

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].

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 una planta solar fotovoltaica** 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.

El desarrollo computacional no debe limitarse únicamente con el lenguaje de preferencia del curso, Python. También se invita el uso de aquellas que se manejan en el día a día de la carrera (por ejemplo, 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 (por ejemplo, documentación, entendimiento del algoritmo,

desempeño) para, de esta manera, evaluar la calidad de los trabajos que los autores remiten para su publicación.

Nota: Cada ítem no desarrollado se penaliza con -0.5 en la nota final del proyecto (obtenida a partir de las matrices de calificación).

4. DESARROLLO Y MARCO TEÓRICO

4.1. Planteamiento del Problema

En la terraza del octavo piso del edificio Mario Laserna de la Universidad de los Andes se dispone un espacio libre (Figura 1a) en donde se quiere instalar un sistema fotovoltaico que genere la mayor cantidad de energía eléctrica y, en consecuencia, el mayor ahorro económico posible. La cantidad de paneles fotovoltaicos a instalar depende de cuántos se logren ubicar en el espacio disponible. El panel escogido es el LG400N2W-A5 y sus dimensiones se presentan en la Figura 1b.

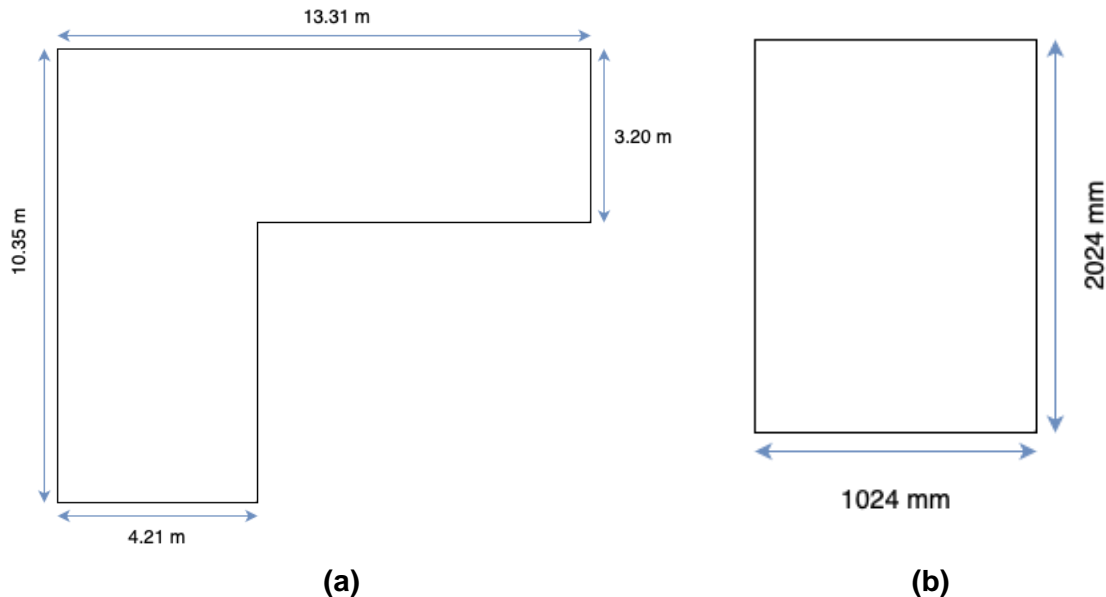


Figura 1. (a) Espacio libre para instalación en la terraza del octavo piso del edificio Mario Laserna.
(b) Dimensiones del panel fotovoltaico LG400N2W-A4.

Ítem 1

A partir del espacio libre dispuesto y el tamaño del panel fotovoltaico:

1. Estime la mayor cantidad de paneles fotovoltaicos que se pueden instalar en la terraza. La disposición de los paneles es libre (es decir, pueden instalarse en cualquier ángulo).
2. Realice un esquemático (similar a la Figura 1) en el que se muestre la disposición propuesta de los paneles fotovoltaicos.

