidad.

#### Estadísticos

La evaluación de recursos solares es la caracterización de la radiación solar disponible en un sistema de conversión, en una locación específica y en un periodo histórico de tiempo de interés. Para lograr dicha caracterización se introducen dos estadísticos de uso común en el

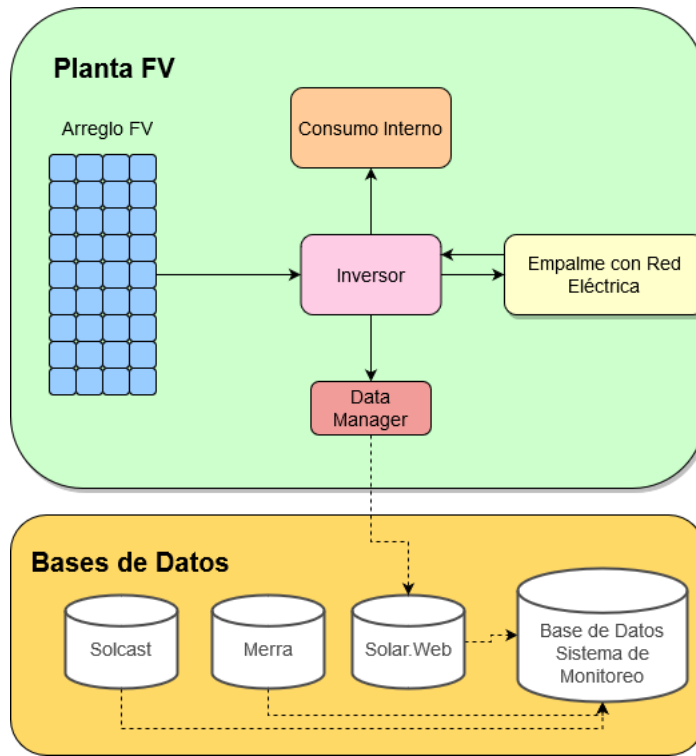


Figura 1.4: Ilustración explicativa de las componentes de una planta FV que utiliza el sistema de monitoreo desarrollado

análisis de series de tiempo. Estos son: la raíz del error cuadrático medio ( $RMS$ ) y el error de sesgo medio ( $MBE$ ).

Sea  $\{\theta_i\}_{i=1}^N$  una sucesión de datos de  $GHI$  medidos por un piranómetro (sensor de radiación) y sea  $\{\hat{\theta}_i\}_{i=1}^N$  datos obtenidos por alguna fuente de datos satelitales para el sitio correspondiente al lugar del piranómetro, y durante el mismo periodo de tiempo. Por simplicidad se asume que los datos tienen la misma frecuencia de muestreo es decir, los índices de las sucesiones corresponden al mismo momento tanto para el piranómetro como para datos satelitales.

### $RMS$

El error cuadrático medio es un estadístico insesgado, más sensible que el  $MBE$  a diferencias de los datos con el valor promedio de los mismos, esto pues, la diferencia está elevada al cuadrado. Otra característica del error cuadrático medio es que crece con la cantidad de datos  $N$ . Para poder normalizar su valor, se usa el error cuadrático medio relativo, el cual denotaremos de la misma manera ( $RMS$ ), cuando el  $RMS$  es expresado porcentualmente se referirá al error cuadrático medio relativo.

Para calcular el  $RMS$  de los datos de radiación, primero se debe definir el intervalo de tiempo ha ser analizado, por ejemplo horario, diario o mensual. En cada caso se deben tomar promedios de manera de obtener nuevas sucesiones que representan el intervalo de tiempo a analizar. Estos promedios los denotaremos de la misma manera que la sucesión original  $\{\theta_i\}_{i=1}^N$  y  $\{\hat{\theta}_i\}_{i=1}^N$ . Luego, se calcula el error cuadrático medio relativo como en la ecuación 1.1



$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(\theta_i - \hat{\theta}_i)^2}{\bar{\theta}}} \quad (1.1)$$

donde  $\bar{\theta}$  es el promedio de la sucesión.

*MBE*

De manera similar se puede obtener la serie de los promedios diarios desde los datos iniciales. Así se calcula el *MBE* relativo al promedio de la sucesión como

$$MBE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(\theta_i - \hat{\theta}_i)}{\bar{\theta}} \quad (1.2)$$

donde  $\bar{\theta}$  es el promedio de la serie diaria. Este estadístico permite entender si los datos de la fuente tienen una tendencia a subestimar o sobreestimar los datos empíricos. Se considera bueno si se cumple  $MBE \leq 5\%$  y malo si se cumple  $MBE \geq 10\%$

Específicamente se evaluarán datos ambientales de *GHI* para los proveedores *Solcast* y *Merra* a partir de mediciones realizadas por sensores en los sitios de Cerro Calán (Universidad de Chile), Estación Central (Universidad de Santiago de Chile) y San Bernardo (Planta Piloto). Se calculan los estadísticos *RMS* para promedios horarios y *MBE* para promedios diarios, se exponen los resultados en tabla y se grafica la distribución del error para los pares (*Solcast*, Cerro Calán), (*Solcast*, Estación Central), (*Solcast*, San Bernardo), (*Merra*, Cerro Calán), (*Merra*, Estación Central). Los requisitos para realizar un estudio horario son:

1. Mediciones de *GHI* realizados por un sensor de buena calidad (error menor al 5%) con una frecuencia de muestreo menor a 1 hora y datos de al menos de 6 meses de corrido.
2. Datos *GHI* de fuentes de datos satelitales, con frecuencia de muestreo menor a 1 hora, durante el mismo periodo de tiempo de las mediciones realizadas por el sensor de radiación.

Según Gueymard y Myers (2008) [4] se considera que:

*RMS* es aceptable, si  $RMS \leq 15\%$

*RMS* no es aceptable, si  $RMS \geq 20\%$

*MBE* es aceptable, si  $MBE \leq 5\%$

*MBE* no es aceptable, si  $MBE \geq 10\%$

Los periodos analizados varían según la disponibilidad de datos de sensor para los sitios mencionados. A continuación se dan a conocer los periodos con datos de sensor (piranómetro) disponibles para cada sitio:

- **Estación Central:** Desde el 30-05-2018 al 23-01-2019
- **Cerro Calán:** Desde el 30-05-2018 al 24-05-2019
- **San Bernardo:** Desde el 15-07-2019 al 31-11-2019

### 1.2.2. Modelo de Datos del Sistema de Monitoreo Remoto

Las bases de datos BigQuery y MongoDB han sido utilizadas con un modelo de datos acorde a las componentes relevantes de la planta FV y las variables necesarias para el modelamiento de la potencia eléctrica generada. La base de datos alojada en BigQuery almacena en una tabla datos ambientales como radiación, temperatura y velocidad del viento, en otra tabla se alojan los datos eléctricos como series de tiempo de corriente, voltaje y potencia. Luego del cálculo de KPIs de planta estos son almacenados en una tabla para KPIs. Por otra parte la base de datos alojada en MongoDB almacena datos relevantes del diseño de la planta FV, *datasheets* de inversores y *datasheets* de módulos FV.

El modelo de datos NoSQL para MongoDB se resume en el esquema 1.5. Este esquema muestra las relaciones entre la información de la planta y los *datasheets* de inversores y módulos. Se han incluido datos para la aplicación del sistema de monitoreo remoto a otras plantas FV, como lo son los identificadores de planta, de cliente y usuarios.

