

Calculadora CSP

Documentación técnica y metodológica del sitio

Versión	Propósito	Estado	metodológico
1.0 Preliminar	Prospección y prefactibilidad CSP	Válido para evaluación preliminar	

1. Descripción general del sitio

La Calculadora CSP es un sitio orientado a apoyar la evaluación preliminar de proyectos de concentración solar de potencia. Su función principal es transformar información meteorológica y parámetros tecnológicos en resultados comparables para una etapa temprana de decisión.

Desde el punto de vista metodológico, la aplicación no debe entenderse como un modelo matemático completamente original, sino como una implementación computacional de modelos reconocidos de NLR (ex NREL) (National Laboratory of the Rockies, ex National Renewable Energy Laboratory, USA) accesibles desde Python mediante PySAM. Esa distinción es importante: la validez del sitio no depende solamente del código propio, ni de una modelación propia, sino del hecho de que el núcleo de cálculo corresponde a un motor de simulación consolidado, documentado y mantenido por una institución técnica de referencia en particular se utiliza la modelación de torres de sales fundidas [1][2][10].

En términos prácticos, el sitio permite estructurar un flujo de trabajo reproducible: selección de un sitio o coordenada, consulta de datos meteorológicos por medio de las APIs de los exploradores de energía, normalización de variables, ejecución del modelo CSP, extracción de salidas y presentación de indicadores preliminares de generación y costos del Proyecto ingresado.

Flujo de la calculadora CSP

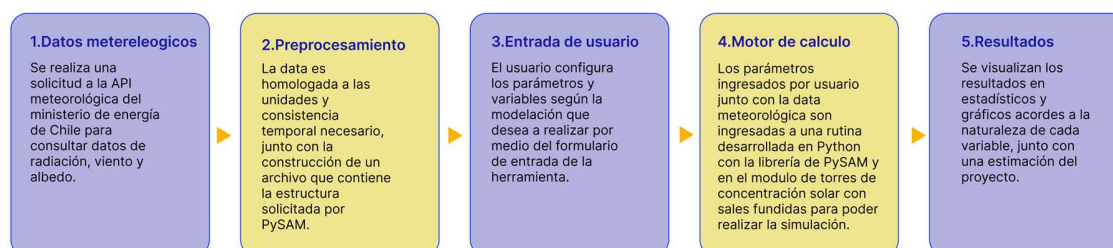


Figura 1. Flujo lógico de la Calculadora CSP.

Este documento explica la base técnica, metodológica y de alcance del sitio de la Calculadora CSP. El objetivo es dejar explícito qué problema aborda la herramienta, por qué es razonable y

valido utilizar PySAM como motor de modelación junto con la información meteorológica disponible en el Ministerio de Energía de Chile para realizar evaluación tempranas y prospección del potencial de concentración solar, entendiendo los límites que no deben sobrepasarse al interpretar los resultados teniendo claro la siguiente declaración central:

La Calculadora CSP es metodológicamente aceptable utilizando el motor de cálculo de NREL-PySAM —la interfaz oficial de Python para SAM/SSC de NLR—, usando los datos meteorológicos públicos del Ministerio de Energía de Chile como insumo para análisis de prospección y prefactibilidad temprana. Su alcance no debe describirse como ingeniería de detalle, evaluación bancaria final ni sustituto de una campaña de medición en sitio [1][2][3][6][8][9][11].

2. Fundamento técnico del uso de PySAM

PySAM es la interfaz oficial en Python del ecosistema SAM/SSC de NLR. La documentación oficial indica que PySAM está construido sobre PySSC y proporciona acceso a las entradas y salidas del SAM Simulation Core (SSC), junto con funciones adicionales para construir modelos energéticos desde Python [1].

SAM, a su vez, es descrito por NLR como una aplicación para análisis tecno económicos de tecnologías energéticas, utilizada por ingenieros, analistas, desarrolladores e investigadores para estudiar la factibilidad técnica, económica y financiera de proyectos de generación energética [2]. Un material institucional más reciente de NLR agrega que SAM es accesible tanto desde su interfaz gráfica como desde PySAM, y que se usa para estudios de factibilidad, benchmarking, proyectos de investigación, pruebas de aceptación de plantas y evaluación de propuestas [3].

Para la familia CSP, PySAM expone módulos y configuraciones específicas que cubren tecnologías relevantes para estudios preliminares, incluyendo torre de sales fundidas y configuraciones CSP de canal parabólico y Fresnel lineal [10][12]. Por ello, usar PySAM en la Calculadora CSP es metodológicamente más sólido que implementar ecuaciones de la literatura que no cuentan con una validación externa y robusta como la herramienta desarrollada por el NLR: el sitio hereda una base de modelación conocida, verificable y actualizable. Además de reducir significativamente los tiempos de Desarrollo y validación.

2.1. Evidencia de validez para aplicaciones CSP

Uno de los principales desafíos para cualquier herramienta de simulación es que los modelos matemáticos utilizados reproduzcan, de manera aceptable el comportamiento esperado de una planta CSP. En este punto SAM dispone de respaldo público especializado.

