



Universidad
Zaragoza

Trabajo de Fin de Grado

**Herramienta para estimar el coste de la
obra civil en plantas solares**

**Tool to estimate the cost of civil works in
solar plants**

Autor

GUILLERMO ARENAZ PERALO

Supervisor

LUCAS SANZO NAVARRO

Ingeniería de Tecnologías Industriales

Escuela de Ingeniería y Arquitectura
2023

RESUMEN

En las últimas décadas, se ha observado un crecimiento exponencial en la instalación de plantas fotovoltaicas en todo el mundo. Este incremento se ha visto impulsado por mejoras tecnológicas en la fabricación de módulos solares y una reducción significativa en los costos asociados. En vista del incremento de las inversiones en plantas solares, resulta oportuno desarrollar una herramienta práctica y rápida que permita estimar los costos asociados a la construcción de este tipo de instalaciones.

El objetivo de este proyecto es precisamente desarrollar dicha herramienta, posibilitando obtener de manera ágil información sobre la viabilidad económica de una inversión en una planta solar, en etapas tempranas del proyecto ("greenfield").

Para lograrlo, se han definido una serie de unidades de trabajo consideradas relevantes para el cálculo de costos económicos del proyecto. A través de datos de entrada proporcionados por el usuario, la herramienta realiza un cálculo aproximado de los costos asociados. Específicamente, este trabajo abordará los costos relacionados con la obra civil, que representan una parte importante de la instalación y que, dependiendo de las características del sitio, pueden ser aún más significativos.

Con el fin de simplificar el uso de la herramienta y evitar que el usuario invierta una cantidad significativa de tiempo en el proceso, este trabajo detalla de manera exhaustiva cómo obtener todos los datos necesarios sin necesidad de desplazarse al lugar del proyecto. Además, se proporcionará un ejemplo práctico y recomendaciones para facilitar la correcta utilización de la herramienta y garantizar resultados precisos.

ABSTRACT

In recent decades, there has been exponential growth in the installation of photovoltaic plants worldwide. This increase has been driven by technological improvements in solar module manufacturing and a significant reduction in associated costs. Given the rise in investments in solar plants, it is opportune to develop a practical and fast tool that allows estimating the costs associated with the construction of such installations.

The objective of this project is precisely to develop this tool, enabling the quick acquisition of information on the economic feasibility of investing in a solar plant, in the early stages of the project ("greenfield").

To achieve this, a series of relevant work units have been defined for calculating the project's economic costs. Using user-provided input data, the tool performs an approximate calculation of the associated costs. Specifically, this work will address the costs related to civil works, which constitute a significant portion of the installation and, depending on the site's characteristics, can be even more significant.

In order to simplify the tool's usage and prevent users from investing a significant amount of time in the process, this work extensively details how to obtain all the necessary data without the need to visit the project site. Additionally, a practical example and recommendations will be provided to facilitate the correct utilization of the tool and ensure accurate results.

Índice

1. Introducción	7
1.1. Energía solar	7
1.1.1. Ventajas y desventajas	7
1.1.2. Energía fotovoltaica	8
1.2. Proyección y crecimiento de la energía solar fotovoltaica	9
1.2.1. Ámbito internacional	9
1.2.2. Ámbito nacional	11
2. Estrategia y regulación	12
2.1. Estrategia y Legislación Europea	12
2.1.1. Paquete Fit-for-55	12
2.1.2. REPowerEU	12
2.1.3. Solar Strategy	13
2.2. Estrategia y legislación españolas	13
2.2.1. Marco sectorial	13
2.2.2. Subastas REER	13
2.2.3. Impacto de la industria fotovoltaica en la creación de empleo en España	14
3. Descripción de la obra civil de plantas solares	15
3.1. Componentes de una instalación solar fotovoltaica	15
3.2. Montaje e instalación de paneles solares	19
3.3. Preparación del terreno	23
3.3.1. Movimiento de tierra	24
3.3.2. Red de drenaje	24
4. Definición de los distintos escenarios que afectan al coste de la obra civil	26
4.1. Movimiento de tierras	26
4.2. Creación de caminos	27
4.3. Cimentación	28
5. Definición de las unidades de obra	29
5.1. Introducción a las unidades de obra	29
5.2. Unidades de obra	30
5.2.1. Preparación del terreno:	30

5.2.2. Cimentaciones y estructuras de soporte:	34
5.2.3. Infraestructura de acceso y caminos:	35
5.2.4. Infraestructura de seguridad:	36
5.2.5. Gestión de residuos:	36
6. Aplicación a un caso real	37
6.1. Introducción	37
6.2. Introducción datos de entrada	38
6.3. Datos de interés	43
6.4. Resultados	44
7. Conclusión	46
8. Bibliografía	47

Capítulo 1

Introducción

1.1. Energía solar

La energía solar es aquella que es obtenida a partir del aprovechamiento de la radiación electromagnética proveniente del Sol. Normalmente, se obtiene por medio de paneles y espejos, a través de [1]:

- **Células solares fotovoltaicas:** convierten la luz solar directamente en electricidad por el llamado efecto fotoeléctrico, por el cual determinados materiales son capaces de absorber fotones y liberar electrones, generando así una corriente eléctrica.
- **Colectores solares térmicos:** a través de paneles o espejos absorben y concentran el calor del sol, transfiriéndolo a un fluido y conduciéndolo por tuberías para su aprovechamiento en edificios e instalaciones o también para la producción de electricidad.

1.1.1. Ventajas y desventajas

El uso de energía solar también trae consigo una serie de inconvenientes que, en la actualidad, se tratan de reducir. Algunas de las ventajas e inconvenientes que aporta el uso de este tipo de energía son [2]:

- **Ventajas:**
 1. Se trata de una energía limpia que no genera gases de efecto invernadero ni contamina durante su uso y que, por tanto, ayuda a reducir la huella de carbono de forma significativa.
 2. Es una fuente de energía inagotable, renovable y sostenible.
 3. Puede ser utilizada para calentar, a diferencia de otras renovables.
 4. La luz solar es abundante y está muy disponible en prácticamente cualquier lugar del mundo, por lo que el empleo de paneles solares es una opción viable en cualquier punto geográfico.

5. El uso de energía solar potencia la seguridad energética al reducirse la dependencia de suministros del exterior.
6. Disminuye la necesidad de usar combustibles fósiles y ayuda a conservar los recursos naturales.