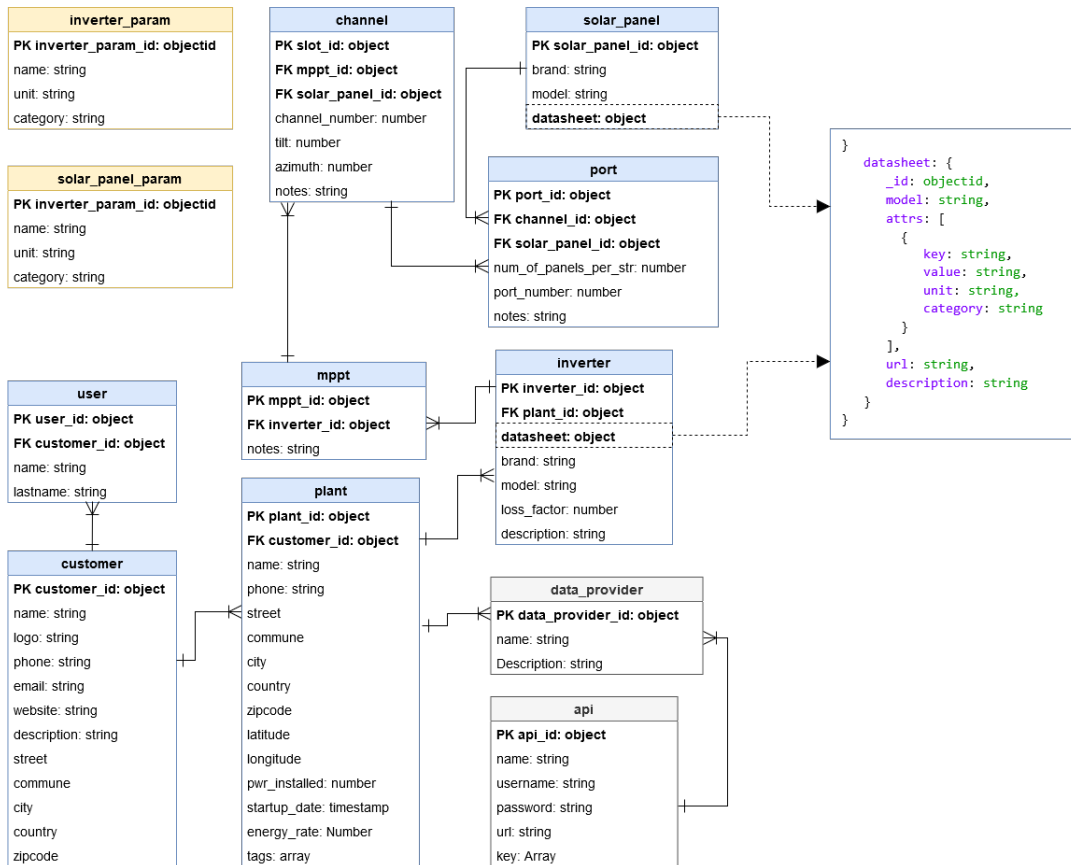


Figura 1.5: Modelo de metadatos planta FV

Los datos alojados en BigQuery presentan un modelo de datos SQL. En la figura 1.6 se muestra el esquema de datos usado para el almacenamiento de los datos medioambientales.

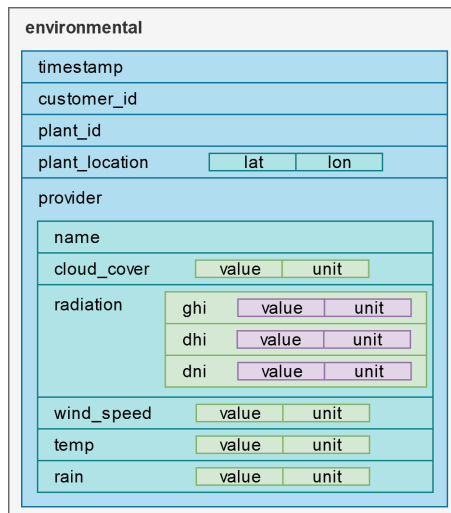


Figura 1.6: Esquema de datos ambientales

Los datos eléctricos producidos por la planta FV son almacenados con el esquema que muestra la figura 1.7.

### 1.2.3. Modelamiento de Potencia Eléctrica Generada

Los datos alojados en las bases de datos para la solución son usados para modelar la radiación, temperatura y la potencia eléctrica generada. Estos modelos son implementados en lenguaje *Python* y almacenados en el repositorio de *Git-Hub* del proyecto. Al proceso de modelar datos mediante archivos del repositorio lo llamaremos transformación de datos.

#### Modelo de Radiación

Los sistemas de conversión de energía solar dependen de un combustible de baja densidad energética: la radiación solar. Esta es conducida por el clima, cuya potencia por área varía según el espacio-tiempo. Existen una serie de factores que influyen en los niveles de radiación solar. Entre estos factores está la radiación producida por el sol, la masa de aire que debe traspasar la radiación, la presencia de aerosoles, el ozono, las nubes y la elevación del terreno.

Existen satélites cuya función es cuantificar los factores que influyen en los niveles de radiación en un espacio y tiempo determinados. Los modelos satelitales aprovechan esta información para estimar la radiación solar terrestre a partir de la radiación extraterrestre, sin la necesidad de medir mediante un instrumento o sensor en tierra, es decir, utilizan técnicas de percepción remota.

La radiación solar total se divide en tres componentes al pasar por la atmósfera: Directo, difuso y global. La figura 1.8 muestra la energía acumulada en un año de radiación por longitud de onda para parte del espectro de longitudes de onda de la luz. A continuación se definen las tres componentes de la radiación terrestre.

La figura 1.9 ilustra los componentes de la radiación terrestre. Estas componentes son calculadas en vista de poder obtener la radiación que reciben los módulos. La radiación de

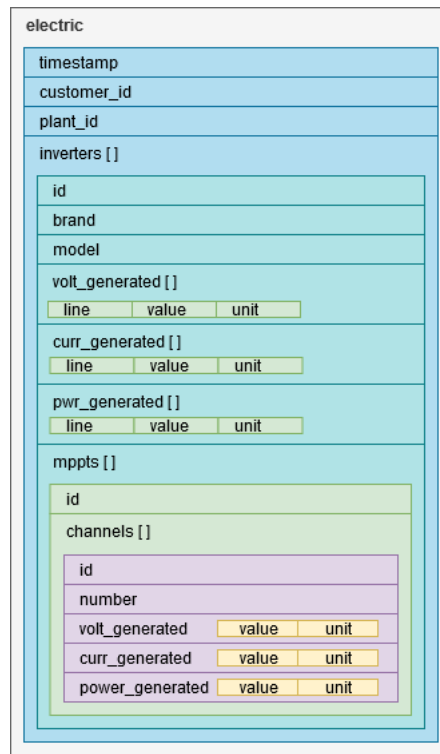


Figura 1.7: Esquema de datos eléctricos

interés en el modelamiento de generación fotovoltaica es llamada radiación de plano de arreglo y corresponde a la radiación incidente al plano en el que se encuentran los paneles.

La ecuación 1.3 relaciona las tres componentes de la radiación terrestre:

$$GHI = DNI \times \cos(SZA) + DHI \quad (1.3)$$

donde  $SZA$  es el ángulo solar zenital, es decir, el ángulo de elevación del sol con respecto a un sistema inercial en un punto sobre la tierra como se muestra en la figura 1.10.

También será necesario considerar las componentes de la radiación solar en condiciones de cielo totalmente despejado. Por ello, denotemos como  $GHI_{clear}$ ,  $DNI_{clear}$  y  $DHI_{clear}$  a las componentes de la radiación en condiciones de cielo despejado, i.e. sin atenuación por nubosidad.

La finalidad de definir los componentes de radiación solar es la de poder estimar la radiación incidente a un conjunto de módulos en un plano fijo, que llamamos radiación de plano de arreglo. La radiación de plano de arreglo simplificará la ecuación para modelar la generación eléctrica.

Para calcular la radiación de plano de arreglo es necesario conocer el ángulo de inclinación de los paneles, el cual se define a continuación y se muestra en la figura 1.11.

Conocido el ángulo tilt se puede calcular el ángulo de incidencia al panel de un rayo de

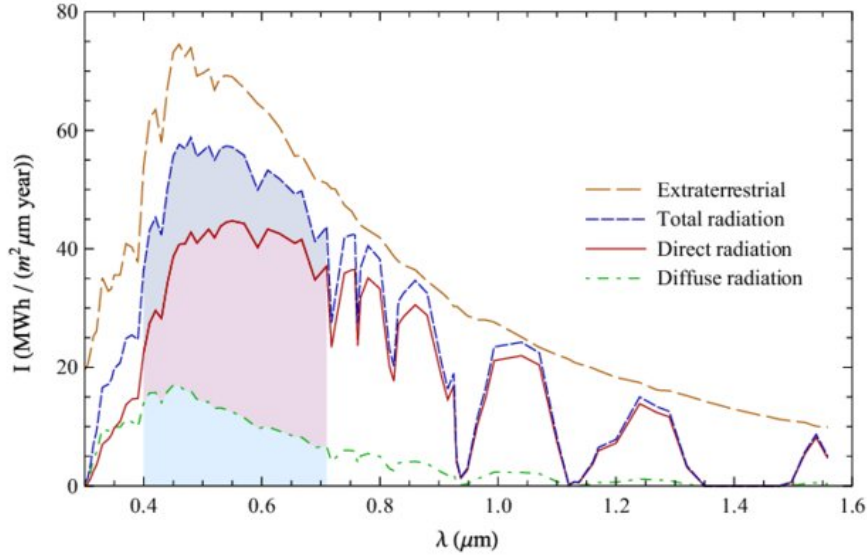


Figura 1.8: Espectro de radiación solar extraterrestre y a nivel del suelo acumulada durante un año sobre una superficie horizontal en Dubai

un haz de luz:

$$AOI = \cos^{-1}\{\cos(\theta_{SZA}) \cos(\theta_T) + \sin(\theta_{SZA}) \sin(\theta_T) \cos(\theta_{T,surf} - \theta_{A,Array})\} \quad (1.4)$$

donde  $\theta_A$ ,  $\theta_{SZA}$  son los ángulos azimutal y cenital solares, respectivamente.  $\theta_T$ ,  $\theta_{A,Array}$  son los ángulos tilt y azimutal de los paneles.