Un trabajo de NREL que comparó SAM con la guía SolarPACES para evaluación de rendimiento solar termoelectrónico reportó una fuerte concordancia entre SAM y dichas recomendaciones. El propósito del estudio fue precisamente revisar el cumplimiento del modelo frente a prácticas consideradas apropiadas para evaluación de rendimiento y, a partir de ello, mejorar la herramienta [4].

Además, la página oficial de validación CSP de SAM documenta análisis comparativos contra sistemas reales en España para el modelo de canal parabólico físico y para el modelo de torre de sales fundidas [5]. Este antecedente significa que el motor de simulación utilizado por la Calculadora CSP no es arbitrario y posee una base pública de comparación con casos reales.

La conclusión técnica, por tanto, es la siguiente: el uso de PySAM como motor de cálculo para la prospección y prefactibilidad se apoya en modelos reconocidos y validados públicamente a nivel de herramienta.

2.2. Justificación del uso de datos meteorológicos del explorador solar

PENDIENTE

3. Alcance recomendado y limitaciones

NREL ha documentado que la información confiable del recurso solar es esencial para cualquier proyecto solar y que, para proyectos grandes, se requiere información robusta del recurso en ubicaciones específicas, con variabilidad histórica al menos horaria y preferentemente subhoraria, porque sin ello no es posible una evaluación financiera precisa [11].

La misma literatura de buenas prácticas distingue etapas del proyecto. En **screening**, evaluación inicial y prefactibilidad se usan series históricas y datos modelados o satelitales; en **factibilidad**, **due diligence** y operación, el peso debe recaer en mediciones de alta calidad en sitio, complementadas por series de largo plazo [11].

Por ello, la Calculadora CSP se posiciona explícitamente dentro de las siguientes fronteras de uso:

Etapas del proyecto	Uso del sitio	Lectura correcta del resultado
Monitoreo territorial	Sí	Permite comparar zonas, priorizar sitios y descartar opciones débiles.
Prospección / prefactibilidad inicial	Sí	Entrega estimaciones preliminares útiles para análisis técnico inicial.
Factibilidad avanzada	Parcial	Puede apoyar, pero debe complementarse con ingeniería, mediciones y análisis detallado.
Due diligence / diligencia debida	No por sí sola	No sustituye medición en sitio, validación independiente, ni modelación contractual.

4. Variables del formulario

Todas las variables descritas en esta sección son modificadas por el usuario, los valores por defecto están basados en los valores por defectos de SAM para el módulo de torres de

concentración solar, las cuales fueron contrastadas y adaptadas con proyectos CSP de España y contrastadas con la guía técnica de diseño de Marruecos. [4][14]

Ubicación del proyecto

- **Latitud seleccionada:** coordenada geográfica norte-sur del punto donde se ubicará la planta. Se usa para asociar la simulación a un recurso meteorológico y solar representativo del sitio seleccionado.
- **Longitud seleccionada:** coordenada geográfica este-oeste del punto donde se ubicará la planta. Junto con la latitud, permite identificar el archivo o conjunto de datos meteorológicos que alimenta el modelo.

Diseño del sistema

- **Múltiplo solar:** determina el sobredimensionamiento del campo solar y del receptor respecto de la potencia térmica requerida por el ciclo de generación en el punto de diseño. Un múltiplo solar igual a 1 indica que el campo solar entrega aproximadamente la potencia térmica necesaria para operar el ciclo a plena carga en condiciones de diseño. Valores mayores que 1 permiten producir calor adicional para cargar el almacenamiento térmico o compensar pérdidas. Para un sistema sin almacenamiento, suele recomendarse un valor cercano a 1.
- **Horas de almacenamiento térmico [h]:** representa la capacidad del sistema de almacenamiento expresada como horas equivalentes de operación a plena carga. Indica durante cuántas horas el almacenamiento puede abastecer al ciclo de generación en condiciones nominales, aun cuando el recurso solar no sea suficiente.
- **Potencia bruta de turbina de diseño [MWe]:** representa la potencia eléctrica bruta nominal del ciclo de potencia en el punto de diseño, antes de descontar consumos parasitarios y pérdidas auxiliares. Este valor define la escala eléctrica de la planta y, junto con la eficiencia nominal del ciclo, determina la potencia térmica requerida por el bloque de potencia.

Campo de heliostatos

- **Altura de la torre [m]:** distancia vertical entre el nivel del terreno y la posición del receptor. Afecta el diseño óptico del campo de heliostatos, las pérdidas por distancia, la geometría de apuntamiento y el tamaño del terreno requerido.
- **Máxima razón de distancia entre heliostato y torre:** define el límite exterior del campo solar como una razón entre la distancia del heliostato a la torre y la altura de la torre. Valores mayores permiten ubicar heliostatos más lejos, aumentando el área disponible, pero también pueden aumentar pérdidas ópticas y atmosféricas.
- **Mínima razón de distancia entre heliostato y torre:** define el límite interior del campo solar como una razón entre la distancia del heliostato a la torre y la altura de la torre. Evita ubicar heliostatos demasiado cerca de la torre, donde pueden existir restricciones geométricas, sombras, bloqueos o problemas de apuntamiento.

