

IMEC2001 Herramientas Computacionales

Proyecto: Modelamiento Energía Solar Fotovoltaica

1. INTRODUCCIÓN

La conciencia colectiva respecto a temas ambientales está fomentando iniciativas que incentivan la sostenibilidad energética. Por esta razón, la industria de energía está migrando del uso de recursos fósiles no renovables hacia fuentes limpias que impliquen un impacto medioambiental mínimo, tanto en su generación como en su posterior uso. Este cambio de pensamiento se ratifica al observar la evolución del consumo energético mundial por fuente de generación, donde las energías renovables tienen el mayor índice de crecimiento (12%, aproximadamente) a comparación de las fuentes tradicionales, según el boletín International Energy Outlook 2020 de U.S. Energy Information Administration (EIA) [1].

No es extraño el interés en la aplicación de la energía solar fotovoltaica y su creciente despliegue en Colombia, pues el país cuenta con una ubicación geográfica privilegiada para la irradiación solar, con un valor diario 15% mayor frente al promedio mundial: 4.5 contra 3.9 kWh/m², respectivamente [1]. En 2018, nueve de cada diez nuevos proyectos de generación energética utilizan paneles solares (325 proyectos en total) [1]. De hecho, se proyecta tener una capacidad instalada de 1.2 GW únicamente a partir del recurso solar a cierre de 2023 [1].

Modelar computacionalmente un sistema fotovoltaico permite realizar un análisis tecnológico, económico y de desempeño eficiente. Además, la información proveniente de los modelos computacionales se puede proporcionar de tal manera que es aceptada en las industrias técnicas y financieras, debido a la trazabilidad de los algoritmos [1].

2. OBJETIVOS

Alineados a los objetivos de aprendizaje del curso, el proyecto busca:

- Desarrollar habilidades pertinentes a la implementación de algoritmos computacionales para la solución de problemas de ingeniería.
- Solucionar problemas de ingeniería mediante la utilización de herramientas computacionales de alto nivel utilizando librerías numéricas existentes y plataformas interactivas de programación.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

El proyecto consiste en **desarrollar un algoritmo computacional que permita modelar la planta solar fotovoltaica del edificio Santo Domingo** en términos de las variables de entrada (meteorológicas y técnicas) y las variables de respuesta (parámetros de operación), así como evaluar los resultados. Cada pareja de estudiantes debe explorar y utilizar herramientas computacionales modernas para desarrollar un algoritmo ejecutable.

Cada desarrollo computacional debe seguir los [lineamientos de proyectos de GitHub](#). Esto invita a no limitarse únicamente con el lenguaje de preferencia del curso, Python, si no que, por el contrario, se utilicen aquellas que se manejan en el día a día de la carrera (e.g., Microsoft Excel o MATLAB). Además, se contribuye al desarrollo de código abierto de proyectos.

Estos desarrollos usualmente son valorados por la comunidad en un proceso de evaluación de requisitos y requerimientos (e.g., documentación, entendimiento del algoritmo, desempeño) para, de esta manera, evaluar la calidad de los trabajos que los autores remiten para su publicación.

4. MARCO TEÓRICO

4.1. Sistema Fotovoltaico Edificio Santo Domingo

En el 2019 entró en operación la planta fotovoltaica de la Universidad de los Andes, ubicada en el edificio Santo Domingo (SD). El sistema tiene una capacidad instalada de 80.06 kWp conectado a la red (*on-grid*) y consta de 200 paneles distribuidos entre dos inversores centrales (denominados para el proyecto Sistema A y Sistema B). La capacidad de producción de cada panel es de 400 kWp. En la Tabla 1.5 se dispone más información técnica.



Figura 4. Planta fotovoltaica de la Universidad de los Andes, ubicada en la terraza del edificio Santo Domingo. Tomado de [1].

Tabla 1. Información técnica de la planta fotovoltaica de la Universidad de los Andes.

Dato Técnico	Sistema A	Sistema B
Potencia [kWp]	51.24	28.82
Inclicación [°]	10	10
Azimutal [°]	180	180
Paneles en Serie	16	18
Paneles en Paralelo	8	4
Inversor	ABB TRIO 50.0 TL OUTD US	ABB TRIO 27.6 TL OUTD US

Panel Fotovoltaico	LG Electronics LG400N2W-A5	LG Electronics LG400N2W-A5
Cantidad Paneles	128	72
P_{DC0} [W]	50 881.8	28 199.2
P_{AC0} [W]	50 000	27 600
η_{nom}	0.98184	0.97761

4.2. Modelamiento Solar

La construcción del modelo computacional sigue los pasos estándar de modelamiento fotovoltaico recomendados por PVPMC (Figura 2).