4.2. Diseño Sistema Fotovoltaico

Una vez se conoce la cantidad de paneles fotovoltaicos a instalar, se define cómo serán sus conexiones eléctricas en serie y en paralelo para maximizar la potencia del sistema fotovoltaico (P_{DC_0}) y, en consecuencia, la generación de energía eléctrica.

$$P_{DC_0} = (I_{mpp} \cdot PP) \cdot (V_{mpp} \cdot PS) \quad (\text{Ec. 1})$$

Siendo:

- P_{DC_0} la potencia del sistema fotovoltaico, también llamada capacidad instalada.
- I_{mpp} la corriente en el punto de máxima potencia, equivalente a 9.86 A.
- V_{mpp} el voltaje en el punto de máxima potencia, equivalente a 40.6 V.
- PP la cantidad de paneles conectados en paralelo.
- PS la cantidad de paneles conectados en serie.

Ítem 2

Realice una optimización en donde se maximice la potencia del sistema fotovoltaico (P_{DC_0}) teniendo en cuenta que:

- Un panel conectado en serie no puede estar conectado en paralelo.
- Un panel conectado en paralelo no puede estar conectado en serie.
- Mínimo deben haber dos paneles conectados en paralelo.
- Mínimo deben haber dos paneles conectados en serie.

Nota: Si el ejercicio de optimización fue realizado con la herramienta Solver de Microsoft Excel, el procedimiento de solución debe indicarse en la memoria de cálculos y el archivo en Microsoft Excel debe ser cargado junto con los entregables en Bloque Neón.

4.3. Procesamiento Datos

La generación de energía eléctrica inicia con la irradiancia solar y la temperatura del panel fotovoltaico. En el repositorio del curso en GitHub se encuentra esta información en la ruta [project > data > irradiance.csv](#) y [project > data > temperature.csv](#), respectivamente. Esta información comprende valores de irradiancia (unidades de W/m^2) y temperatura del panel fotovoltaico (unidades de $^{\circ}\text{C}$) de los años 2020 a 2022 en resolución horaria.

Ítem 3

Realice los siguientes procesamientos a los datos (irradiancia y temperatura del panel fotovoltaico):

1. Asignar a cero los datos faltantes con respecto al tiempo.

2. Los datos de irradiancia $\leq 1.5 \text{ W/m}^2$ se igualan a cero para eliminar el efecto denominado irradiancia hormiga.

Nota: 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 (es decir, 6:00 y 18:00h).

4.4. Potencia DC

La potencia eléctrica en corriente directa (es decir, potencia DC) se calcula mediante el modelo de potencia de [NREL PVWatts](#).

$$P_{DC} = \frac{G_{POA}}{1000} \cdot P_{DC0} [1 + \gamma(T_{mod} - T_{mod,STC})] \quad (\text{Ec. 2})$$

Siendo:

- G_{POA} la irradiancia (unidades de W/m^2).
- P_{DC0} la potencia del sistema fotovoltaico (Ítem 2).
- γ el coeficiente de temperatura de potencia, equivalente a -0.0036 (unidades de $1/^{\circ}\text{C}$, es decir, $^{\circ}\text{C}^{-1}$).
- $T_{mod,STC}$ la temperatura del panel fotovoltaico en condiciones estándar de laboratorio (STC), equivalente a 25°C .

Ítem 4

1. Estime la potencia DC para cada estampa de tiempo horaria de los años 2020 a 2022 a partir de la Ecuación 2 y la información dada de irradiancia y temperatura del panel fotovoltaico (asuma que la irradiancia y temperatura es la misma para todos los paneles que estimó en el Ítem 1).
2. Por consideraciones ambientales y técnicas del sistema fotovoltaico, agregue un porcentaje de pérdidas a la potencia DC equivalente a 26.9%.
3. Realice una gráfica en donde relacione la medición de irradiancia y el cálculo de P_{DC} a partir del modelo de potencia de NREL PVWatts. ¿Qué interpreta de esta información?