Una vez conocido el ángulo de incidencia de la luz al panel se pueden calcular los componentes de la radiación de plano de arreglo como se muestra en las ecuaciones 1.5, 1.6, y 1.7.

La radiación de rayo POA se calcula ajustando el *DNI* por el ángulo de incidencia *AOI* como se muestra en la ecuación 1.5.

$$E_b = DNI \times \cos(AOI) \quad (1.5)$$

La radiación difusa POA se calcula según el modelo isotrópico de difusión como se muestra en la ecuación 1.6.

$$E_d = DHI \times \frac{1 + \cos(\theta_{T,surf})}{2} \quad (1.6)$$

La radiación reflejada POA se calcula como función del *GHI*, la reflectancia (albedo) de la superficie y el ángulo tilt de la superficie  $\theta_{T,surf}$  como en la ecuación 1.7.

$$E_g = GHI \times \text{albedo} \times \frac{(1 - \cos(\theta_{T,surf}))}{2} \quad (1.7)$$

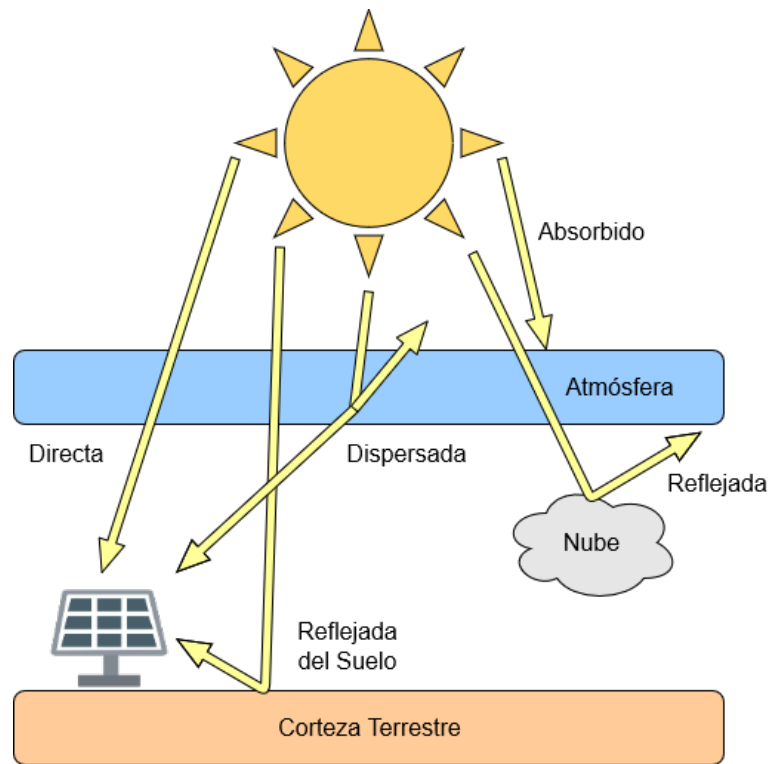


Figura 1.9: Componentes de la radiación solar dentro de la atmósfera

Luego, se puede estimar la radiación POA usando las ecuaciones 1.5, 1.6 y 1.7 como se muestra en la ecuación 1.8.

$$E_{POA} = E_b + E_g + E_d \quad (1.8)$$

### Modelo de Temperatura de Módulo FV

Para lograr el modelamiento de la potencia eléctrica generada, se ha mencionado que es necesario estudiar la temperatura. Para fijar ideas, se presentaran un modelo térmico que relacionan dos temperaturas de interés: la temperatura ambiente  $T_a$  y la temperatura de la cara trasera del módulo sometido a esa temperatura ambiente  $T_m$

Existe una tercera variable ambiental influyente en la generación fotovoltaica, aunque no directamente, esta tercera variable es la velocidad del viento o *wind speed* [WS]. Esta variable afecta la temperatura de los módulos, pues el aire en contacto con el módulo se calienta, y en consecuencia, la temperatura del módulo decrece.

El modelo térmico está basado en resultados empíricos y fue desarrollado por *Sandia National Laboratories* [1]. Los coeficientes empíricamente determinados ( $a, b$ ) usados en el modelo son estimados usando una gran cantidad de mediciones, de muchos días diferentes, con el módulo en condiciones de equilibrio térmico (en condiciones de cielo despejado de manera de evitar un transiente debido a nubes intermitentes). Los coeficientes determinados están influenciados por las propiedades del módulo, la configuración de montaje, el lugar y la altura en donde la velocidad del viento es medida.

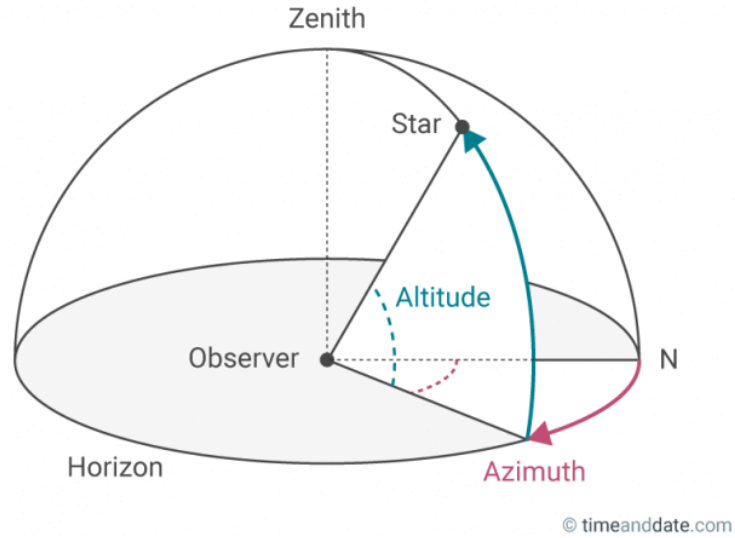


Figura 1.10: Ángulo cenital y azimutal del Sol

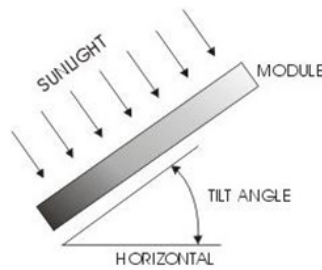


Figura 1.11: Ángulo tilt de un panel FV

La práctica meteorológica estándar para el muestreo de velocidad del viento y dirección, consiste en posicionar el instrumento de medición (anemómetro) a una altura de 10 metros, en un entorno con un mínimo de edificios y estructuras que obstruyan el movimiento del aire. Este estándar es seguido por los proveedores de datos meteorológicos para poblar sus bases de datos. Una vez tomadas las medidas del aire y de la temperatura del módulo, se debe calibrar el modelo térmico determinando los coeficientes ( $a, b$ ) de la ecuación 1.9.

$$T_m = G_{poa} \cdot e^{a+b \cdot WS} + T_a \quad (1.9)$$

donde los términos de la ecuación 1.9 se refieren a:

- $T_m$  temperatura de la cara trasera del módulo [ $^{\circ}C$ ]
- $T_a$  temperatura ambiente del aire [ $^{\circ}C$ ]
- $G_{poa}$  radiación solar incidente a la superficie del módulo [ $W/m^2$ ]
- $WS$  Velocidad del viento medida a un estándar de 10 metros de altura [ $m/s$ ]
- $a$  coeficiente empíricamente determinado que establece el límite superior para la temperatura del módulo a bajas velocidad de viento y alta radiación solar

- $b$  coeficiente empíricamente determinado que establece la tasa a la cual la temperatura del módulo decae cuando la velocidad del viento crece

Los coeficientes se estiman mediante una regresión lineal de los datos tomados para la ecuación 1.10.

$$\log\left(\frac{T_m - T_a}{G_{poa}}\right) = b \cdot WS + a \quad (1.10)$$

De esta forma se determina la temperatura de la cara trasera del módulo  $T_m$ . Para los módulos FV a los cuales se orienta la memoria, se puede suponer que la temperatura de sus celdas  $T_c$  es igual a  $T_m$ .

### Modelo de Potencia Eléctrica Generada

Se quiere modelar la potencia eléctrica generada por un sistema fotovoltaico bajo ciertas condiciones de radiación, temperatura y velocidad del viento. Para esto, se debe comenzar por modelar la potencia eléctrica generada por un módulo FV. Se presenta un modelo de generación fotovoltaica el cual será el modelo que se usó para estimar la generación fotovoltaica de una planta FV.