- **Alto del heliostato [m]:** dimensión vertical de cada heliostato. Junto con el ancho, determina el área reflectante individual y afecta el número de heliostatos necesarios para alcanzar la potencia térmica de diseño.
- **Ancho del heliostato [m]:** dimensión horizontal de cada heliostato. Junto con el alto, determina el área de captación por heliostato y la distribución del campo solar.
- **Reflectividad del heliostato:** fracción efectiva del área del heliostato que refleja la radiación solar hacia el receptor. Valores más altos implican mayor aprovechamiento de la radiación incidente.
- **Error óptico del heliostato [mrad]:** representa la desviación angular asociada a imperfecciones ópticas, errores de seguimiento, deformaciones o errores de apuntamiento. Un mayor error óptico dispersa más el haz reflejado y puede reducir la energía útil que llega al receptor.
- **Reflectancia del espejo y suciedad:** fracción de la radiación solar reflejada por el espejo considerando el estado real de la superficie, incluyendo pérdidas por suciedad o degradación. Un valor menor reduce la energía disponible en el receptor.
- **Ángulo de elevación mínimo del heliostato [°]:** ángulo mínimo bajo el cual el heliostato puede operar. Si la elevación solar o la posición operacional cae bajo este umbral, el heliostato puede quedar fuera de operación o pasar a posición de resguardo.
- **Área del terreno que no está ocupada por el campo solar [acre]:** superficie adicional del sitio destinada a infraestructura distinta del campo de heliostatos, como caminos, subestación, edificios, zonas de operación, servicios auxiliares o áreas de seguridad.

Nota: Las variables de esta sección son las más relevantes a la hora de realizar la optimización y cálculo del campo de heliostatos con el que funcionará la planta diseñada, por lo que estos son parámetros sensibles para el desempeño de la planta.

Torre y receptor

- **Absortancia del receptor:** fracción de la radiación solar incidente que la superficie del receptor absorbe como energía térmica. Valores más altos aumentan la energía capturada, aunque el desempeño final también depende de pérdidas térmicas y operación del receptor.
- **Emisividad del revestimiento de la superficie del receptor:** capacidad de la superficie del receptor para emitir radiación térmica. Una mayor emisividad puede aumentar las pérdidas radiativas, especialmente a altas temperaturas.
- **Factor de pérdida de calor del receptor:** multiplicador aplicado a las pérdidas térmicas calculadas para el receptor. Permite ajustar el modelo para representar condiciones reales, incertidumbres o configuraciones distintas del receptor.
- **Coeficiente de pérdida térmica por metro de tubería [W/m²-K]:** coeficiente que representa las pérdidas de calor desde las tuberías que transportan el HTF. Depende del aislamiento, temperatura de operación, geometría y condiciones ambientales.

- **Factor multiplicador de tuberías:** factor usado para estimar la longitud de tuberías en función de la altura de la torre. En la rutina, la longitud se aproxima como una función de este factor multiplicado por la altura de la torre, más una constante. Valores mayores aumentan pérdidas térmicas y pueden incrementar costos asociados.
- **Flujo máximo del receptor [kWt/m^2]:** límite máximo de flujo térmico permitido sobre la superficie del receptor. Define una restricción de diseño para evitar sobrecalentamientos o condiciones que excedan la capacidad térmica del receptor.
- **Pérdidas de calor en el receptor [kWt/m^2]:** pérdidas térmicas específicas del receptor por unidad de área. Representan energía que no se transfiere al fluido de transferencia de calor debido a radiación, convección u otros mecanismos.
- **Fracción de flujo mínimo al receptor:** caudal mínimo permitido hacia el receptor como fracción del caudal de diseño. Por debajo de este valor, el receptor puede operar de manera inestable o no ser capaz de transferir calor de forma adecuada.
- **Fracción de flujo máximo al receptor:** caudal máximo permitido hacia el receptor como fracción del caudal de diseño. Permite representar operación por encima del punto nominal hasta un límite seguro. Cuando se excede este límite, el modelo puede reducir el enfoque del campo solar para evitar sobrecarga.
- **Horas requeridas para empezar a operar el receptor [h]:** tiempo mínimo de arranque del receptor antes de que pueda entregar calor útil al sistema. Considera el calentamiento inicial de componentes y la estabilización operacional.
- **Fracción de la potencia térmica de diseño requerida durante arranque:** fracción de la potencia térmica nominal que se requiere durante el periodo de arranque del receptor. Representa la energía necesaria para llevar el receptor a condiciones operativas.
- **Altura del receptor [m]:** dimensión vertical del receptor externo instalado en la torre. Afecta el área de absorción, la distribución de flujo y el diseño óptico del campo de heliostatos.
- **Diámetro del receptor [m]:** diámetro exterior del receptor. Junto con la altura, determina el área superficial disponible para recibir la radiación concentrada.
- **Número de paneles del receptor:** cantidad de paneles individuales que componen el receptor. Cada panel consiste en un conjunto de tubos paralelos que comparten un contacto térmico con el HTF. Influye en la distribución del flujo, la hidráulica del HTF y la configuración geométrica del receptor.
- **Patrón de flujo:** configuración del recorrido del fluido de transferencia de calor a través de los paneles del receptor. En el formulario se representa con valores numéricos de 1 a 8, que corresponden a patrones predefinidos de SAM para receptores externos.