4.5. Potencia AC

Típicamente, para poder aprovechar la potencia eléctrica, esta debe estar en corriente alterna (es decir, potencia AC). Esta conversión de DC a AC la realiza un equipo llamado inversor (en este caso el equipo es el inversor Outback Power Systems FX 2524T. El modelo matemático para estimar la potencia AC es dado por [NREL PVWatts](#).

$$\eta = \frac{\eta_{nom}}{0.9637} \left(-0.0162 \cdot \zeta - \frac{0.0059}{\zeta} + 0.9858 \right) \quad (\text{Ec. 3})$$

$$\zeta = \frac{P_{DC}}{P_{DC_0}} \quad (\text{Ec. 4})$$

$$P_{AC} = \min (\eta \cdot P_{DC} , P_{AC_0}) \quad (\text{Ec. 5})$$

Siendo:

- η la eficiencia en la inversión de energía (es decir, de DC a AC).
- η_{nom} la eficiencia nominal del inversor, equivalente a 0.92.
- P_{DC} la potencia en corriente directa (Ítem 4).
- P_{DC_0} la potencia del sistema fotovoltaico (Ítem 2).
- P_{AC_0} la potencia nominal del inversor, equivalente a 10.5 kW.

Ítem 5

1. Estime la potencia AC para cada estampa de tiempo horaria de los años 2020 a 2022 a partir de la Ecuación 3, la Ecuación 4 y la Ecuación 5.
2. Realice una gráfica en donde relacione la medición de irradiancia y el cálculo de P_{AC} a partir del modelo de potencia de NREL PVWatts. ¿Qué interpreta de esta información?
3. Realice una regresión lineal en donde correlacione la potencia DC y la potencia AC. Presente la ecuación obtenida de la regresión y el coeficiente de determinación R^2 . ¿Qué interpreta de esta información?

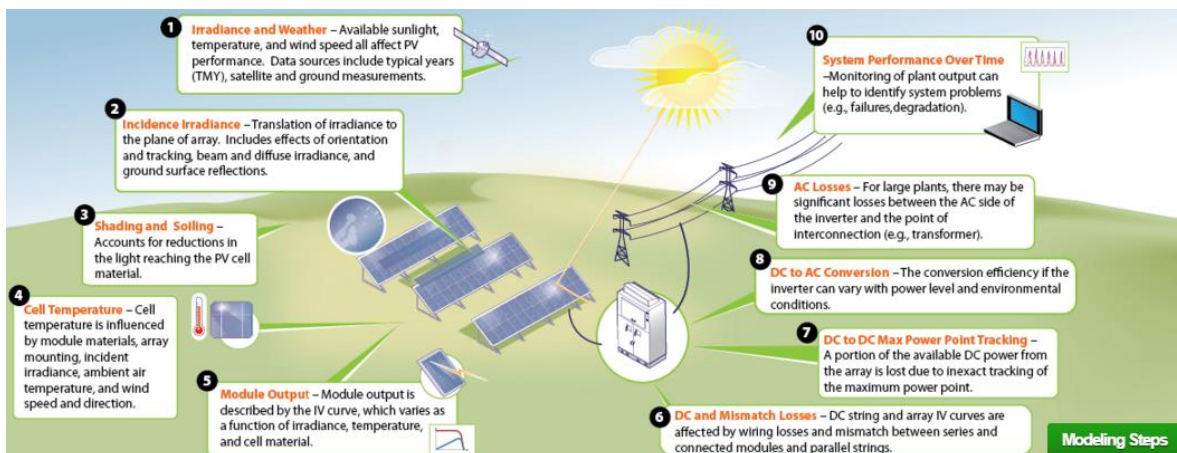


Figura 2. Esquemático de un sistema fotovoltaico. Adaptado de [Sandia PVPWC](#).

4.6. Energía Eléctrica

Conocida la potencia en corriente alterna, se estima la energía eléctrica producida por el sistema fotovoltaico a partir de los datos de potencia AC.

$$E = P_{AC} \cdot \frac{t}{60} \quad (\text{Ec. 6})$$

Siendo:

- E la energía eléctrica (en unidades de kWh).
- P_{AC} la potencia AC (en unidades de kW).
- t la resolución de las estampas de tiempo (en unidades de minutos).

El valor de energía eléctrica E obtenida con la Ecuación 6 se interpreta como la energía eléctrica (en kWh) generada en la última hora.