El siguiente modelo, llamado modelo con factor de pérdida, fue desarrollado en base a datos obtenidos por MPPTs. Un dispositivo de seguimiento de punto máximo de potencia o en inglés *maximum power point tracker* (MPPT) es un instrumento que recibe la corriente generada por módulos FV, cuyo objetivo es maximizar la extracción de potencia de estos. El modelo con factor de pérdida, es lineal, fue hecho para lograr predecir la potencia generada y busca mejorar la integración del sistema fotovoltaico a la red de distribución eléctrica del país. Este modelo no permite obtener el voltaje ni la corriente por lo que es un modelo de estado-estable [8].

En esta memoria se presentarán distintas aplicaciones de este modelo, situandolo como un modelo versátil en sus aplicaciones, capaz de modelar diferentes tamaños de planta FV, y con una fácil implementación computacional para grandes volúmenes de datos.

En lo que sigue se presenta formalmente el modelo con factor de pérdida. Para comenzar la notación utilizada:

- $P_{fv}$  potencia de salida de la celda FV
- $P_{sn}$  capacidad medida de la celda FV
- $G_{poa}$  radiación del plano del arreglo de módulos FV
- $STC$  condiciones estándar de prueba
- $G_{stc}$  radiación en  $STC$
- $T_m$  temperatura del módulo FV
- $T_r$  temperatura de referencia fabricante
- $f_{fv}$  factor de pérdida de la celda FV
- $K$  coeficiente de eficiencia según temperatura del módulo



La ecuación que modela la potencia generada por una celda fotovoltaica está dada por 1.11.

$$P_{fv} = P_{sn.fv} \left( \frac{G_{poa}}{G_{stc}} \right) [1 + K(T_r - T_m)] \quad (1.11)$$

La cual es una ecuación lineal tanto en radiación como en temperatura. La potencia generada modelada para un módulo FV corresponde al área efectiva del módulo  $A$  multiplicado por la potencia generada modelada por las celdas que lo componen, como se muestra en la siguiente ecuación 1.12.

$$P_m = A \cdot P_{fv} \quad (1.12)$$

Luego, se puede obtener la potencia generada de un *string* FV, multiplicando la potencia generada por sus módulos por el número de módulos del *string*. Finalmente, se estima la potencia generada por el sistema sumando la potencia generada por cada *string* que lo compone. Hasta el momento se ha hablado de potencia generada como referencia para potencia generada del lado de corriente continua (CC) de la planta FV. Los MPPT reciben esta potencia (CC) de parte de los *string*, para llegar al inversor, donde es transformada en potencia de corriente alterna (AC). En ese proceso también hay una pérdida de energía producto de la eficiencia **del inversor**, no confundir con el factor de pérdida utilizado en el modelo de generación, el cual refiere a la eficiencia del módulo.

Este modelo de generación es la base sobre la cual se construye el sistema de monitoreo de sistemas fotovoltaicos de esta memoria. Su principal función es permitir el análisis del desempeño de un sistema fotovoltaico mediante el uso de indicadores dependientes de la potencia modelada y potencial real.

#### 1.2.4. Reporte de KPIs de Planta

Los KPIs para un sistema de monitoreo para plantas FV debe proporcionar información clave para la evaluación del diseño, operación y mantenimiento de la planta FV. Los indicadores considerados para la solución en esta memoria se dividen en: indicadores de energía, indicadores de disponibilidad e indicadores de desempeño. Estos indicadores conforman un conjunto básico de métricas a reportar a la planta FV. **Energía Generada:**

La energía eléctrica CA generada por la planta FV en un intervalo de tiempo  $[a, b]$  se calcula por medio de la ecuación 1.13.

$$E_{generada} = \int_a^b P_{generada}(t) dt \quad (1.13)$$

en donde

- $E_{generada}$  es la energía eléctrica CA generada por la planta FV.

- $P_{generada}$  es la función potencia eléctrica CA generada por la planta FV.

### Energía Estimada:

La energía estimada se calcula a partir de la potencia eléctrica CA obtenida por el modelo 1.11 tal y como se obtiene la energía generada a partir de la potencia generada.

### Disponibilidad ambiental para generación FV:

La disponibilidad ambiental para la generación FV en un intervalo  $[a, b]$  corresponde al tiempo total para el cual las condiciones ambientales implican una potencia eléctrica CC superior a la potencia eléctrica CC de encendido de los inversores. Tal como se muestra en la ecuación 1.14.

$$D = \int_a^b \chi_{\{P_{estimada}(t) > P_0\}}(t) dt \quad (1.14)$$

en donde

- $D$  es la disponibilidad ambiental para generación FV.
- $\chi$  es la función indicatriz.
- $P_0$  es la potencia mínima para la cual se encienden los inversores.

### Tiempo de no operación de la planta FV:

El tiempo de no operación de la planta FV en un intervalo  $[a, b]$  es el tiempo total  $\mathcal{I} \subset [a, b]$  para el cual se cumple:

- $P_{generada}(t) = 0 \forall t \in \mathcal{I}$ .
- $\exists \theta \subset [a, b]$  conjunto de tiempos de disponibilidad ambiental para operación tal que  $\mathcal{I} \subset \theta$

se calcula según la ecuación 1.15

$$N = \int_a^b \chi_{\{P_{generada}(t)=0, P_{estimada}(t) > P_0\}}(t) dt \quad (1.15)$$

en donde  $N$  es el tiempo de no operación en el intervalo  $[a, b]$ .

### Tasa de desempeño:

La tasa de desempeño en un tiempo  $t$  corresponde al cociente entre la potencia eléctrica CA generada y estimada en el tiempo  $t$ , se calcula mediante la ecuación 1.16.

$$PR(t) = \frac{P_{generada}(t)}{P_{estimada}(t)} \quad (1.16)$$

en donde  $PR$  es la tasa de desempeño.

### Tasa de desempeño activo:

La tasa de desempeño activo se define en la ecuación 1.17.

$$PR_{active}(t) = \begin{cases} PR(t), & \text{sí } P_{generada}(t) > 0 \\ 0, & \text{sí no} \end{cases} \quad (1.17)$$

## 1.2.5. Método de Estimación de Potencia Eléctrica Generada y KPIs

El método de estimación de la potencia eléctrica generada consiste en un conjunto de procesadores en el Lenguaje Python los cuales implementan los modelos presentados. Los procesadores son orquestados por la herramienta Airflow, la cual está encargada de descargar los datos eléctricos y ambientales desde los proveedores y alojarlos en la base de datos del sistema de monitoreo remoto. Al final del día calcula la potencia eléctrica generada utilizando los Scripts de modelamiento de la librería y los almacena en la tabla de KPIs. Esto se resume en la figura 1.12.

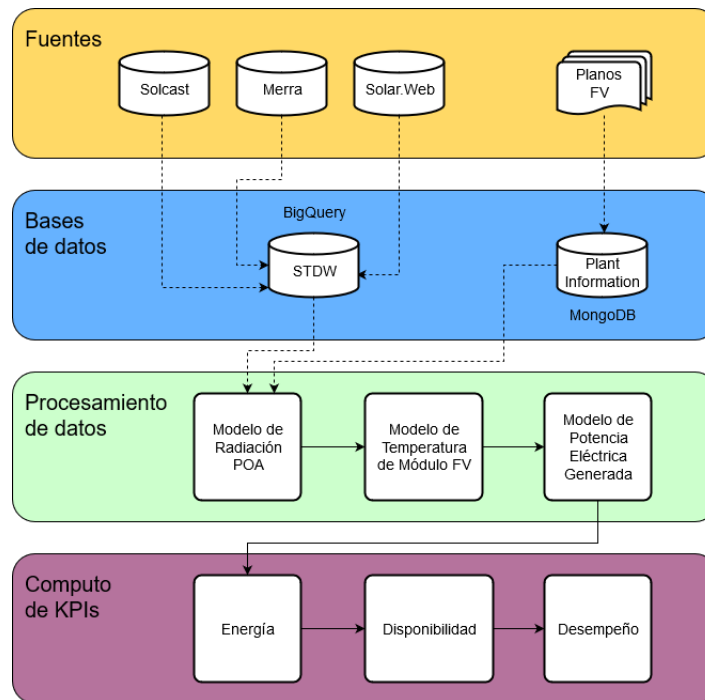


Figura 1.12: Diagrama general del método

# Capítulo 2

## Resultados

En este capítulo se presentan los resultados con respecto a los objetivos planteados en la introducción . En la primera sección 2.1 se presentan los requerimientos para el desarrollo del sistema de monitoreo remoto para plantas FV. En la segunda sección 2.2 se presentan los resultados de los modelos de radiación *POA*, temperatura y potencia eléctrica. En la tercera sección 2.3 se muestran estadísticas de error de las bases de datos medioambientales. En último lugar, en la secciónrefsec:reporte se presentan los resultados obtenidos a partir del sistema de monitoreo remoto de plantas FV.