Ciclo de generación

- **Potencia requerida para bombear el fluido [kW/kg/s]:** coeficiente de potencia de bombeo necesario para mover el HTF a través del circuito del bloque de potencia. Un valor mayor aumenta los consumos auxiliares asociados al bombeo.

- **Fracción mínima de operación del ciclo de potencia:** es la fracción mínima de carga a la que puede operar el ciclo de potencia antes de apagarse. Si la energía térmica disponible cae bajo este umbral, el bloque de potencia deja de generar electricidad. Representa la carga mínima relativa a la potencia de diseño bajo la cual el ciclo de potencia no opera de forma efectiva.
- **Tiempo de arranque necesario para el bloque de potencia [h]:** tiempo requerido para que el ciclo de potencia alcance condiciones de operación desde un estado apagado o frío.
- **Fracción de la potencia de diseño requerida para el arranque:** fracción de la potencia térmica nominal que debe entregarse al bloque de potencia durante su arranque. Mientras se consume esta energía de arranque, el ciclo aún no necesariamente produce electricidad a plena carga.
- **Fracción de sobredimensionamiento de la turbina en máxima operación del ciclo de potencia:** límite superior de operación del ciclo respecto de la potencia de diseño. Un valor de 1,0 indica que la turbina no opera sobre su punto nominal; valores mayores permiten operación por encima del diseño, si el modelo y el equipo lo permiten.
- **Fracción de potencia térmica requerida para modo de espera:** fracción de potencia térmica requerida para mantener el ciclo en estado de espera o reserva caliente. Representa el consumo necesario para sostener el bloque de potencia listo para llevar a operar sin apagarse completamente. Aunque se parece a la fracción mínima de operación del ciclo de potencia, es el punto donde se quiere mantener la sal cuando no se está generando, es decir siempre es menor a la fracción mínima de operación del ciclo de potencia, pero no siempre es igual.

Ciclo Rankine

- **Fracción de vapor de purga del ciclo de vapor:** fracción del vapor que se purga del ciclo para control operativo y de calidad del fluido. Puede representar pérdidas asociadas a mantenimiento de pureza, control de concentración o condiciones del circuito de vapor.
- **Temperatura ambiente de diseño del condensador [°C]:** temperatura ambiente de referencia usada para diseñar y evaluar el desempeño del condensador. En sistemas de enfriamiento seco, influye directamente sobre la presión de condensación y la eficiencia del ciclo.
- **Diferencia de temperatura del intercambiador [°C]:** diferencia de temperatura de diseño asociada al sistema de enfriamiento seco. Representa la separación térmica entre el aire ambiente y la temperatura de condensación o intercambio considerada en el diseño.
- **Ratio de presión del condensador:** factor aplicado a la presión de condensación para representar condiciones de operación del condensador. Afecta el desempeño del ciclo Rankine y la eficiencia de conversión térmica-eléctrica.

- **Presión mínima del condensador [inHg]:** presión mínima permitida en el condensador. Establece un límite operacional para evitar condiciones fuera del rango seguro o representativo del ciclo de vapor.
- **Número de partes de niveles de carga del sistema de enfriamiento:** número de intervalos usados para representar el desempeño del sistema de enfriamiento a distintas cargas parciales. Un mayor número permite una representación más detallada de la operación parcial.

Almacenamiento térmico

- **Altura del estanque de almacenamiento [m]:** altura total del tanque cuando está lleno con HTF. Influye en el volumen disponible de almacenamiento y en la geometría del sistema de sales fundidas.
- **Altura mínima permitida del fluido en el tanque de almacenamiento [m]:** nivel mínimo de HTF que debe permanecer en el tanque. Evita operar por debajo de condiciones seguras o fuera de la capacidad útil del sistema.
- **Número de pares de tanques de almacenamiento:** cantidad de pares equivalentes de tanques caliente-frío. En un sistema de sales fundidas de dos tanques, un par corresponde a un tanque frío y un tanque caliente.
- **Temperatura mínima permitida en el HTF del estanque frío [°C]:** temperatura mínima admisible del fluido en el tanque frío. Sirve como límite de operación y puede activar calefacción auxiliar para evitar solidificación o condiciones térmicas no deseadas.
- **Capacidad nominal del calentador auxiliar del tanque frío [MW]:** potencia nominal del sistema de calefacción auxiliar del tanque frío.
- **Temperatura mínima permitida en el HTF del estanque caliente [°C]:** temperatura mínima admisible del fluido de transferencia de calor en el tanque caliente. Es un umbral mínimo usado para el control térmico del tanque caliente y para evitar que el HTF caiga por debajo de una temperatura admisible.
- **Capacidad nominal del calentador auxiliar del tanque caliente [MW]:** potencia nominal del sistema de calefacción auxiliar del tanque caliente.