Ítem 6

1. Estime la energía eléctrica para cada estampa de tiempo horaria de los años 2020 a 2022 a partir de la Ecuación 6.
2. Realice una gráfica en donde relacione la medición de irradiancia y el cálculo de E . ¿Qué interpreta de esta información?

4.7. Análisis Financiero

Se debe estudiar la viabilidad financiera del sistema fotovoltaico. Este estudio debe considerar el tiempo de retorno (Ecuación 7) y el costo nivelado de energía (Ecuación 8), este último conocido como LCoE.

El tiempo de retorno (TR) es la relación entre la inversión inicial y el retorno anual. Para esto, se toma que el precio por unidad de energía eléctrica de 285.44 COP/kWh.

$$TR = \frac{IN}{285.44 \cdot \sum E} \quad (\text{Ec. 7})$$

Siendo IN la inversión inicial, la cual equivale al costo de los paneles fotovoltaicos más el costo del único inversor. Asuma que el precio del panel es de 353 USD por unidad, el precio del inversor es de 1191.54 USD por unidad, y tome la equivalencia de 1 USD corresponde a 4883 COP.

El costo nivelado de energía permite conocer cuánto cuesta producir cada unidad de energía eléctrica.

$$LCoE = \frac{\sum_{t=1}^n \frac{IN \cdot OM \cdot F}{(1+r)^t}}{\sum_{t=1}^n \frac{E_t}{(1+r)^t}} \quad (\text{Ec. 11})$$

Siendo:

- t el año de estudio.
- n la cantidad de años de estudio (a partir de las estampas de tiempo dadas en los archivos iniciales).
- IN la inversión inicial (numerador de la Ecuación 6).
- OM los gastos en operación y mantenimiento, equivalente a 250000 COP por año.
- F los gastos en fuentes externas, equivalente a 0 COP por año.
- r la tasa de descuento, equivalente a 4%.
- E_t la energía eléctrica del año de estudio t .

Ítem 7

1. Estime el tiempo de retorno a partir de la Ecuación 6. ¿Qué interpreta de esta información?
2. Estime el costo nivelado de electricidad a partir de la Ecuación 7. ¿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.

1.2. Escoge y aplica modelos cuantitativos, conceptuales y/o cualitativos para la solución de problemas mecánicos o térmicos.

1.3. Resuelve problemas de ingeniería.

6. Habilidad para desarrollar y conducir apropiadamente experimentación, analizar e interpretar datos, y usar el juicio de ingeniería para elaborar conclusiones.

6.3. Analiza e interpreta datos, desarrolla los cálculos necesarios y tabula/gráfica los resultados.

6.4. Elabora conclusiones basadas en datos experimentales y modelos disponibles.

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

7.1. Busca e identifica fuentes relevantes de información haciendo uso de los recursos disponibles (libros, internet, journals, estándares, normas técnicas, tutoriales) para adquirir nuevo conocimiento.

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 cuatro (4) semanas. La fecha **domingo 19 de marzo** es el plazo límite para **enviar la carpeta del proyecto en formato P_NombreApellido_NombreApellido.zip** con los entregables solicitados:

1. Documentación y memoria de cálculos.
2. Código ejecutable.
3. Demostración práctica a partir de un video de máximo 10 minutos, explicando el detalle de la solución de los ítems y presentando el código ejecutable.

Nota 1: En Bloque Neón > Contenido > Foros > Proyecto se encuentra el medio centralizado para la resolución de preguntas con el equipo docente. También, se incentiva a que este sea un espacio colaborativo entre todos los integrantes del curso.

Nota 2: Un formato diferente a **P_NombreApellido_NombreApellido.zip** se penaliza con -0.5 en la nota final del proyecto (obtenida a partir de las matrices de calificación).

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. MATRICES DE EVALUACIÓN

El proyecto se califica con base en las matrices de evaluación Documentación y Memoria de Cálculos, (ii.) Código Ejecutable, y (iii.) Demostración Práctica. Estas rubricas se disponen en Bloque Neón > Contenido > Introducción > Rúbricas, y también en el siguiente enlace: <https://github.com/salazarna/ua-imec2001-hc-202310-s1/tree/main/rubrics>.

9. REFERENCIAS

1. 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.