■ Desventajas

1. Tiene una eficiencia relativamente baja en cuanto a la energía eléctrica que puede convertir, alrededor de un 25 %; aunque conforme avanza su desarrollo se está logrando aumentar su rendimiento.
2. A largo plazo, la energía solar puede salir barata, pero el coste inicial de su instalación es elevado y no es accesible para todos los usuarios.
3. Es necesaria un área de instalación grande con el objetivo de producir una cantidad de energía eléctrica adecuada para cubrir las necesidades energéticas.
4. No es constante, puesto que fluctúa a lo largo del día y por la noche no está disponible. Para evitar esta desventaja hay que recurrir al almacenamiento de energía. Además, su efectividad es menor durante los meses invernales.
5. En función de determinadas condiciones atmosféricas, el rendimiento de los paneles solares puede disminuir. Por ejemplo, durante largos periodos de calor y humedad o en situaciones de nubes y niebla.
6. La contaminación es un problema para la energía solar, por lo que, en ciudades con altos grados de contaminación atmosférica, su rendimiento es mucho menor.
7. Durante la producción de paneles solares, se emite gran cantidad de gases de efecto invernadero y de desechos tóxicos. No obstante, esta desventaja se compensa durante su uso reduciendo la huella de carbono.

1.1.2. Energía fotovoltaica

Actualmente, la energía fotovoltaica se encuentra en una posición de liderazgo en las tecnologías de generación instaladas a nivel mundial, esto incluye fuentes renovables y no renovables. Según la normativa actual, se encuentran los siguientes tipos de instalación [3]:

1. Instalaciones aisladas.
2. Instalaciones conectadas a la Red de Distribución. Dentro de esta modalidad, encontramos:
 - a) Instalación para venta de energía a la red.
 - b) Autoconsumo sin excedentes.
 - c) Autoconsumo con excedentes.

- 1) Autoconsumo con excedentes acogido a compensación (potencia inferior a 100kW).
- 2) Autoconsumo con excedentes no acogido a compensación.

Cada modalidad de autoconsumo podrá clasificarse, a su vez en individual, si solo existe un consumidor asociado a la instalación o instalaciones en producción, o colectivo, si hay varios consumidores asociados a la instalación o instalaciones de producción próximas.

1.2. Proyección y crecimiento de la energía solar fotovoltaica

1.2.1. Ámbito internacional

La fotovoltaica ya supone un 28 % de la potencia renovable total acumulada a nivel mundial, superando a la eólica y sólo por detrás de la hidráulica. China se encuentra en posición de liderazgo en capacidad acumulada con 309 GW instalados, casi un tercio de la capacidad fotovoltaica instalada a nivel mundial [4].

Respecto a la evolución de los costes, cada vez que se duplica la capacidad instalada, se reduce un 20 % el precio del módulo fotovoltaico. Desde 1976, el precio de los módulos se ha reducido en un 99,6 % [4]. La industria de la energía solar se encuentra en pleno

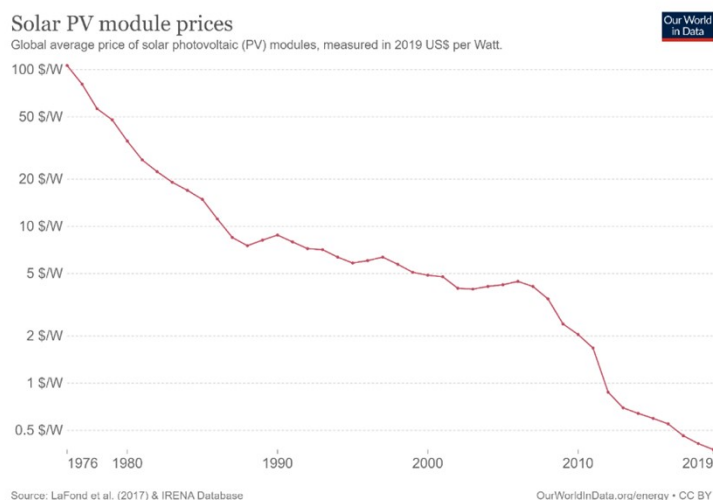


Ilustración 1.1: Precio medio de los módulos solares fotovoltaicos con el tiempo [5]

aumento alrededor del mundo desde hace décadas. La energía solar fotovoltaica es la base para un sistema energético descarbonizado y eficiente en costes, especialmente en el contexto del aumento de los precios del gas natural, gracias a su competencia económica y sencillez tecnológica. De hecho, los principales analistas recomiendan una considerable ampliación de la capacidad instalada mundial en los próximos años para poder cumplir con los Acuerdos de París¹ y mitigar el cambio climático [4].

¹El Acuerdo de París es un acuerdo dentro del marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático que busca mantener el aumento de temperatura global promedio por debajo de los 2°C por encima de los niveles pre-industriales.

La Agencia Internacional de la Energía (IEA) prevé que las renovables se conviertan en la mayor fuente de generación eléctrica global en 2025, sobrepasando al carbón. Además, pronostica que la capacidad de potencia instalada de energía solar fotovoltaica sobrepase al gas natural en 2026 y al carbón en 2027, convirtiéndose en la principal en el mundo [6].

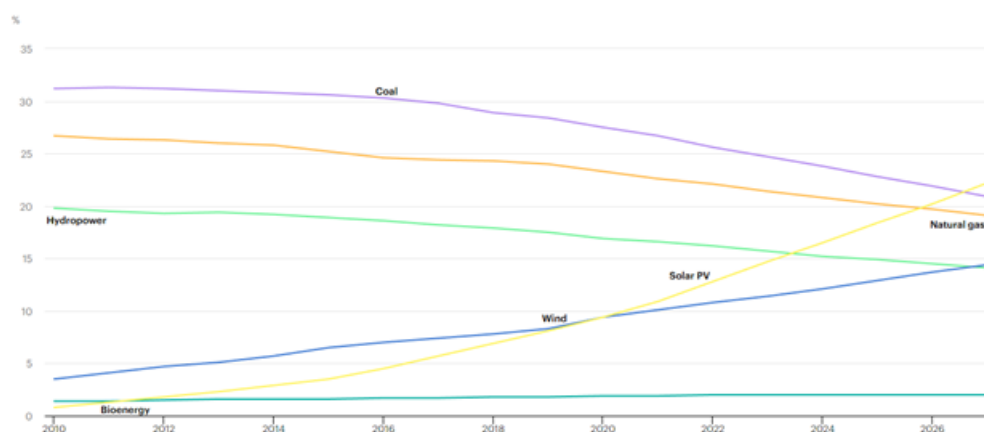


Ilustración 1.2: Estimación de la evolución de la capacidad instalada de los distintos tipos de fuentes de energía con el tiempo [6].