### 2.1. Requerimientos para un Sistema de Monitoreo Remoto de Plantas FV

La lista de requerimientos para la construcción de un sistema de monitoreo remoto de plantas FV depende de lo que se quiera lograr con el mismo. En esta sección se presentan los requerimientos levantados para el desarrollo de un sistema de monitoreo remoto que no utilice sensor de radiación, ni estación meteorológica. Los requerimientos fueron cumplidos por los materiales y métodos presentados en el capítulo anterior.

Se consideraron requerimientos todas aquellas funcionalidades del sistema de monitoreo remoto, indispensables para el cumplimiento de los objetivos planteados. Debido a que la lista de requerimientos, desde el punto de vista de tecnologías de la información, es bastante extenso, nos concentramos aquí en los requerimientos involucrados en el modelamiento de la potencia eléctrica generada. Los requerimientos mínimos para desarrollo del sistema de monitoreo se resumen en la tabla 2.1.

Estos requerimientos otorgan la capacidad de modelar la potencia eléctrica, calcular los indicadores clave, y almacenar los resultados en un *Data Warehouse*. Desde el *Data Warehouse* se pueden obtener los valores relevantes a través de SQL. En la tabla 2.2 se muestra el emparejamiento de requerimientos con los materiales y métodos de la metodología 1.

|                       |   |
|-----------------------|---|
| Datos eléctricos      | Base de datos de mediciones de voltaje y corriente realizadas por los inversores en la planta |
| Datos de planta       | Planos de diseño utilizados para la construcción de la planta FV                              |
| Datos ambientales     | Base de datos ambientales para el modelamiento  |
| <i>Scheduler</i>      | Herramienta que permita la descarga periódica de datos  |
| Pre-procesador        | Procesador de datos que corrige desfase temporal, <i>missing values</i> , entre otros         |
| <i>Data Warehouse</i> | Base de datos para uso exclusivo del sistema de monitoreo                                     |
| Procesador            | Conjunto de Scripts para el modelamiento, generación de gráficos y reporte                    |

Tabla 2.1: Tabla de requerimientos para el sistema de monitoreo remoto

|                       |  |
|-----------------------|--|
| Datos eléctricos      | Son enviados al servidor Solar.web por el Datamanager de la planta, se descargan vía API |
| Datos de planta       | Se alojan en MongoDB utilizando un modelo de datos                                       |
| Datos ambientales     | Se obtienen vía API de los proveedores <i>Solcast</i> y <i>Merra</i>                     |
| <i>Scheduler</i>      | APACHE <i>Airflow</i> es el encargado de administrar las descargas                       |
| Preprocesador         | Librerías como Pandas y Scikit-Learn permiten el pre-procesamiento de los datos          |
| <i>Data Warehouse</i> | Es alojado en BigQuery   |
| Procesador            | Se construyó usando Python y los métodos de modelamiento                                 |

Tabla 2.2: Tabla de emparejamiento de requerimientos, materiales y métodos

## 2.2. Modelamiento de Temperatura de Módulo y Radiación POA

En esta sección se presentan los resultados del modelamiento previo a la estimación de la potencia eléctrica generada. Los resultados serán presentados para el día 01-01-2020.

Según la arquitectura 1.12 presentada en la metodología, los resultados para cada paso del modelamiento son:

### Modelamiento de Radiación *POA*:

A partir de la información de radiación *GHI*, *DHI* y *DNI* del proveedor *Solcast* para la planta piloto, se obtuvieron las componentes de la radiación *POA* y la radiación *POA* global, como se muestra en la figura 2.1.

### Modelamiento de Temperatura de Módulo FV:

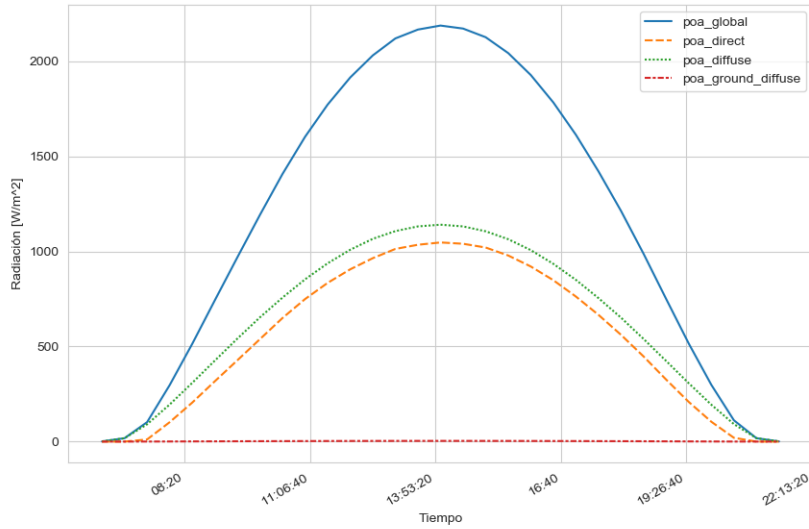


Figura 2.1: Gráfico de componentes de radiación POA modelada

Luego de calcular la radiación *POA*, se calcula la temperatura del módulo haciendo una regresión lineal a la ecuación 1.10 usando datos de temperatura de módulo y velocidad de viento obtenidos de la base de datos de pvlib [16]. Los resultados se muestran en la figura 2.2.

### Modelamiento de Potencia Eléctrica Generada:

Finalmente, se utiliza el modelo de generación de potencia 1.11 para obtener la potencia eléctrica generada por cada módulo. Luego, se suma el aporte de cada módulo para obtener la potencia eléctrica generada por la planta FV, como se muestra en la figura 2.3.

## 2.3. Calidad de bases de datos de radiación

Se presentan los resultados de la evaluación de calidad de datos ambientales con frecuencia horaria para los distintos proveedores de datos de radiación analizados. Los estadísticos se muestran en las tablas 2.3 y 2.4

| Estadístico | Estación Central | Cerro Calán | Texinco |
|-------------|------------------|-------------|---------|
| RMS         | 38.97 %          | 18.56 %     | 24.9 %  |
| MBE         | -9.64 %          | 0.36 %      | -7.22 % |
| MAE         | 14.55 %          | 7.33 %      | 8.94 %  |

Tabla 2.3: Tabla de Estadísticos para *GHI* de *Solcast* en tres sitios

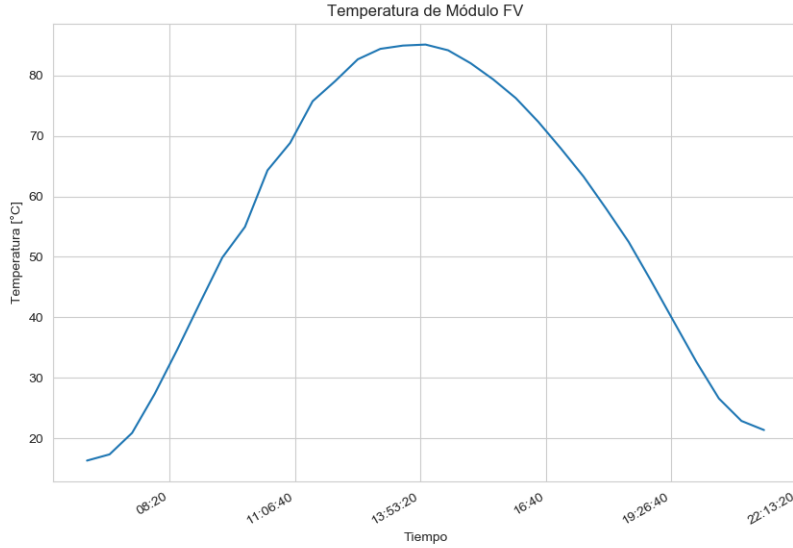


Figura 2.2: Gráfico de Temperatura de Módulo FV en Planta Piloto

| Estadístico | Estación Central | Cerro Calán |
|-------------|------------------|-------------|
| RMS         | 54.50 %          | 56.21 %     |
| MBE         | -17.99 %         | -13.73 %    |
| MAE         | 25.89 %          | 23.21 %     |

Tabla 2.4: Tabla de Estadísticos para  $GHI$  de *Merra* en dos sitios

### 2.3.1. Distribución del error

Para estudiar la calidad de los datos, se graficó la distribución del error de los proveedores para los sitios correspondientes. Los primeros histogramas corresponden a la distribución del error en los datos de radiación entregados por *Solcast*. La distribución del error ( $e$ ) corresponde a la distribución de la diferencia entre el valor de radiación  $GHI$  medido por el piranómetro en el sitio y el valor estimado por el proveedor, es decir:

$$e = GHI_{medido} - GHI_{proveedor} \quad (2.1)$$

Adicionalmente a la distribución del error se le aplica el test de normalidad de distribución *D'Agostino's K-squared test* con  $\alpha = 0,05$ . Sin importar el resultado del test de normalidad se ajusta una distribución normal al error  $e$  para poder comparar visualmente el comportamiento del error.