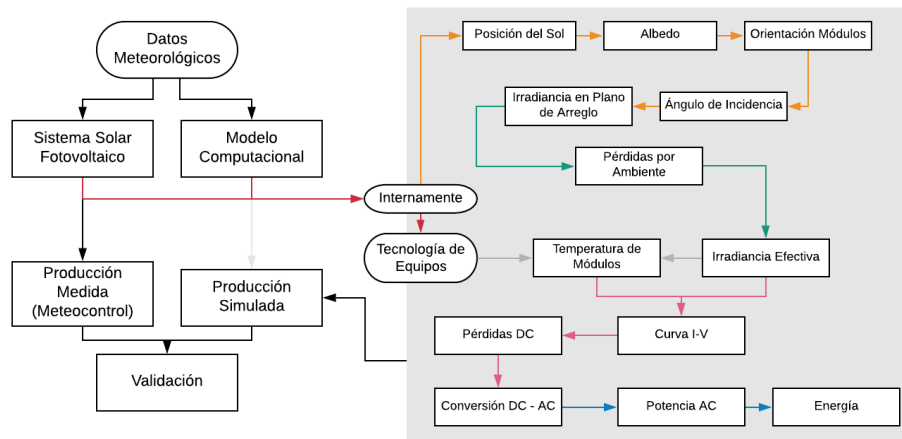


Figura 5. Modelado de un sistema FV según PVPMC [1]. El color naranja indica la etapa meteorológica; en verde la estimación de irradiancia efectiva; en gris la temperatura del panel, en rosado la producción DC del y en azul la AC. [1]

El proceso inicia con la organización del archivo de datos a utilizar (en repositorio del curso en GitHub se encuentra en la ruta [project > data > SD_5min.xlsx](#)). Esta información comprende valores meteorológicos y de producción desde 1-Ago-2019 hasta 30-Jun-2021 en resolución cinco-minutal. Para los análisis tome **5 meses** cualquiera.

Lo primero que se debe hacer es **ordenar los datos y realizar un preprocesamiento (con la herramienta computacional de su preferencia) para asignar a cero los datos faltantes con respecto al tiempo**, así se asegura que toda la información se reporte para los mismos instantes temporales. Los parámetros son:

- Irradiancia de celda de referencia: **Meteocontrol Irrad (W/m2)**.
- Temperatura ambiente: **Tamb (degC)**.
- Temperatura del módulo fotovoltaico: **Tmod (degC)**.
- Voltaje DC: **DC Voltage (V)**.
- Corriente DC y AC: **DC Current (A)** y **AC Current (A)**.
- Potencia DC y AC: **DC Power (W)** y **AC Power (W)**.

- Energía diaria acumulada: **Energy (kWh)**.

Luego, **los datos $\leq 1.5 \text{ W/m}^2$ se igualan a cero para eliminar el efecto denominado irradiancia hormiga**. Los datos hormiga a pesar de tener baja magnitud pueden causar una desviación significativa en los valores de producción simulados. Típicamente estos datos se ubican en la cercanía de la salida y puesta del sol (i.e. 6:00 y 18:00h).

También, los datos de corriente deben filtrarse así:

- **Sistema A:** Los datos de corriente $\geq 9.5 \text{ A}$ se igualan a 9.5.
- **Sistema B:** Los datos de corriente $\geq 5.6 \text{ A}$ se igualan a 5.6.

Con esta información es posible determinar el voltaje de circuito abierto V_{oc} y la corriente de corto circuito I_{sc} , así:

$$V_{oc} = V_{oc,STC} + \beta(T_{mod} - T_{mod,STC}) \quad (\text{Ec. 1})$$

$$I_{sc} = I_{sc,STC} + \alpha(T_{mod} - T_{mod,STC}) \quad (\text{Ec. 2})$$

Donde β es $-0.0026 \text{ 1/}^\circ\text{C}$, α es $0.0002 \text{ 1/}^\circ\text{C}$ y $T_{mod,STC}$ es 25°C .

Ítem 1

Realice una gráfica en donde correlacione:

1. La medición del voltaje y el cálculo de V_{oc} .
2. La medición de corriente y el cálculo de I_{sc} .

¿Qué interpreta de esta información?