Costos de instalación

- **Costos de mejoras del sitio por metro cuadrado [\$/m²]:** costo específico asociado a la preparación del terreno y mejoras del sitio, como nivelación, caminos internos, drenaje u obras civiles preliminares.
- **Costo de los heliostatos por metro cuadrado [\$/m²]:** costo específico del campo de heliostatos por unidad de área reflectante. Incluye el costo asociado a los espejos, estructura, accionamiento y componentes principales del heliostato según el alcance definido por el modelo.
- **Costos del campo de heliostatos [\$]:** costo fijo adicional del campo solar, independiente del costo específico por metro cuadrado. Permite incorporar partidas que no escalan directamente con el área reflectante.

- **Costos de la torre [\$]:** costo fijo asociado a la torre y componentes del receptor. Permite representar costos base que no dependen directamente de la escala del área del receptor.
- **Costo de referencia del receptor [\$]:** costo del receptor utilizado como referencia para escalar el costo del receptor de la planta simulada. El modelo compara el área del receptor diseñado con el área de referencia.
- **Área de referencia del receptor [m²]:** área superficial del receptor correspondiente al costo de referencia. Se usa para escalar el costo del receptor cuando el receptor diseñado tiene un área distinta.
- **Costo de almacenamiento térmico por kWh [\$/kWh]:** costo específico del sistema de almacenamiento térmico por unidad de capacidad térmica almacenada. Incluye el costo asociado al sistema de tanques, medio de almacenamiento y componentes relacionados según el alcance del modelo.
- **Balance de los costos de planta por kWe [\$/kWe]:** costo específico del balance de planta por unidad de potencia eléctrica. Considera equipos auxiliares, infraestructura eléctrica y otros sistemas necesarios para integrar la planta, excluyendo los componentes principales modelados por separado.
- **Costo por ciclo de potencia por kWe [\$/kWe]:** costo específico del bloque de potencia por unidad de potencia eléctrica nominal. Incluye el conjunto turbina-generador y componentes principales del ciclo de conversión térmica-eléctrica.
- **Costo del calentador paralelo [\$/kWh]:** costo específico del calentador paralelo o auxiliar por unidad de capacidad térmica. En el modelo SAM esta variable está asociada al costo del sistema de calentamiento auxiliar cuando se habilita esa configuración.
- **Costo de ingeniería y construcción por hectárea/acre:** costo EPC asociado al área del proyecto. En el backend esta variable se entrega a SAM por acre, pero puede ser en hectárea para facilidad del usuario;
- **Costo de ingeniería y construcción por porcentaje de los costos directos de capital [%]:** porcentaje aplicado sobre los costos directos de capital para estimar costos de ingeniería, procura y construcción.
- **Costos de ingeniería y construcción por watt [\$/W]:** costo EPC específico por unidad de potencia instalada. Permite representar costos que escalan con la potencia de la planta.
- **Costos de ingeniería y construcción fijos [\$]:** monto fijo de EPC que no escala directamente con área, potencia ni porcentaje de costos directos.
- **Costo del terreno por acre [\$/acre]:** costo específico de adquisición o uso del terreno por acre. En el formulario aparece como "hectárea", pero la variable del backend y SAM corresponde a costo por acre.

5. Supuestos de la calculadora CSP

Además de las variables que el usuario modifica en el formulario, la calculadora fija internamente una serie de parámetros técnicos para simplificar la experiencia de uso y mantener una configuración base coherente con una planta CSP de torre central con sales fundidas. Estos supuestos provienen de dos fuentes: valores por defecto de PySAM mediante `TcsmoltenSalt.default("MSPTNone")`[10] y valores fijados explícitamente en la rutina del backend.

Recurso solar y punto de diseño

- **Archivo meteorológico:** se selecciona internamente a partir de la ubicación escogida por el usuario. El usuario no carga directamente el archivo meteorológico; la calculadora usa el archivo asociado al punto geográfico seleccionado.
- **DNI de diseño [W/m^2]:** no es ingresado por el usuario. Se calcula como el percentil 95 de los valores horarios positivos de DNI del archivo meteorológico, considerando sólo valores de DNI mayores a 50 W/m^2 . Este valor representa una condición de alta radiación usada como referencia para dimensionar el sistema.

Diseño térmico del sistema

- **Temperatura caliente de diseño del HTF [$^{\circ}\text{C}$]: se fija en 574°C .** Representa la temperatura nominal caliente de las sales fundidas a la salida del receptor o entrada al sistema caliente en condiciones de diseño.
- **Temperatura fría de diseño del HTF [$^{\circ}\text{C}$]: se fija en 290°C .** Representa la temperatura nominal fría de las sales fundidas luego de ceder calor al ciclo de potencia.
- **Eficiencia nominal del ciclo térmico: se fija en 0,412.** Representa la eficiencia de conversión térmica-eléctrica del ciclo de potencia en condiciones de diseño.