En una perspectiva más a largo plazo, según el informe World Energy Outlook 2022 [7], la IEA plantea varios escenarios sobre el sistema energético mundial según las distintas previsiones de reducción de emisiones. Los escenarios que sugiere para la elaboración del estudio son: *Stated Policies Scenario* (STEPS), *Announced Pledges Scenario* (APS), *Net Zero Emissions by 2050 Scenario* (NZE) y, por último, el *Sustainable Development Scenario* (SDS) [7].

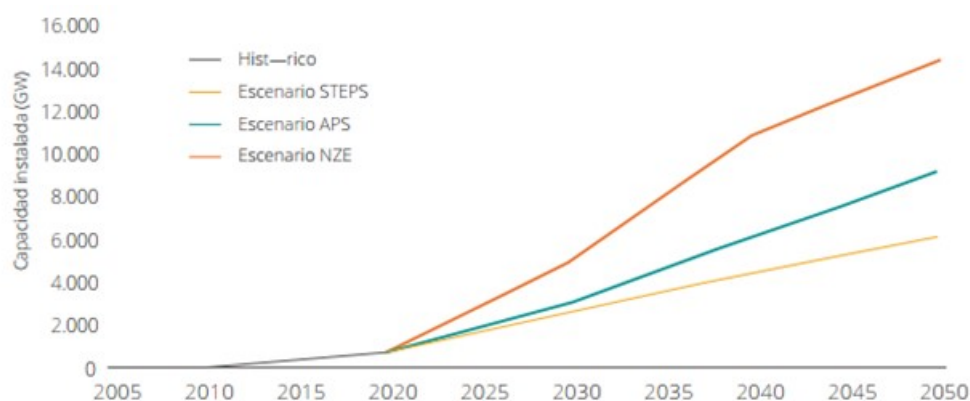


Ilustración 1.3: Previsión de capacidad fotovoltaica instalada (GW) en función de los distintos escenarios [7].

- **Escenario STEPS:** Recoge las políticas actuales de reducción de emisiones en vigor o anunciadas por los gobiernos a nivel mundial. No permitiría cumplir con los objetivos de París puesto que alcanzaría los 2,6°C por encima de los niveles

preindustriales en 2100. En este escenario, la capacidad de energía fotovoltaica instalada prevista es de 2.550 GW en 2030 y 6.163 GW en 2050.

- Escenario APS: Se basa en los compromisos anunciados por los gobiernos. Este escenario tampoco permitiría cumplir con los Acuerdos de París, pues la velocidad de implementación de las políticas anunciadas de transición energética no es suficiente para ello. La previsión de instalación de la capacidad fotovoltaica en este caso sería de 3.063 GW para 2030 y 9.095 GW para 2050.
- Escenario NZE: Asume la neutralidad en emisiones del sistema energético mundial en 2050. Para alcanzarlo, la capacidad instalada de fotovoltaica debería llegar a 4.956 GW en 2030 y 14.458 GW en 2050.

En la previsión a largo plazo, el escenario *Business-as-usual* de *Solar Power Europe* (SPE), que extrapola las tendencias del mercado anteriores a la invasión de Ucrania, preveía que la potencia fotovoltaica de la UE se duplicase cada 5 años. Esta tasa de crecimiento denota que la industria está preparada para desplegar mayores capacidades que lo que han previsto sus propios gobiernos. Debido a lo anterior, sumado a la urgente necesidad de descarbonizar la economía europea, para aumentar su independencia energética, SPE plantea un objetivo de 1 TW solar en 2030. Este es un objetivo que ha sido apoyado por los ministros de Energía de cinco estados miembros (Austria, Bélgica, Lituania, Luxemburgo y España) [4].

1.2.2. **Ámbito nacional**

España lleva una serie de años marcados por un incremento continuado de la capacidad instalada fotovoltaica, lo cual repercute en el peso de la tecnología en el mix de generación. Tradicionalmente, la fotovoltaica estaba estabilizada en torno a un 3 % de contribución al mix, mientras que en 2021 aumentó hasta el 8,1 % [4].

Con respecto al conjunto de las renovables, la fotovoltaica también incrementa su peso, pasando del 7 % tradicional al 20 % de la generación renovable.

Capítulo 2

Estrategia y regulación

2.1. Estrategia y Legislación Europea

2.1.1. Paquete Fit-for-55

El paquete Fit-for-55, lanzado por la Comisión Europea en julio de 2021, presentaba una reforma del marco legislativo de la UE para un aumento del objetivo de reducción de gases de efecto invernadero a 2030 de -55 % [4].

El principal cambio que afecta al sector fotovoltaico es la revisión de la Directiva 2018/2001 de Energías Renovables (REDIII), para la que la Comisión propuso aumentar el objetivo de generación de renovables del 32 % actual al 40 % [4]. Para ello, introduce una serie de modificaciones al texto actual de la Directiva en el siguiente sentido [4]:

- Simplificación de la tramitación de proyectos de energía renovable.
- Facilitación de acuerdos de compra de energía renovable (PPA¹).
- Objetivos y sistemas de certificación para hidrógeno renovable.
- Impulso de la electrificación en el transporte particular.

Como resultado de la guerra de Ucrania, de este 40 % de objetivo de renovables de la Comisión Europea, se ha alcanzado un acuerdo para elevarlo a un 45 %.

2.1.2. REPowerEU

Actualmente, la UE importa un 90 % del gas que consume, con Rusia aportando más del 45 % de estas importaciones. Además, el 25 % de las importaciones de petróleo de la UE y el 45 % de sus importaciones de carbón también provienen de Rusia [4].

Como respuesta a la invasión de Ucrania por parte de Rusia, la Comisión Europea presentó en marzo de 2022 el plan REPowerEU, cuyo objetivo es alcanzar la independencia energética de Rusia antes de 2030.

¹Un PPA (Power Purchase Agreement) es un acuerdo o contrato de compraventa de energía a largo plazo entre un desarrollador renovable y un consumidor.

Para la transformación industrial, la Comisión Europea pone el foco en la descarbonización de la industria de gran consumo, fomentando el surgimiento de soluciones innovadoras basadas en hidrógeno y el acceso a los precios competitivos de la electricidad renovable a través de los PPA [4].

2.1.3. Solar Strategy

La Comisión Europea presentó también en mayo de 2022 Solar Strategy, una estrategia con los siguientes objetivos [4]:

- Acelerar el despliegue a través de medidas del lado de la demanda para cumplir con los objetivos renovables de 2030.
- Garantizar el suministro de equipos y componentes fotovoltaicos a través de medidas del lado de la oferta, incluidos altos estándares de sostenibilidad y resiliencia de la cadena de suministro fotovoltaica mundial.
- Maximizar los beneficios socioeconómicos, el potencial y el valor de la energía solar para la sociedad en general.