Supongamos que el estimado está dado por *Solcast* y el medido se hizo en Cerro Calán. Aplicando el test de normalidad se obtiene el p-valor  $4 \times 10^{-291}$ . Luego, se puede rechazar la normalidad de los datos. La distribución del error y el ajuste de la distribución normal se ve en la figura 2.4. En el gráfico se ve que la distribución del error no concentra masa

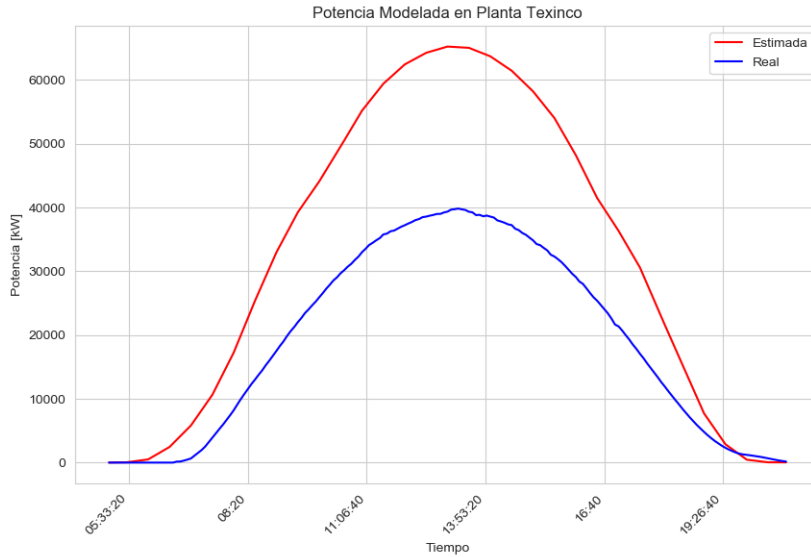


Figura 2.3: Gráfico de Potencia estimada y generada para Planta Texinco

notoriamente en torno a la media. También se puede observar que la esperanza del error es negativa, esto quiere decir que los datos de *Solcast* sobre-estiman la radiación en esperanza.

Manteniendo el proveedor y cambiando el sitio a Estación Central se obtiene la figura 2.5. El test de normalidad produce un p-valor de  $7 \times 10^{-48}$ , nuevamente la hipótesis de normalidad es rechazada. En el gráfico 2.5 se ve que la distribución del error e para *Solcast* en Estación Central concentra su masa en torno a dos puntos.

Usando como proveedor a *Merra* se presenta el mismo análisis anterior. Primero se presenta el sitio Cerro Calán en la figura 2.6. En este caso, el p-valor es  $5 \times 10^{-33}$ , es decir, hay suficiente evidencia para rechazar la normalidad de la distribución de e definido en 2.1.

Para el sitio Estación Central se observa en figura 2.7 que *Merra* también tiende a sobre-estimar la radiación *GHI*. El p-valor en este caso es de  $3 \times 10^{-108}$ , por lo que se rechaza la hipótesis de normalidad.

Según las estadísticas de la tabla 2.4 este proveedor no tiene un buen desempeño estimando radiación *GHI* en Cerro Calán y Estación Central. Sin embargo el error e distribuye de una forma que parece simétrica, en ambos sitios.

## 2.4. Reporte Mensual de Indicadores de Planta FV

Una vez calculada una estimación de la potencia eléctrica generada por la planta FV se deben calcular los indicadores clave de desempeño KPIs, los cuales por simplicidad se resumen en un reporte mensual 2.8.



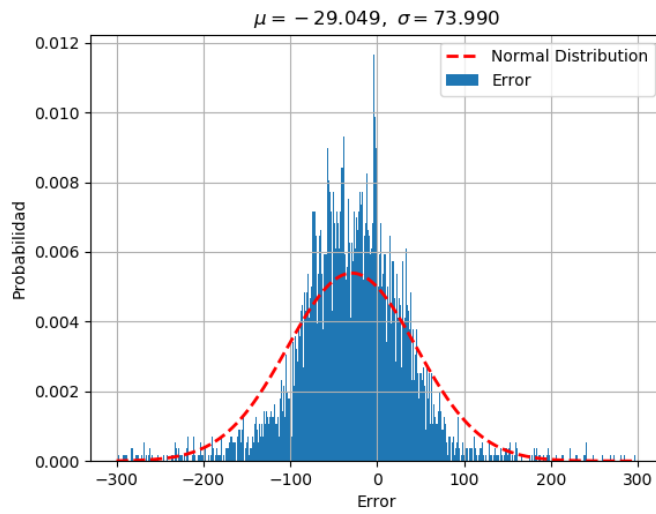


Figura 2.4: Distribución de  $e$  para proveedor *Solcast* en Cerro Calán

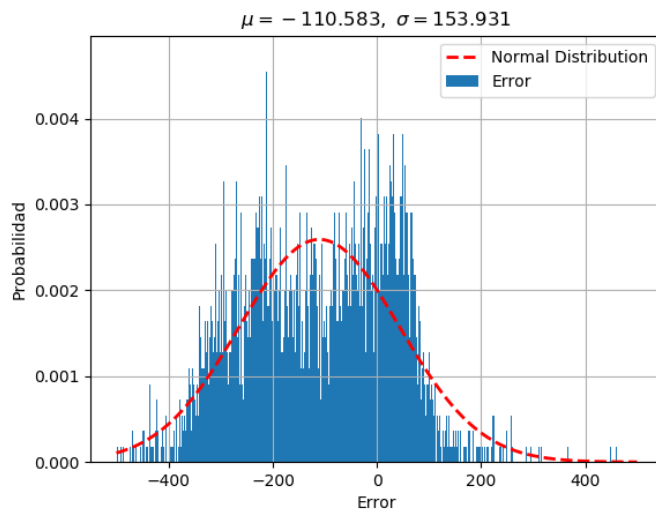


Figura 2.5: Distribución de  $e$  para proveedor *Solcast* en Estación Central

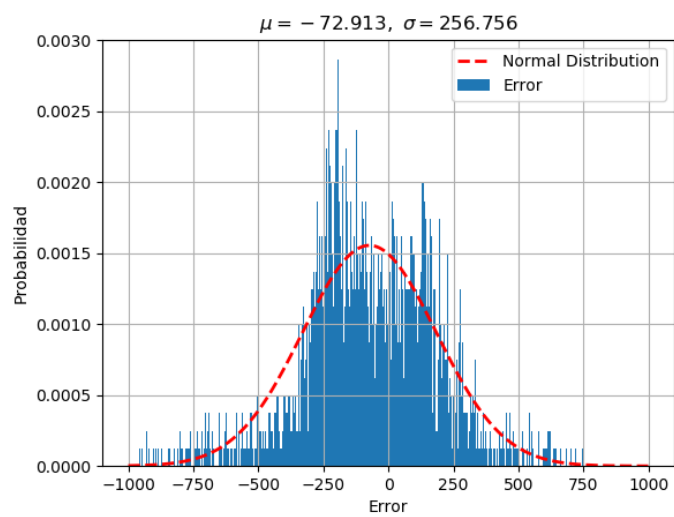


Figura 2.6: Distribución de e para proveedor Merra en Cerro Calán

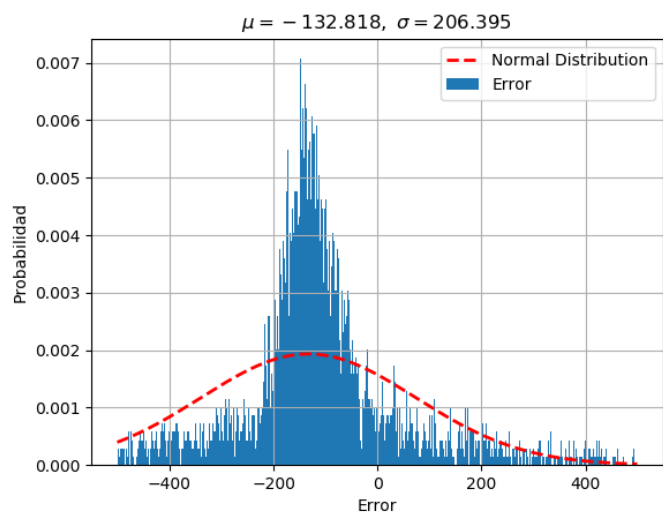


Figura 2.7: Distribución del error de Merra en Estación Central








# Reporte de Operación

Periodo Enero 2020

Texinco: San Fernando 1201, San Bernardo



## Resumen

|   |                           |             |       |
|---|---------------------------|-------------|-------|
|  | Energía generada          | 9.825       | [kWh] |
|  | Energía esperada          | 13.493      | [kWh] |
|  | Factor de disponibilidad  | 95          | [%]   |
|  | Horas sin operación       | 62          |       |
|  | Ahorro                    | 694.732     | [CLP] |
|  | Ahorro de CO <sub>2</sub> | 4.205       | [kg]  |
|  | Potencia DC/AC            | 64.8 / 65.1 | [kW]  |