Campo de heliostatos

- **Número de facetas en eje X del heliostato: se fija en 2.** Representa la subdivisión del heliostato en facetas ópticas en dirección horizontal. Figura 2 de referencia
- **Número de facetas en eje Y del heliostato: se fija en 8.** Representa la subdivisión del heliostato en facetas ópticas en dirección vertical. Figura 2 de referencia

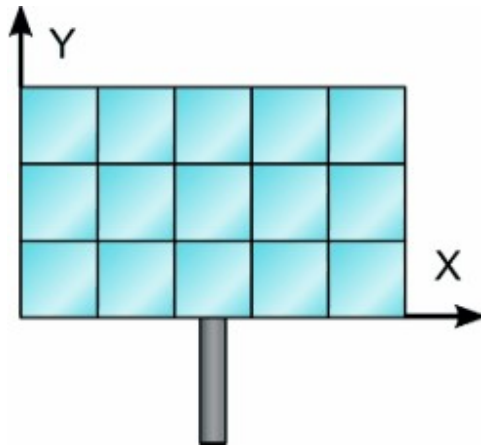


Figura 2 geometría de los heliostatos.

- **Tipo de enfoque del heliostato:** se fija en 1, correspondiente a enfoque ideal en la configuración usada por SAM/PySAM.
- **Tipo de canting o inclinación del heliostato:** se fija en 1, correspondiente a la inclinación en eje según la convención de SAM/PySAM.
- **Velocidad máxima de viento para operación de heliostatos [m/s]:** se fija en 15 m/s. Sobre este valor, el modelo considera que los heliostatos no operan normalmente por condición de viento.
- **Energía requerida para desplegar un heliostato [kWe-h]:** se fija en 0,025 kWe-h por heliostato. Representa la energía necesaria para mover un heliostato desde posición de resguardo hacia posición operacional.
- **Potencia requerida para seguimiento de un heliostato [kWe]:** se fija en 0,055 kWe por heliostato. Representa el consumo eléctrico asociado al seguimiento solar durante operación.
- **Fracción de heliostatos activos:** se fija en 1,0, por lo que se asume que el 100% de los heliostatos disponibles puede operar cuando las condiciones lo permiten.
- **Factor de sobre área del terreno del campo solar:** se fija en 1,0. Representa que no se aplica un factor adicional de expansión sobre el área calculada del campo solar.
- **Uso de agua por lavado de heliostatos [L/m²]:** se fija en 0,7 L/m². Representa el consumo específico de agua para limpieza de espejos.
- **Frecuencia de lavado de heliostatos [días]:** se fija en 63 días. Representa el intervalo asumido entre lavados del campo solar.
- **Tipo de modelo de campo solar:** se fija en 1, lo que indica que el campo se diseña internamente mediante la lógica de optimización de SAM/SolarPILOT para la configuración dada.

- **Algoritmo de optimización del campo: se fija en 1.** Corresponde al algoritmo usado por SAM/PySAM para el diseño del campo solar. En este caso optimiza el campo solar para una altura fija y parámetros ingresados por el usuario más información se encuentra en detalle en la sección 6. Diseño de campo de heliostatos.
- **Tolerancia de convergencia de optimización: se fija en 0,001.** Define el criterio numérico de convergencia de la optimización del campo.
- **Penalización por exceso de flujo: se fija en 0,25.** Penaliza configuraciones que generan exceso de flujo sobre el receptor durante la optimización.

Torre, receptor y fluido de transferencia de calor

- **Tipo de fluido de transferencia de calor del receptor: se fija en 17,** correspondiente a sal solar compuesta por 60% NaNO_3 y 40% KNO_3 según la codificación de SAM/PySAM.
- **Material de los tubos del receptor: se fija en 2,** correspondiente a acero inoxidable AISI 316 en la configuración usada por SAM/PySAM.
- **Diámetro exterior de los tubos del receptor [mm]: se fija en 40 mm.**
- **Espesor de pared de los tubos del receptor [mm]: se fija en 1,25 mm.**
- **Constante de longitud de tuberías [m]: se fija en 0.** La longitud de tuberías se estima a partir del factor multiplicador de tuberías y la altura de la torre, sin agregar una longitud fija adicional.
- **Número de días para búsqueda del mapa de flujo: se fija en 8 días.** Representa el número de días usados por el modelo para construir o evaluar el mapa de flujo solar sobre el receptor.
- **Frecuencia horaria para búsqueda del mapa de flujo [h]: se fija en 2 h.** Define cada cuántas horas se evalúan condiciones para el mapeo de flujo.
- **Eficiencia electromecánica de la bomba del HTF del receptor: se fija en 0,85.** Representa la eficiencia de conversión entre potencia eléctrica y potencia hidráulica útil en el sistema de bombeo del receptor.
- **Tipo de receptor: se fija en 0, correspondiente a receptor externo.** Por lo tanto, la calculadora no modela receptores de cavidad como alternativa editable por el usuario.