2.2. Estrategia y legislación españolas

2.2.1. Marco sectorial

En los últimos años, se ha llevado a cabo una intensa actividad regulatoria en el sector energético. Destacan diferentes decretos y leyes que han establecido el marco normativo para el desarrollo de las energías renovables en España.

Se han tomado medidas específicas para el sector fotovoltaico, como la modificación de la ley de aguas para plantas flotantes, la regulación del suministro de gases renovables e hidrógeno en la ley de hidrocarburos, y la introducción de plantas de almacenamiento independientes en el régimen de autorización [4].

Además de estas leyes y medidas, cada comunidad autónoma tiene sus propios planes y estrategias para apoyar la generación de energía renovable y cumplir con los objetivos establecidos.

2.2.2. Subastas REER

El RD 960/2020 estableció un esquema de subastas renovables en España, donde se reconocía un precio a largo plazo por la energía generada [4].

En enero de 2021, se llevó a cabo la primera subasta bajo este marco, llamada Régimen Económico de Energías Renovables (REER), asignando 2.034 MW a la energía fotovoltaica a un precio medio de 24,5 €/MWh. Los proyectos debían ser construidos antes de febrero de 2023 [4].

En octubre de 2021, se convocó la segunda subasta REER, asignando 838 MW para la fotovoltaica estándar y 6 MW para la fotovoltaica distribuida local. El precio medio de esta subasta fue de 30,6 €/MWh [4].

En 2022, se llevaron a cabo la tercera y cuarta subasta del REER. La tercera subasta fue para 520 MW, de los cuales 31 MW se asignaron a la energía fotovoltaica distribuida local. Sin embargo, la cuarta subasta resultó ser un fracaso, ya que solo se adjudicaron 5 MW de los 3300 MW disponibles debido a la falta de participación de los inversores [4].

2.2.3. Impacto de la industria fotovoltaica en la creación de empleo en España

El sector fotovoltaico cuenta con una amplia cadena de valor que generan empleo directo, indirecto e inducido.

En 2017 se crearon un total de 24.526 empleos, de los cuales 6.785 fueron directos, 11.011 indirectos y 6.729 inducidos [4]. En 2018 se generaron 29.306 empleos: 7.459 empleos directos, 13.393 empleos indirectos y 8.365 inducidos [4].

Siguiendo la tendencia de crecimiento en la creación de empleo, en 2019 se crearon un total de 58.699 puestos de trabajo, de los que 17.194 fueron empleos directos, 21.292 empleos indirectos y 20.213 empleos inducidos. Estos datos muestran un cambio de tendencia muy positivo en la industria fotovoltaica española. Cabe destacar el aumento del peso de los fabricantes en la cadena de valor, alcanzando los 5.600 empleos directos [4].

El aumento de la creación de empleo en el sector se consolida y mantiene de forma equilibrada durante 2020 con la creación de 17.568 empleos directos, 22.800 indirectos y 18.525 inducidos, haciendo un total de 58.892 empleos generados [4].

Los datos recogidos demuestran el impacto positivo del sector industrial fotovoltaico en el empleo. Como bien se viene observando, existe una clara tendencia al alza. En tan sólo cuatro años, la creación de empleo total ha sido de 261.067 empleos [4].

Capítulo 3

Descripción de la obra civil de plantas solares

Para llevar a cabo la obra civil de una planta solar, se deben tener en cuenta una importante cantidad de variables que afectan a la elección del terreno, a los componentes a usar y a las operaciones que se llevarán a cabo para efectuar la obra. A pesar de que hay sistemas fotovoltaicos cuyo montaje se realiza en ubicaciones como tejados o fachadas de edificios, en este trabajo nos centraremos en el montaje de sistemas solares sobre el suelo.

3.1. Componentes de una instalación solar fotovoltaica

Entre los elementos generales con los que suele contar una instalación solar fotovoltaica, se encuentran la célula solar, el panel solar, la caja de combinación, el regulador, las baterías y el inversor.

- **La célula solar:** El elemento principal de cualquier instalación de energía solar es el generador, que recibe el nombre de célula solar. Se caracteriza por convertir directamente en electricidad los fotones provenientes de la luz del sol. Su funcionamiento se basa en el efecto fotovoltaico [8].
- **El panel solar:** Un panel solar o módulo fotovoltaico está formado por un conjunto de células, conectadas eléctricamente, encapsuladas, y montadas sobre una estructura de soporte o marco. Proporciona en su salida de conexión una tensión continua, y se diseña para valores concretos de tensión que definirán la tensión a la que va a trabajar el sistema fotovoltaico [8].

Generalmente, los paneles solares se pueden conectar en serie, en paralelo o bien de forma combinada en serie y paralelo, formando así cadenas de paneles solares agrupados [8].

Los tipos de paneles solares vienen dados por la tecnología de fabricación de las células, y son fundamentalmente de silicio monocristalino, silicio policristalino o silicio amorfo [8].

- **Caja de combinación:** Las cajas de combinación tienen la función de agrupar la potencia que sale de las distintas cadenas de paneles. Además, sirven como dispositivos de protección contra sobrecargas y cortocircuitos, para garantizar la seguridad y protección del sistema [9].

Cada conductor proveniente de las placas se empalma en un terminal con un fusible y luego se combinan en un único conductor a la salida de la caja. Se utilizan en aquellas instalaciones que tienen de 4 a 4.000 cadenas de paneles [9].

Las cajas de combinación en plantas solares se suelen llevar a cabo a través de un pilote hincado que funciona como soporte, y atornillando después la caja de combinación a este. Generalmente se colocan cerca de los paneles solares.



Ilustración 3.1: Instalación de una caja de combinación en una instalación solar [10]

- **El regulador:** Para un correcto funcionamiento de la instalación, hay que instalar un sistema de regulación de carga en la unión entre los paneles solares y las baterías. Este elemento recibe el nombre de regulador y tiene como misión evitar situaciones de sobrecarga y descarga excesiva de la batería, con el fin de alargar su vida útil [8].

El regulador trabaja por lo tanto en las dos zonas. En la parte relacionada con la carga, su misión es la de garantizar una carga suficiente al acumulador y evitar las situaciones de sobrecarga, y en la parte de la descarga se ocupará de asegurar el suministro eléctrico diario suficiente y evitar que la batería se descargue demasiado [8].

Dado que los módulos solares tienen una tensión nominal mayor que la de la batería, si no existiera regulador se podrían producir sobrecargas. El motivo de que esta tensión nominal de los paneles sea así se debe fundamentalmente a dos razones [8]:

- Atenuar posibles disminuciones de tensión por el aumento de la temperatura.
- Asegurar la carga correcta de la batería.