La potencia eléctrica (en corriente directa) se determina a partir de la multiplicación del voltaje y la corriente. Entonces, podemos aproximarnos a la potencia producida gracias a la irradiancia solar así:

$$P_{DC} = (V_{oc} \cdot I_{sc}) \cdot PS \cdot PP \quad (\text{Ec. 3})$$

Nota: La multiplicación entre V_{oc} y I_{sc} estima la potencia DC de un único panel fotovoltaico. Para escalar este valor a la potencia DC del parque solar, debemos multiplicar este valor por la cantidad de paneles en serie PS y la cantidad de paneles en paralelo PP (Tabla 1) de cada sistema (es decir, este cálculo debe hacerse para el Sistema A y el Sistema B por separado).

Por consideraciones ambientales y técnicas de la planta fotovoltaica del edificio Santo Domingo, se debe **agregar un porcentaje de pérdidas a la potencia DC equivalente a 26.9%**.

Ítem 2

Realice una gráfica en donde correlacione la medición de la potencia DC y el cálculo de P_{DC} . ¿Qué interpreta de esta información?

Tenga presente correlacionar la potencia DC calculada con la respectiva potencia DC medida de cada sistema, es decir, Sistema A y Sistema B por separado.

Otra forma de estimar la potencia DC es mediante el modelo de potencia de [NREL PVWatts](#).

$$P_{DC} = \frac{G_{POA}}{1000} \cdot P_{DC_0} [1 + \gamma (T_{mod} - T_{mod,STC})] \quad (\text{Ec. 4})$$

Siendo: G_{POA} la irradiancia de la celda de referencia, P_{DC_0} es la potencia indicada por la capacidad instalada (Tabla 1), γ es $-0.0036 \text{ } 1/^{\circ}\text{C}$ y $T_{mod,STC}$ es 25°C .

Ítem 3

Realice una gráfica en donde correlacione la medición de la potencia DC y el cálculo de P_{DC} a partir del modelo de potencia de NREL PVWatts. ¿Qué interpreta de esta información?

Tenga presente correlacionar la potencia DC calculada con la respectiva potencia DC medida de cada sistema, es decir, Sistema A y Sistema B por separado.

Continuando con el flujo de trabajo, se llega a la etapa de conversión DC-AC; físicamente, esto es realizado en el inversor. El modelo matemático para estimar la potencia AC es dado por [NREL PVWatts](#).

$$\eta = \frac{\eta_{nom}}{0.9637} \left(-0.0162 \cdot \zeta - \frac{0.0059}{\zeta} + 0.9858 \right) \quad (\text{Ec. 5})$$

$$P_{AC} = \min (\eta \cdot P_{DC}, P_{AC_0}) \quad (\text{Ec. 6})$$

$$\zeta = \frac{P_{DC}}{P_{DC_0}} \quad (\text{Ec. 7})$$

Siendo:

- η la eficiencia en la inversión de energía (es decir, de DC a AC).
- η_{nom} es la eficiencia nominal del inversor (Tabla 1).
- P_{DC_0} es la potencia DC indicada por la capacidad instalada (Tabla 1).

Ítem 4

Realice una gráfica en donde correlacione la medición de la potencia AC y el cálculo de P_{AC} a partir del modelo de potencia de NREL PVWatts. ¿Qué interpreta de esta información?

Tenga presente correlacionar la potencia AC calculada con la respectiva potencia AC medida de cada sistema, es decir, Sistema A y Sistema B por separado.

La potencia AC total generada por el parque es la suma de aquella generada por cada inversor, es decir:

$$P_{AC\text{Parque}} = P_{AC\text{Sistema A}} + P_{AC\text{Sistema B}} \quad (\text{Ec. 8})$$

Ítem 5

Realice una gráfica en donde correlacione la medición de la potencia AC total y el cálculo de P_{AC} a partir de la suma de las potencias AC calculadas para cada inversor con modelo de potencia de NREL PVWatts. ¿Qué interpreta de esta información?

Ítem 6

Realice una gráfica en donde correlacione la irradiancia medida y el cálculo de P_{AC} a partir de la suma de las potencias AC calculadas para cada inversor con modelo de potencia de NREL PVWatts. ¿Qué interpreta de esta información?

Nota: Esta gráfica es conocida como Relación Recurso-Potencia.

Finalmente, se estima la energía producida por el parque solar fotovoltaico a partir de los datos de potencia AC del parque (Ecuación 8), así:

$$E = P_{AC} \cdot t \quad (\text{Ec. 9})$$

Siendo: E la energía (en unidades de kWh), P_{AC} la potencia AC del parque (en unidades de kW) y t el periodo de tiempo (en unidades de horas).