Ciclo de potencia y ciclo Rankine

- **Configuración del ciclo de potencia: se fija en 0,** correspondiente a un ciclo Steam Rankine. La calculadora no habilita un ciclo definido por el usuario.
- **Tipo de control de presión de entrada de la turbina: se fija en 1,** correspondiente a presión fija según la convención de SAM/PySAM.
- **Tipo de condensador: se fija en 2,** correspondiente a condensador enfriado por aire. Por esta razón, el formulario usa variables asociadas a enfriamiento seco, como temperatura ambiente de diseño, diferencia de temperatura del intercambiador y presión mínima del condensador.

Almacenamiento térmico

- **Porcentaje inicial del volumen útil caliente [%]: se fija en 30%.** Representa la condición inicial del sistema de almacenamiento al comienzo de la simulación, indicando qué fracción del almacenamiento disponible parte como HTF caliente.
- **Coeficiente de pérdida de calor del tanque [$\text{W/m}^2\text{-K}$]: se fija en 0,4 $\text{W/m}^2\text{-K}$.** Representa las pérdidas térmicas del sistema de almacenamiento hacia el ambiente, asociadas al aislamiento y geometría de los tanques.

Sistema de control y operación

- **Pérdida parasitaria del calentador auxiliar [MWe/MWcap]: se fija en 0,0023 MWe/MWcap .** Representa el consumo auxiliar asociado al sistema de calentamiento auxiliar.
- **Optimización de despacho: se fija en 0,** por lo que la calculadora no optimiza económicamente el despacho de energía. La operación se simula sin resolver una estrategia de despacho óptimo.
- **Inicialización del seguimiento del campo solar: se fija en 1,** habilitando el seguimiento inicial del campo de heliostatos en la simulación.

IMPORTANTE: Costos, financiamiento y variables económicas fuera de las pedidas al usuario son dejadas por defecto y no son de interes para esta herramienta que no busca resultados financieros.

6. Diseño del campo de heliostato

En esta calculadora, el diseño del campo de heliostatos se calcula automáticamente porque el backend fija `field_model_type = 1`. En la documentación de PySAM esta opción corresponde a “design field”, es decir, SAM/PySAM no espera que el usuario entregue una tabla de posiciones de heliostatos, sino que genera internamente un campo solar compatible con la torre, el receptor y el punto de diseño definidos.

El cálculo del heliocampo se apoya en SolarPILOT, la herramienta de NREL usada por SAM para diseño y caracterización óptica de campos solares de torre. SolarPILOT evalúa heliostatos individuales mediante aproximaciones analíticas de imagen de flujo, incluyendo pérdidas por coseno, sombreado, bloqueo, atenuación atmosférica, error óptico, reflectancia, intercepción en el receptor y restricciones de flujo[13].

En términos prácticos, el algoritmo sigue esta lógica:

1. Define el objetivo térmico del campo solar. A partir de **la potencia bruta de diseño de la turbina**, la **eficiencia nominal del ciclo**, el **DNI de diseño** y el **múltiplo solar**, el modelo estima cuánta **potencia térmica debe entregar el receptor en condiciones de diseño**.

2. Construye una zona candidata para ubicar heliostatos. La calculadora limita el campo usando la **razón mínima y máxima de distancia entre heliostato y torre** (land_min y land_max). En esta configuración, esas razones se interpretan respecto de **la altura de la torre**, por lo que definen un anillo o región admisible alrededor de la torre.
3. Evalúa el desempeño óptico de posiciones candidatas. Para cada ubicación potencial, el modelo estima cuánta radiación puede reflejarse efectivamente hacia el receptor. Esta evaluación considera la posición solar, la **geometría del heliostato**, la **altura de la torre**, las **dimensiones del receptor**, el **error óptico**, la **reflectancia**, la **atenuación atmosférica** y las **pérdidas por sombreado y bloqueo entre heliostatos**.
4. Selecciona heliostatos hasta cumplir el diseño. El modelo agrega o selecciona heliostatos buscando alcanzar la **potencia térmica requerida en el receptor**. No se trata solamente de maximizar el número de heliostatos, sino de escoger posiciones que aporten energía útil con buena eficiencia óptica y sin provocar condiciones de flujo excesivo sobre el receptor.
5. **Verifica restricciones de flujo sobre el receptor**. La variable flux_max limita el **flujo térmico máximo admisible en el receptor**. Además, opt_flux_penalty = 0,25 **penaliza configuraciones que exceden el flujo permitido**, de modo que el diseño evite concentraciones demasiado altas que podrían dañar o sobreexigir el receptor.
6. **Itera hasta converger**. La optimización usa opt_algorithm = 1, el **algoritmo de optimización por defecto de PySAM/SolarPILOT**, con una **tolerancia de convergencia** opt_conv_tol = 0,001. Además, PySAM considera por defecto un tamaño de paso inicial de optimización y un número máximo de iteraciones si no se modifican explícitamente.
7. Entrega un **campo solar equivalente para la simulación anual**. Una vez diseñado el campo, SAM/PySAM usa ese **heliocampo** para simular la operación **horaria de la planta durante el año meteorológico: energía incidente, energía reflejada, energía absorbida por el receptor, pérdidas ópticas, operación del receptor y producción eléctrica final**.