El dimensionado de la instalación solar se realiza de manera que se asegure el suministro de energía en las peores condiciones de luminosidad del sol. Por ello, se toman como referencia los valores de irradiación en invierno. Esto puede provocar que en verano la energía aportada por los módulos solares sea en ocasiones el doble de los cálculos estimados, por lo que, si no se conecta el regulador entre los paneles y las baterías, el exceso de corriente podría llegar incluso a hacer hervir el electrolito de los acumuladores, con el riesgo que ello conlleva [8].

- **Baterías:** La llegada de la energía solar a los módulos fotovoltaicos no se produce de manera uniforme, sino que presenta variaciones por diferentes motivos. Algunas de estas variaciones son predecibles, como la duración de la noche o las estaciones del año, pero existen otras muchas causas que pueden producir alteraciones de manera aleatoria en la energía recibida, como puede ocurrir con un aumento de la nubosidad en un determinado instante [8].

Este hecho hace necesario utilizar algún sistema de almacenamiento de energía para aquellos momentos en que la radiación recibida sobre el generador fotovoltaico no sea capaz de hacer que la instalación funcione en los valores diseñados. Para ello se utilizan las baterías o acumuladores [8].

Las baterías son dispositivos capaces de transformar la energía química en eléctrica y viceversa. Son recargadas desde la electricidad producida por los paneles solares, a través del regulador de carga, y pueden entregar su energía a la salida de la instalación, donde será consumida [8].

Tres son las misiones que tienen las baterías en las instalaciones fotovoltaicas [8]:

- Almacenar energía durante un determinado número de días.
- Proporcionar una potencia instantánea elevada.
- Fijar la tensión de trabajo de la instalación.

Para la instalación de las baterías, es importante que estén siempre colocadas en un lugar cerrado, que proteja de la intemperie y de la acción directa del sol.



Ilustración 3.2: Banco de baterías de instalación solar [11]

Es recomendable que las baterías se coloquen sobre soportes especiales, contruïdos con madera o metales con tratamiento anticorrosi3n, y protegidos ante la humedad y el 1cido fundamentalmente [8].

Adem1s, para trabajar de forma 3ptima, el electrolito de las baterías necesita una temperatura de unos 20°C, para ello es conveniente que la sala de baterías se encuentre acondicionada t3rmicamente [8].

- **El inversor:** El inversor se encarga de convertir la corriente continua de la instalaci3n en corriente alterna, generalmente igual a la utilizada en la red el3ctrica. As3 mismo, habitualmente los inversores cuentan con un transformador que permite ajustar el voltaje al necesario [8].

El inversor es un elemento imprescindible en las instalaciones conectadas a red, y estar1 presente en la mayor3a de las instalaciones aut3nomas, sobre todo, en aquellas destinadas a la electrificaci3n de viviendas [8].

Adem1s de realizar la conversi3n de continua a alterna, el inversor debe sincronizar la onda el3ctrica generada con la de la corriente el3ctrica de la red, para que su compatibilidad sea total [8].



(a) Inversores de instalaci3n solar [12].



(b) Inversor sobre hormig3n [13]

Su instalaci3n suele hacerse o bien atornillando el inversor sobre un pilote hincado, o bien coloc1ndolo, en caso de la que hubiese, sobre una pared resistente utilizando soportes de montaje y tornillos. En caso de que el inversor sea una estructura suficientemente grande como para que la instalaci3n por los anteriores m3todos no sea viable, tambi3n pueden ser colocados sobre una zapata de hormig3n que aguante su peso.

- **Seguidor solar:** Adem1s de estructuras fijas, existen tambi3n sistemas m3viles de seguimiento solar, cuyo fin es aumentar el rendimiento de la instalaci3n fotovoltaica. Se estima que, seg3n el modelo, estos sistemas pueden aumentar el rendimiento en torno a un 30 %-40 % sobre los sistemas fijos.

La función de los seguidores es mantener los paneles en posición perpendicular con respecto al sol durante la mayor parte del día. En función del desplazamiento del generador fotovoltaico que realizan, podemos distinguir dos tipos de seguidores:

- Seguidores a un eje: aquellos en los que el movimiento del generador se realiza en una sola dirección. Se pueden distinguir:
 1. Seguidores de la altura solar: el panel se encuentra colocado sobre un eje dirección Este-Oeste y el giro lo realiza para seguir la altura del sol.
 2. Seguidores del acimut solar: en este caso, el eje del generador fotovoltaico está orientado en la dirección Norte-Sur, y los paneles giran siguiendo la trayectoria acimutal del Sol.

Generalmente, en los sistemas de seguimiento a un eje, se suele utilizar una combinación de ambas opciones, colocando el eje con una inclinación igual a la latitud del lugar y realizando el seguimiento del acimut del sol.

Los motores de actuación sobre los seguidores pueden ser de muy diversos tipos, desde accionadores hidráulicos, por extensión, a sistemas rotatorios con reductoras.

- Seguidores a dos ejes: son sistemas más sofisticados que los anteriores, ya que realizan el seguimiento tanto de la altura solar como del acimut. Son los que presentan mayor eficiencia en cuanto al rendimiento de la producción energética.

La instalación de seguidores solares en un huerto solar también ayuda a optimizar el terreno. El movimiento de los paneles solares hacia el sol hace que se generen sombras mucho menos alargadas así como que los paneles esquiven las sombras generadas por otros paneles y, por tanto, el distanciamiento de los paneles entre sí puede ser menor, aprovechando de esta forma más parte del terreno.

3.2. Montaje e instalación de paneles solares

El continuo desarrollo de los sistemas de energía solar montados en el suelo requiere de sistemas de cimentación económicos que puedan soportar las cargas previstas de forma segura, y suelen ser de dos tipos [14]:

1. Sistemas de montaje bajo que se colocan lo más cerca posible del suelo.
2. Sistemas elevados que proporcionan suficiente espacio entre la base del marco del panel y la superficie del suelo para permitir el uso del terreno por debajo del sistema, que suele usarse para pastoreo de ganado y actividades agrícolas ligeras.

Un error común entre los diseñadores de cimientos para sistemas solares de montaje en suelo es que la cimentación debe diseñarse para soportar una carga combinada de compresión y flexión que produce una fuerza lateral en la cimentación [14].

De hecho, la carga crítica del diseño para la mayoría de los sistemas es producida por el viento, que tiende a producir fuerzas de elevación en el conjunto de paneles y se

acentúa cuando los paneles están elevados y colocados muy cerca [14]. La mayoría de los sistemas se construyen con materiales relativamente ligeros, por lo que la compresión axial suele ser poco preocupante.