En este caso, dado que la información es cinco-minutal, t es 5/60. Así, **el valor de energía E se interpreta como la energía (en kWh) generada en los últimos cinco minutos.**

Luego, para obtener la energía generada en un rango de tiempo, debemos sumar los valores obtenidos en la Ecuación 9 durante dicho periodo temporal (en Python puede explorar la función **pandas.DataFrame.resample**). Por ejemplo, cada dato obtenido con la Ecuación 9 corresponde a una estampa de tiempo con resolución cinco-minutal. Si tomamos dos datos seguidos y los sumamos, esto corresponde a la energía generada en los últimos diez minutos (recuerde que cada dato se interpreta como lo generado en los últimos cinco minutos). O, al sumar treinta datos seguidos y los sumamos, obtenemos la energía generada en la última hora (dado que un dato son cinco minutos y, por tanto, treinta datos son sesenta minutos).

Ítem 7

Realice una gráfica en donde correlacione:

1. La medición de la energía diaria y el cálculo diario de E a partir de la suma de los valores cinco-minutales.
2. La medición de la energía semanal y el cálculo diario de E a partir de la suma de los valores cinco-minutales.

¿Qué interpreta de esta información?

Ítem 8

Realice una gráfica de barras de la energía mensual generada. ¿Qué interpreta de esta información?

Ítem 9

Si únicamente tiene en cuenta los datos comprendidos en el periodo 1-Abril-2020 hasta 1-October 2020:

1. ¿Qué diferencias encuentra con respecto al modelamiento de todos los datos?
 2. ¿Qué interpreta de esta información?
-

5. COMPETENCIAS ABET

El proyecto evalúa el desarrollo de las siguientes competencias:

1. Habilidad para identificar, formular y resolver problemas complejos de ingeniería aplicando principios de ingeniería, ciencias y matemáticas.

1.3. Resuelve problemas de ingeniería.

- 3.1. Escribe de forma clara y efectiva documentos e informes de ingeniería usando terminología y lenguaje adecuado.

3.1.1. Comunica sus ideas con claridad, expresándose de forma directa y utilizando el vocabulario adecuado.

7. Habilidad para adquirir y aplicar nuevo conocimiento según sea necesario, utilizando estrategias de aprendizaje apropiadas.

7.4. Demuestra la habilidad de aplicar conocimiento adquirido para proponer e implementar una solución a un problema de Ingeniería Mecánica.

6. ENTREGAS

La duración del proyecto es de ocho (8) semanas. Los entregables, según fechas, son:

- En la fecha **jueves 1 de diciembre**, durante el espacio de la clase, cada equipo debe hacer una demostración práctica de su algoritmo ante de **máximo 10 minutos**. La audiencia, mientras tanto, hará la valoración del trabajo (e.g., claridad, eficiencia, impacto).
- La fecha **domingo 4 de diciembre** es el plazo límite para **enviar la carpeta del proyecto comprimido en .zip** con los entregables solicitados: (i.) documentación

y memoria de cálculos y (ii.) código ejecutable. El proyecto debe realizarse en un repositorio en GitHub.

Nota 1: Cada grupo debe invitar al repositorio del proyecto en GitHub al profesor y la monita del curso.

Nota 2: Cada grupo dispone de un canal privado en Microsoft Teams. Este es el medio centralizado para avanzar en documentación y para la resolución de preguntas con el equipo docente.

7. CALIFICACIÓN

La calificación del proyecto tiene en cuenta los valores porcentuales:

Tabla 1. Sistema de evaluación.

Entregable	Peso Porcentual
Documentación y Memoria de Cálculos	35%
Código Ejecutable	40%
Demostración Práctica	25%

8. REFERENCIAS

- Mancera y Salazar-Peña. (2021). Detección de Fallas en Sistemas Solares Fotovoltaicos por Medio de Modelado y Algoritmos Computacionales. Universidad de los Andes. Departamento de Ingeniería Mecánica. Bogotá, D.C., Colombia.

9. MATRICES DE EVALUACIÓN

9.1. Documentación y Memoria de Cálculos

9.2. Código Ejecutable

9.3. Demostración Práctica

En el siguiente link encontrará las rubricas de calificación mencionadas anteriormente:

- <https://github.com/salazarna/ua-imec2001-hc-202220-s1/tree/main/rubricas>