## Rendimiento (PR activo)

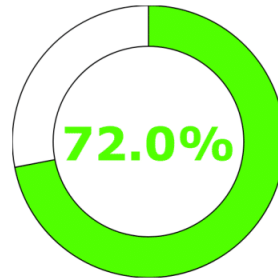


Figura 1 - Desempeño de Operación (Active PR)

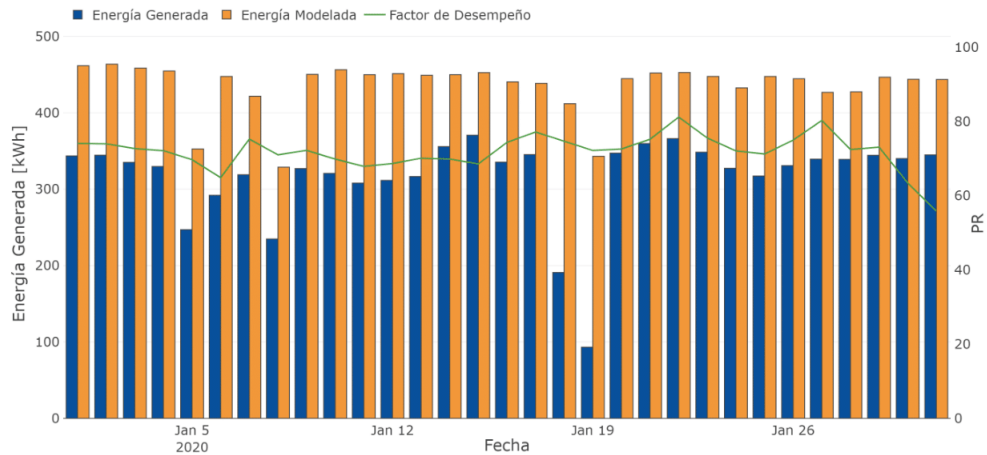


Figura 2 - Disponibilidad de operación

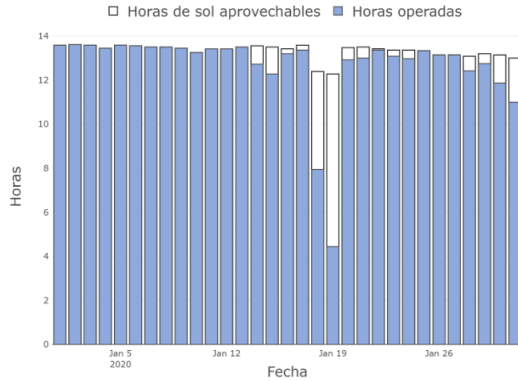


Figura 3 - Desempeño de Operación por Inversor (Active PR)

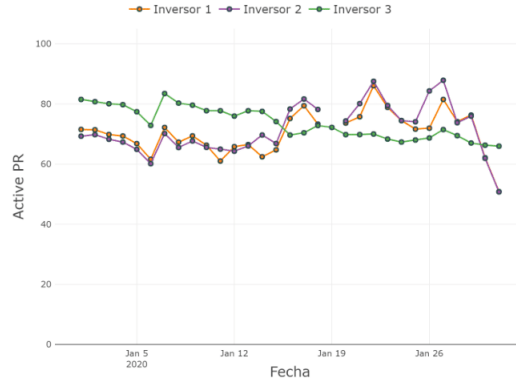


Figura 2.8: Reporte mensual de KPIs de planta FV

# Capítulo 3

## Discusión

En este capítulo se discutirán los resultados obtenidos durante el desarrollo de este trabajo. Alguno de los temas serán tratados con mayor profundidad como la calidad de los datos ambientales, mientras que otros serán discutidos a partir de los conocimientos adquiridos en el proceso de desarrollo.

### 3.1. Calidad de bases de datos de radiación

Los resultados de potencia exhibidos en 2.3 muestran cómo la potencia eléctrica estimada está por sobre la potencia eléctrica generada. Los análisis efectuados en otros días muestran la misma tendencia, por lo que se buscaron posibles causales de este fenómeno. Entre las causas consideradas están: error en el modelamiento, error de cálculo numérico, bajo desempeño de la planta FV y error en datos eléctricos o medioambientales; siendo esta última la cual se propuso estudiar. La precisión del modelamiento de potencia eléctrica generada depende de la calidad de datos utilizados. Los datos de radiación deben ser sometidos a una evaluación de calidad. Es por esta razón que se realizó un estudio en el mismo sitio, en donde se evaluó la calidad del *GHI* para los proveedores de datos medioambientales.

La incertidumbre en el error de los datos ambientales presentado en 2.3 tiene una serie de consecuencias al momento de trabajar con fuentes de datos satelitales. Principalmente se arrastra esta incertidumbre a los resultados obtenidos del modelo de generación al cual alimentan. Es por esto que el estudio del error de datos ambientales es una parte importante de cualquier proyecto que no cuente con estaciones meteorológicas y sensores de radiación en cada una de sus plantas. Dado lo anterior, se realizó una validación de fuentes de datos de radiación en tres sitios distintos y para dos proveedores de datos de radiación satelitales. Se incorporó este análisis a la librería de *Solartracker* para evaluar los datos de radiación constantemente.

Analizando el *RMS*, se puede concluir que los datos de la tabla 2.3 no cumplen con los criterios de Gueymard y Myers (2008) mostrados en ???. Es claro que los estadísticos de error son menores en el Cerro Calán. En este sitio el *RMS* no está en zona de aceptación ni de rechazo. Para los demás sitios los datos de *Solcast* caen en la zona de rechazo. Por

otra parte el *MBE* en Estación Central para *Solcast* indica una sobre-estimación más allá de lo aceptable, mientras que en Cerro Calán el *MBE* está dentro del rango aceptable. Los resultados mostrados en 2.4 no tienen ningún tipo de aceptación. El proveedor *Merra* tiene un error notablemente mayor que el proveedor *Solcast*. Es por esta razón que los análisis realizados con datos de radiación de *Solcast* tienen mayor coherencia con lo esperado de un sistema FV. Sin embargo, el proveedor *Merra* otorga acceso gratuito a mayores volúmenes de datos, en consecuencia, se mantiene el proveedor para la realización de análisis históricos.

En síntesis, ninguno de los proveedores posee distribución normal del error e para datos horarios, en cualquiera de los sitios analizados. Esto es algo a considerar al momento de realizar análisis cualitativo sobre la curva potencia eléctrica generada modelada para un SFV. No obstante el *MBE* para el caso de *Solcast* es aceptable en Cerro Calán. Por lo tanto los análisis diarios fueron realizados con este proveedor en el capítulo ???. El *RMS* presente en ambas fuentes de datos de radiación no son aceptables según ???. En el caso de *Solcast* se ve un mejor *RMS* y *MBE*. Sólo para el *MBE Solcast* se encuentra dentro del intervalo de aceptación en Cerro Calán.

Es vital para un correcto modelamiento de la generación eléctrica de un SFV que los datos de radiación *input* del modelo sean lo suficientemente certeros. Es por esto que se presenta de manera natural el mejorar los estándares de calidad de datos. Esto es posible de realizar mediante un ajuste de los datos de radiación del proveedor a los datos medidos por sensores en terreno.

En este estudio se han presentado resultados sólo para datos de *GHI*. No obstante el mismo procedimiento debe ser realizado para las variables *DHI*, *DNI* y temperatura; de manera de obtener una buena estimación de los *input* del modelo. Por otra parte, la velocidad del viento es una variable medida a una altura fija de 10 metros. No obstante, las plantas FV pueden variar en altura, factor que no ha sido considerado en el modelamiento.

## 3.2. Alternativas en el Modelamiento de Potencia Eléctrica Generada

El modelamiento de la generación eléctrica se realizó a través de un modelo que solo calcula la potencia eléctrica, dejando de lado la corriente y el voltaje. Existen modelos alternativos, entre ellos el llamado modelo del diodo [15], los cuales si calculan voltaje y corriente eléctrica. Estas dos variables son útiles al momento de detectar fallas en el funcionamiento de la sistemas FV [3]. Luego, la incorporación de un modelo más complejo (generalmente no lineal) permitiría un sistema de monitoreo con más funcionalidades.