Las opciones de cimentación para sistemas solares de montaje en suelo puede dividirse en varios grupos basados en gran medida en el método de instalación [14]:

1. **Pilares de hormigón perforados *in situ***
2. **Pilares de hormigón prefabricado**
3. **Zapatas de hormigón *in situ*.**
4. **Pilotes metálicos hincados.**
5. **Pilotes metálicos helicoidales.**

En función de las condiciones específicas del emplazamiento, convendrá más usar un tipo u otro:

■ **Los pilares perforados y vertidos *in situ*:**

Se utilizan habitualmente para soportar diversas estructuras y resistir tanto la compresión axial como las cargas laterales. Son relativamente fáciles de instalar utilizando un equipo especializado equipado con herramientas de perforación de distintos tamaños y tipos para adaptarse a las condiciones locales del terreno [14].

Para las instalaciones solares a pequeña escala suelen ser una alternativa popular, ya que la profundidad de perforación suele ser escasa (normalmente inferior a 3m). Las cimentaciones de pilotes perforados pueden ser rectas, de base ampliada, o pueden construirse con zapatas inyectadas a presión (PIF), que es un método alternativo para crear una base ampliada [14].

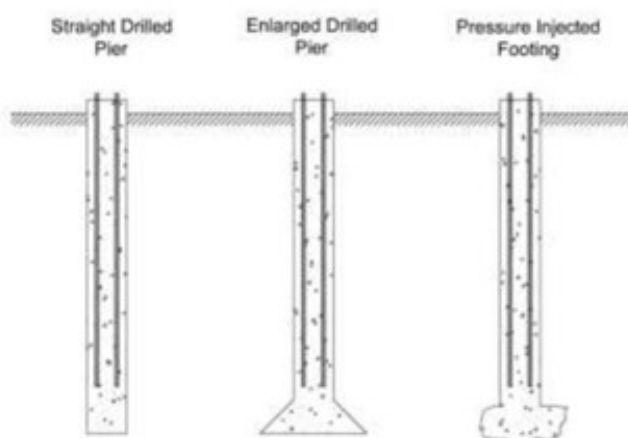


Ilustración 3.4: Alternativas de pilotes perforados *in situ* [14]

En algunos lugares, una base ampliada resulta atractiva, ya que crea una resistencia adicional al levantamiento con respecto a un simple pozo de lados rectos. Sin embargo, su construcción puede resultar a veces difícil y sólo es adecuado para suelos que no se hundirán al construir la base ampliada (generalmente arcillas de rigidez media a alta y otros suelos de granulometría fina) [14].

Los principales problemas de los pilares perforados en esta aplicación son que la construcción puede ser lenta y desordenada en comparación con otras opciones y que la perforación produce grandes cantidades de tierra cortada que debe eliminarse, lo que supone un gasto añadido al proyecto. El acceso a algunos lugares para el equipo de perforación y la entrega del hormigón suele ser sencilla, pero a menudo se necesitan unos días para que el hormigón se endurezca lo suficiente como para comenzar la instalación sobre el terreno. Además, se debe tener en cuenta que este tipo de instalación genera una huella medioambiental mayor que otros métodos y suponen una dificultad añadida para el desmontaje de la instalación al término de la vida útil. [14]

La conexión a la estructura de soporte puede realizarse mediante una placa atornillada en la parte superior del pilar o, en algunos casos, es posible empotrar directamente el soporte en el hormigón [14].

- **Pilares de hormigón prefabricados:**

Como alternativa a la cimentación tradicional con pilares, en la que se rellena de hormigón todo el agujero perforado, pueden utilizarse pilares de hormigón prefabricados. En este caso, se crea un agujero sobredimensionado y se coloca en él un pilar de hormigón prefabricado disponible en una planta de prefabricados. A continuación, se coloca un relleno adecuado alrededor del encofrado o del pilar prefabricado y se compacta [14].

Esta alternativa puede resultar atractiva si las condiciones del terreno existentes son pobres y la capacidad de carga de levantamiento se puede mejorar mediante el control de la colocación del relleno. Se necesitan especificaciones para controlar el tipo y la colocación del relleno y para evaluar el uso de material de relleno. En el caso de que el terreno esté compuesto de materiales muy húmedos, puede ser posible secar el suelo excavado para permitir su uso como relleno [14].

- **Zapatas de hormigón *in situ*:**

Son una variación de los pilares *in situ*, pero se construyen como una cimentación superficial típica con un vástago que se extiende hasta la superficie del suelo para soportar la estructura [14].

Una de las ventajas de utilizar una zapata *in situ* es que la mayoría de los contratistas generales pueden realizar el trabajo y no se necesita ningún equipo especial. El comportamiento de levantamiento se controla en gran medida por la calidad del relleno colocado sobre la zapata. En la mayoría de casos no hay exceso de suelo que eliminar a menos que el suelo excavado se considere como inadecuado como relleno y sea necesario importar otro suelo a la obra [14].

■ **Pilotes hincados:**

Los pilotes hincados son una alternativa de cimentación atractiva para los sistemas de paneles solares de montaje en suelo, ya que los materiales son fáciles de conseguir y los contratistas están familiarizados con la tecnología [14].

El suelo apenas sufre alteraciones, por lo que la limpieza es mínima. Otra ventaja de utilizar pilotes hincados instalados con un martillo de caída o un martillo de pilotes convencional es que la instalación puede supervisarse en cada ubicación y las longitudes de los pilotes pueden ajustarse para adaptarse a las condiciones del suelo en cada ubicación según sea necesario para proporcionar la capacidad de diseño. Además, esta opción es óptima para agilizar el futuro desmontaje de la planta [14].

En caso de que el terreno sea duro y se rechace la posibilidad de hinca directa, para utilizar esta opción sería necesario hacer un pre-drilling con el cual se crea un agujero en el que después se hincará el poste de acero.

La ilustración 3.5 muestra la instalación de pilotes hincados para un proyecto solar en curso.



Ilustración 3.5: Instalación de pilotes hincados usando un martillo de caída (*izquierda*) y un martillo vibratorio (*derecha*) [14]

■ **Pilotes helicoidales:**

Uno de los tipos de cimentación más atractivos y de mayor crecimiento para los paneles solares de montaje en suelo son los pilotes helicoidales de acero [14].

Un pilote helicoidal es un elemento de cimentación fabricado que suele consistir en un eje de tubo de acero con una o más placas helicoidales soldadas al extremo inferior del eje, como muestra la ilustración 3.6 Algunas de las ventajas de utilizar pilotes helicoidales es que están disponibles en una amplia gama de tamaños y longitudes, el tamaño y el número de placas helicoidales se pueden ajustar para adaptarse a casi cualquier condición del terreno, se pueden instalar en unos pocos

minutos, no producen recortes de tierra y poca alteración de la superficie del suelo y hay poca o ninguna limpieza [14].