En resumen, el algoritmo busca un campo de heliostatos que entregue la potencia térmica de diseño al receptor con una buena eficiencia óptica y respetando límites geométricos y térmicos. No optimiza directamente el LCOE ni el despacho económico en esta configuración; esos aspectos quedan fuera porque la calculadora mantiene desactivada la optimización de despacho y no expone todas las variables económicas y financieras de SAM.

7. Interfaz de usuario

PENDIENTE

8. Referencias

- [1] NREL-PySAM Documentation. "PySAM Overview". Indica que PySAM está construido sobre PySSC/SSC y recomienda comparar los casos de PySAM contra SAM. Disponible en: <https://nrel-pysam.readthedocs.io/en/main/overview.html>
- [2] NLR - System Advisor Model (SAM). Página oficial de bienvenida. Define a SAM como una herramienta de análisis tecnoeconómico para estudiar la factibilidad técnica, económica y financiera de proyectos. Disponible en: <https://sam.nlr.gov/>
- [3] Neises, T. et al. (2024). "System Advisor Model (SAM) Improvements for Emerging Solar Thermal Applications". NREL/PO-5700-91498. Indica uso de SAM/PySAM para feasibility studies y otras aplicaciones. Disponible en: <https://www.nlr.gov/docs/fy26osti/91498.pdf>
- [4] Kesseli, D. et al. (2018). "CSP-Plant Modeling Guidelines and Compliance of the System Advisor Model (SAM)". NREL/CP-5700-72183. Reporta fuerte concordancia entre SAM y las guías SolarPACES. Disponible en: <https://docs.nlr.gov/docs/fy19osti/72183.pdf>
- [5] NLR - System Advisor Model. "CSP Validation". Página oficial con estudios comparativos frente a sistemas reales en España para trough físico y torre de sales fundidas. Disponible en: <https://sam.nlr.gov/concentrating-solar-power/csp-validation.html> [6] Ministerio de Energía de Chile. "Exploradores". Señala que estas herramientas permiten una evaluación preliminar del potencial energético en cualquier sitio definido por el usuario. Disponible en: <https://exploradores.minenergia.cl/>
- [7] Molina, A., Falvey, M. & Rondanelli, R. A solar radiation database for Chile. *Sci Rep* **7**, 14823 (2017). Es la publicación de la base de datos de radiación solar sostenida por el Ministerio de Energía. Disponible en: <https://www.nature.com/articles/s41598-017-13761-x>
- [8] Comisión Nacional de Energía (2009). "Modelación del recurso solar y eólico en el norte de Chile". Proporciona información indicativa, obtenida mediante modelación matemática de alta resolución para fines de prospección, dando el antecedente de estas prácticas en Chile al 2009. Disponible en: <https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/modelacionrecursosolareolico.pdf>
- [9] Ministerio de Energía de Chile (2021). "Identificación y Cuantificación de Potenciales de Energías Renovables 2021". Indica que para los recursos eólico, solar fotovoltaico y solar CSP la información proviene de modelaciones numéricas de la atmósfera e información satelital contenidas en los Exploradores de Energía. Disponible en: https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/mine-2021_identificacion_y_cuantificacion_de_potenciales_de_energias_renovables_v2.pdf
- [10] NREL-PySAM Documentation. "TcsmoltenSalt". Módulo de PySAM para torre CSP de sales fundidas. Disponible en: <https://nrel-pysam.readthedocs.io/en/v7.1.0/modules/TcsmoltenSalt.html>
- [11] Sengupta, M. et al. (2015). "Best Practices Handbook for the Collection and Use of Solar Resource Data for Solar Energy Applications". NREL/TP-5D00-63112. Expone buenas prácticas y distingue entre screening/prefactibilidad y etapas avanzadas con medición de alta calidad en sitio. Disponible en: <https://docs.nlr.gov/docs/fy15osti/63112.pdf>
- [12] NREL-PySAM Documentation. "List of SAM Configurations". Muestra configuraciones de tecnologías CSP disponibles en PySAM. Disponible en: <https://nrel-pysam.readthedocs.io/en/main/sam-configurations.html>
- [13] NLR -Concentrating Solar Power. Data & Tools SolarPILOT. "Solar Power Tower Integrated Layout and Optimization Tool". Describe la integración del algoritmo de optimización de SolarPILOT para el diseño del campo de heliostatos. Disponible en: <https://www.nlr.gov/csp/solarpilot>
- [14] "System Advisor Model (SAM) Case Study: Gemasolar Fuentes de Andalucía, Spain". Disponible en https://sam.nlr.gov/images/web_page_files/sam_case_csp_salt_tower_gemasolar_2013-1-15.pdf