Al no poseer una planta FV para experimentación no se han obtenido estadísticas que permitan determinar el error de modelamiento en la potencia eléctrica. Por otro lado, tampoco se utilizó la técnica de propagación de errores puesto que el error para las variables medioambientales *DNI*, *DHI*, temperatura y velocidad de viento es desconocido. Para poder establecer la calidad del modelo es necesario contar con datos para computar el error de cada uno de los inputs del proceso de modelado. Sin establecer la precisión del modelamiento, el sistema de monitoreo otorga datos cualitativos del comportamiento de la planta FV, no

así cuantitativos con un error determinado.

### 3.3. Reporte Mensual de Métricas para Planta FV

Los reportes mensuales cuentan con métricas clave para la evaluación del desempeño de la planta FV. Estos reportes permiten a un operador o cliente entender fácilmente la generación eléctrica de su planta FV en un periodo de un mes. El reporte cuenta con los indicadores presentados en la metodología 1.2.4. La energía generada permite el cálculo de la ganancia económica producida por la inyección de corriente eléctrica a la red del país. Esta se calcula simplemente multiplicando la energía eléctrica generada en  $kW/h$  por el valor del  $kW/h$  de la energía eléctrica. La energía estimada entrega información acerca de cuánto puede llegar a producir la planta FV en las condiciones medioambientales del mes. La disponibilidad de operación permite detectar aquellos días en que la generación eléctrica tuvo un mayor tiempo de operación y en conjunto con el tiempo de no operación permite detectar fallas de no operación en la planta FV. La tasa de desempeño indica cómo ha sido la generación de energía eléctrica con respecto a la energía eléctrica estimada, mientras que, la tasa de desempeño activo permite identificar cuando existe un problema en la operación de la planta sin considerar los problemas de encendido y apagado. La información proporcionada por el reporte cumple con los estándares propuestos por los manuales de buenas prácticas [12], [5]. No obstante, el reporte podría incluir información acerca de las fallas detectadas por el inversor como se mencionó en 2.3, paneles dañados, empolvamiento de módulos FV, entre otros.

El sistema de monitoreo incluye además un sistema de alertas cuando se detecta que la planta está caída. Esto se logra a través del tiempo de no operación del día. El sistema de alertas también podría incluir: Alertas por detección de fallas en el inversor, alerta por detección de módulo dañado, alerta de limpieza, según lo que se ha hablado en la discusión.

# Capítulo 4

## Conclusión

Durante el transcurso de la memoria se identificaron requerimientos para el desarrollo de un sistema de monitoreo. Estos requerimientos integran componentes de un sistema fotovoltaico, modelos de estimación de energía generada, base de datos medioambientales y tecnologías de información. Estos requerimientos permiten construir un sistema de monitoreo funcional que reporte los indicadores claves detallados en los resultados.

Los resultados del modelamiento de la energía eléctrica generada no han sido evaluados directamente. No obstante se han evaluado las bases de datos medioambientales con datos medidos en terreno, mostrando diferencias. Estas diferencias arrastran su error a la potencia eléctrica generada, por lo que se sugiere una calibración de los datos medioambientales previa introducción al modelo.

El reporte de indicadores clave ha mostrado, en la práctica, ser útil para identificar cuando la planta FV se apaga por algún problema del sistema. También ha resultado ser de utilidad para decidir la fecha de limpieza de los paneles.

En general, el sistema de monitoreo remoto de planta FV se desarrolló y está operativo en la planta FV. Este prototipo sirve, sin duda, de ejemplo para implementar mejoras y en consecuencia optimizar la generación de energía. Al ser el sistema de monitoreo orientado a sistemas distribuidos de plantas FV, se espera que en un futuro se pueda optimizar la generación de un conjunto de plantas FV y no solo de una planta en particular como se ha desarrollado hasta ahora.

# Glosario

- **Generación Fotovoltaica:**

Es un proceso de generación de energía eléctrica por medio de la exposición de un medio fotovoltaico a la radiación solar. Este proceso proporciona una fuente de energía renovable.

- **Radiación Solar Total (*TSI*):**

Es la cantidad de radiación solar, considerando todas las longitudes de onda producidas por el sol. A una distancia media sol-tierra el TSI varía de  $1415 \text{ W/m}^2$  en perigeo a  $1321 \text{ W/m}^2$  en apogeo.

- **Radiación Solar Directa (*DNI*):**

Es el haz de radiación solar disponible, del disco solar, en una superficie plana normal al sol medida con un pirheliómetro y con un ángulo de  $5 - 5,7$  grados.

- **Radiación Solar Difusa (*DHI*):**

Es la radiación solar del domo aéreo, excluyendo el DNI, que ha sido dispersado por nubes, aerosoles y otros componentes atmosféricos disponibles en una superficie horizontal. Se mide con un piranómetro sombreado, en  $180$  grados.

- **Radiación Global Horizontal (*GHI*):**

Es la radiación solar hemisférica total en una superficie horizontal, y se mide con un piranómetro sin sombrear, en  $180$  grados.

- **Radiación del Plano del Arreglo (*POA*):**

Es la radiación solar disponible para colectores con cualquier orientación. Medir radiación solar POA de plato plano con un piranómetro reduce la incertidumbre de los datos considerablemente.

- **Ángulo Azimutal Solar (*SZA*):**

- **Ángulo Cenital Solar ( $\theta_z$ )**

- **Ángulo Inclinación (*Tilt*):**

Es el ángulo entre el plano horizontal y el plano en el cual se encuentra el panel FV.

- **Ángulo de Incidencia (*AOI*):**

Corresponde al ángulo entre los rayos solares y los paneles FV.

- **ELT:**

Es una sigla que significa extracción, carga y transformación de datos.

- $P_{fv}$  potencia de salida de la celda FV

- $P_{sn}$  capacidad medida de la celda FV



- $G_{poa}$  radiación del plano del arreglo de módulos FV
- $STC$  condiciones estándar de prueba
- $G_{stc}$  radiación en  $STC$
- $T_c$  temperatura de la celda FV
- $T_r$  temperatura de referencia fabricante
- $f_{fv}$  factor de pérdida de la celda FV
- $K$  coeficiente de eficiencia según temperatura del módulo
- KPI Refiere a indicadores clave de desempeño de la planta FV

# Bibliografía

- [1] Dierauf, Timothy and Growitz, Aaron and Kurtz, Sarah and Becerra, Jose Luis and Riley, Evan and Hansen, Clifford. Weather-Corrected Performance Ratio. Technical report, Sandia National Laboratories, Albuquerque, New Mexico, 2013.
- [2] Rodrigo A. Escobar, Cristián Cortés, Alan Pino, Marcelo Salgado, Enio Bueno Pereira, Fernando Ramos Martins, John Boland, and José Miguel Cardemil. Estimating the potencial for solar energy utilization in chile by satellite-derived data and ground stations measurements. *Solar Energy*, 121:139–151, 2015.
- [3] Fouzi Harrou and Bilal Taghezouit and Ying Sun. Robust and flexible strategy for fault detection in grid-connected photovoltaic systems. *Energy Conversion and Management*, 2019.
- [4] Gueymard C.A. and Myers D.R. *Validation and Ranking Methodologies for Solar Radiation Models*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008.
- [5] International Electrotechnical Commission. Photovoltaic (PV) systems - Requirements for testing, documentation and maintenance - Part 1: Grid connected systems - Documentation, commissioning tests and inspection, 2016.
- [6] International Electrotechnical Commission. IEC 61724: Photovoltaic system performance monitoring - Guidelines for measurement, data exchange and analysis, 2017.
- [7] Kabalci, Ersan and Kabalci, Yasin. Remote monitoring system design for photovoltaic panels. *2017 10th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, 2017.
- [8] Liu, Yawen and Lu, Zhigang and Yang, Fang. The Investigation of Solar PV Models. *IEEE Power and Energy Society Innovative Smart Grid Technologies Conference (ISGT)*, 1998.
- [9] Ministerio de Economía de Chile. Ley general de servicios eléctricos, Decreto con fuerza de ley n 4, Art. único N 2, 2007.
- [10] Molina, Alejandra and Falvey, Mark and Rondanelli, Roberto. A solar radiation database for Chile. *Scientific Reports*, 2017.
- [11] N. A. Engerer. Minute resolution estimates of the diffuse fraction of global irradiance

- for southeastern Australia. *Solar Energy*, 116:215–237, 2015.
- [12] National Renewable Energy Laboratory. Best Practices in Photovoltaic System Operation and Maintenance. Technical Report December, National Renewable Energy Laboratory, Denver, 2016.
- [13] Solcast. Proposal for Unidad de Transacciones, El Salvador, 2018.
- [14] Solcast. Solar Irradiance Data, 2018.
- [15] Weidong Xiao and W. G. Dunford and A. Capel. A novel modeling method for photovoltaic cells. *IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference (IEEE Cat. No.04CH37551)*, Vol.3:1950–1956, 2004.
- [16] William F. Holmgren, Clifford W. Hansen, and Mark A. Mikofski. pplib python: a python package for modeling solar energy systems, 2018.