La instalación se lleva a cabo con equipos de construcción convencionales, minicargadoras, miniexcavadoras, retroexcavadoras... equipados con un cabezal de torsión hidráulico. La hélice produce una gran resistencia al levantamiento en la mayoría de los suelos [14].

Cabe señalar que los pilotes helicoidales pueden ser difíciles de instalar en suelos que contienen grandes cantidades de grava o guijarros [14].



Ilustración 3.6: Geometría típica de un pilote helicoidal [15]

3.3. Preparación del terreno

El primer paso en la preparación del terreno es asegurar el acceso para los equipos de construcción y limpieza. La complejidad de las soluciones para conseguir esto depende de la localización, el terreno y las condiciones climáticas típicas del lugar [16]. Algunas soluciones comunes son:

- Limpieza de árboles, arbustos y otras obstrucciones en el paso de acceso.
- Nivelación y relleno para crear caminos de grava temporales y/o permanentes.
- Instalación de puentes temporales o alcantarillas permanentes.
- Instalación de pavimentos de acceso para crear caminos temporales donde sea necesario.

La instalación de los paneles solares requiere una superficie que esté limpia de obstrucciones. Limpiar el lugar de árboles, arbustos y demás vegetación permite a los equipos de construcción instalar paneles de forma segura y eficiente [16]. La amplitud de la limpieza dependerá de las características del sitio, pero suele incluir:

- Cortar y astillar.
- Triturar tocones.
- Transportar y desechar los escombros.
- Apilar y quemar.
- Segar y remover arbustos.
- Manejar la vegetación.

Cuando sea posible, utilizar equipo mecanizado es generalmente la opción más eficiente de limpieza. De todas formas, en algunas áreas, la limpieza a mano puede ser necesaria. Después de crear los caminos de acceso y llevar a cabo la limpieza, se procede a hacer el movimiento de tierra, la red de drenaje y la instalación de la cimentación [16].

3.3.1. Movimiento de tierra

El movimiento de tierra es un proceso necesario en la construcción de una instalación solar porque ayuda a nivelar el terreno y a preparar el sitio para la colocación de los paneles solares y otros componentes. Esto asegura que los paneles solares estén correctamente orientados y expuestos a la luz solar, lo que maximiza la producción de energía solar de la instalación [17].

El movimiento consistirá en la retirada de material en aquellas zonas donde sea necesario (desmontar) para desplazarlo y ser usado en aquellas zonas donde se necesite el relleno para nivelar el terreno (terraplén). En el caso de que el material del desmonte sea superior al usado para terraplenar, el material de relleno restante deberá ser transportado a una zona de vertido autorizada. Del mismo modo, en el caso de que el volumen necesario para el terraplenado sea superior al obtenido de desmontar, se deberá aportar el material necesario de un terreno autorizado [17].

3.3.2. Red de drenaje

La red de drenaje de una planta solar se refiere al sistema de tuberías y canales diseñados para recolectar y desviar el agua de lluvia y otros líquidos de la superficie de la planta solar. Esta red de drenaje es importante para prevenir la acumulación de agua, lo que podría causar daños en los paneles solares, las estructuras y otros equipos, así como evitar la erosión del suelo y la contaminación del agua [8].

El diseño de la red de drenaje debe tomar en cuenta factores como la topografía del terreno, la cantidad de precipitación esperada y la capacidad de absorción del suelo. Los elementos comunes de una red de drenaje para una planta solar incluyen canales de drenaje, tuberías, rejillas de drenaje, y sistemas de filtración y sedimentación [8].

La red de drenaje normalmente consta de tres partes principales [8]:

- **Entradas:** Las entradas están ubicadas en los puntos más bajos de la planta solar y se utilizan para recolectar agua. Las entradas pueden estar hechas de una variedad de materiales, incluidos hormigón, plástico y metal.

- **Tuberías o zanjas:** Se utilizan para transportar el agua desde la entrada hasta la salida. Las tuberías suelen estar hechas de PVC o HDPE.
- **Salida:** La salida es el punto donde se descarga el agua de la planta solar. La salida se puede conectar a una alcantarilla pluvial, una zanja o un estanque.

Capítulo 4

Definición de los distintos escenarios que afectan al coste de la obra civil

El presupuesto de obra civil de una planta solar es un componente esencial en la planificación y ejecución de proyectos de construcción. Forma parte de una de las partidas presupuestarias más relevantes de una instalación solar. Las principales subpartidas que la conforman y que influyen en el costo de la instalación son aquellos relativos a la preparación del terreno, movimiento de tierras, creación de caminos y ejecución de la cimentación para la estructura solar.

A continuación, se estudiarán los principales factores que influyen en la variación de los costos asociados a cada subpartida, lo cual sentará las bases para la estimación de un CAPEX preliminar civil y tener la posibilidad así de evaluar la viabilidad de la obra.

4.1. Movimiento de tierras

El movimiento de tierras es una partida importante en el presupuesto de la obra civil para la construcción de una planta solar. Hay varios factores que pueden tener influencia en el costo total asociado al movimiento de tierras. Los principales son:

1. **Orografía del terreno:** La orografía del terreno donde se construirá la planta solar es un factor que afecta de manera importante en el costo del movimiento de tierras. Si el terreno es accidentado o presenta pendientes pronunciadas, se deberán realizar excavaciones y rellenos adicionales de forma que el área se nivele y se cree una base apropiada para la instalación de los paneles solares.

La cantidad de trabajo a realizar en materia de movimiento de tierras dependerá también de la pendiente que tolere la estructura de soporte a utilizar.

La topografía, a su vez, puede tener una influencia importante en los efectos de sombra entre los diferentes paneles.

2. **Volumen de la tierra a mover:** El volumen total de tierra que se debe mover

durante la construcción de la planta solar es otro factor determinante en los costos. Cuanto mayor sea la cantidad de tierra a excavar o rellenar, más recursos y maquinaria serán necesarios, además de que el transporte de grandes volúmenes de tierra puede requerir el uso de camiones adicionales u otros equipos especializados, incrementando aún más el costo.

3. **Tipo de suelo:** El tipo de suelo presente en el sitio de construcción puede influir en los costos del movimiento de tierras. Algunos suelos pueden ser más fáciles de excavar y manejar, mientras que otros pueden ser más difíciles de trabajar. Por ejemplo, terrenos rocosos o con una alta presencia de arcilla pueden requerir maquinaria y técnicas de excavación más especializadas y/o costosas [18].
4. **Disposición de residuos de tierra:** Los posibles residuos de tierra generados durante el movimiento de tierras deben ser gestionados adecuadamente. Si los residuos deben ser transportados fuera del sitio de construcción para su disposición, eso implicará costos adicionales de transporte y posiblemente tratamiento de los residuos.

4.2. Creación de caminos

El costo de la creación de caminos en la construcción de una planta solar puede verse afectado por diversos factores. A continuación, se mencionan los principales factores que pueden influir en el costo asociado a la construcción de caminos:

1. **Extensión y distribución de los paneles solares:** La cantidad de paneles solares y su distribución a lo largo del terreno de la planta solar pueden influir en la longitud y el diseño de los caminos requeridos. Cuanto mayor sea la extensión de las cadenas de paneles solares y más dispersos estén, mayor será la cantidad de caminos necesarios para el acceso y el mantenimiento de los paneles incrementando los costos de construcción y pavimentación de los caminos.
2. **Características del terreno:** El terreno en el que se construirán los caminos puede afectar significativamente los costos. Si el terreno es accidentado, presenta pendientes pronunciadas o está compuesto por suelos difíciles de trabajar, se requerirán trabajos de nivelación, excavación y preparación extras. Así mismo, la probabilidad de lluvias y la presencia de cobertura de tierra vegetal en los primeros centímetros de terreno (terrenos agrícolas) pueden incrementar la necesidad de viales de acceso a los diferentes puntos de la planta. En periodos húmedos, la presencia de agua y tierra vegetal provoca que el terreno natural tenga una capacidad portante muy baja y sea intransitable.
3. **Capacidad de carga y diseño de los caminos:** La capacidad de carga de los caminos es un factor crítico que considerar para garantizar el acceso seguro y eficiente a la planta solar. Si se requieren caminos con mayor resistencia para soportar cargas pesadas, como el tráfico de vehículos y maquinaria pesada, sobre todo durante la construcción, será necesario utilizar materiales de construcción y técnicas de pavimentación adaptadas a esas circunstancias.

4. **Distancia al acceso vial principal:** La distancia entre el lugar donde se instalará la planta solar y la vía de acceso principal también puede influir en los costos de construcción de los caminos. Si el terreno donde se construirá la planta se encuentra lejos de una vía principal, será necesario extender los caminos para conectar con dicha vía.
5. **Requerimientos ambientales y permisos:** Dependiendo de la ubicación del proyecto y las regulaciones locales, pueden existir requerimientos ambientales y permisos adicionales para la construcción de caminos. Esto puede implicar la implementación de medidas de mitigación ambiental, como la protección de áreas sensibles o la implementación de drenajes adecuados.

4.3. Cimentación

Por su parte, el costo de la obra asociado a la cimentación podrá verse afectado por factores relacionados con el tipo de terreno y la metodología de cimentación utilizada, así como por el tipo de instalación. En nuestro caso, escogeremos únicamente los tres tipos de cimentación más comunes: pilotes directamente hincados o pre-perforados, pilotes helicoidales y cimentaciones.

Los factores más determinantes que afectan al coste en este sentido son:

1. **Capacidad portante del terreno:** El tipo de terreno donde se llevará a cabo la implantación de la planta solar es un factor clave en la determinación del costo de la cimentación. Si el terreno es particularmente duro, como suelos rocosos, arcillosos compactos o granulares con bolos de gran tamaño, será necesario emplear técnicas de cimentación más avanzadas y costosas. Pese a que los terrenos con alta capacidad portante requieren cimentaciones más reducidas (menor longitud de pilote), requieren de maquinaria especializada y métodos de instalación más complejos, lo que se traduce en un incremento en los costos de cimentación.

En nuestro caso, como se ha comentado, se valorarán sólo los tres tipos de cimentaciones más comunes para la instalación de paneles solares con pilotes metálicos o cimentaciones superficiales de hormigón.

Para el presente estudio se va a descartar la opción de micropilotes ya que se trata de una opción residual. Actualmente, su implantación se descarta por su alto impacto medioambiental por su dificultad de desmantelamiento.

2. **Agresividad del terreno:** la agresividad del terreno, por ejemplo, la presencia de yesos, nivel freático u otro tipo de sales es un factor que también puede determinar el tipo de cimentación, y por tanto, el coste de la subpartida correspondiente. En escenarios donde el potencial agresivo es significativamente alto, por ejemplo, por la presencia de una alta concentración de sales, se opta por cimentaciones superficiales de hormigón directamente apoyadas en el suelo.

Capítulo 5

Definición de las unidades de obra

5.1. Introducción a las unidades de obra

La construcción de un parque solar es un proceso complejo que requiere la integración de diversas unidades de obra para garantizar el correcto funcionamiento y rendimiento del proyecto durante la fase de construcción. En el presente trabajo, de todas las unidades de obra que determinan el presupuesto de una planta solar, el autor se va a centrar en aquellas que forman parte de la partida de ingeniería civil. Estas unidades abarcan desde la preparación del terreno hasta la instalación de las estructuras necesarias para instalar los paneles, las baterías y los inversores y que están en contacto directo con el terreno.

Con el propósito de obtener información necesaria para caracterizar el terreno donde se llevará a cabo la construcción del parque solar, es necesario realizar un estudio topográfico y geológico. Estos estudios permitirán adquirir datos relevantes sobre la elevación del terreno, las peculiaridades del entorno y la composición del suelo. La intención de este trabajo es preparar una herramienta que, sin necesidad de desplazarse físicamente al sitio en cuestión, permita realizar una estimación preliminar de los costes civiles más importantes en base a las características del sitio (geología y topografía), tipo de estructura, extensión de la planta, etc. Esta herramienta podría ser útil en etapas de desarrollo temprano de plantas solares.

Con este fin, se emplearán mapas elaborados mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y otro tipo de información pública. Estas herramientas brindan una capacidad integral para acceder, visualizar, analizar e integrar datos geoespaciales de manera eficiente y efectiva. En particular, para este proyecto se utilizarán el mapa topográfico elaborado por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) [19] y el mapa geológico elaborado por el Instituto Geológico y Minero de España (IGME) [20]. Estos recursos cartográficos nos proveerán de toda la información necesaria para llevar a cabo nuestro estudio de manera efectiva.

Una vez obtenida toda la información necesaria, se hará uso del generador de precios de CYPE [21] para evaluar el costo de las distintas unidades de obra en función de las características obtenidas.

A continuación, se presentan las distintas unidades de obra que se tendrán en cuenta para el cálculo del coste total de la obra civil, especificando cómo el coste de cada una

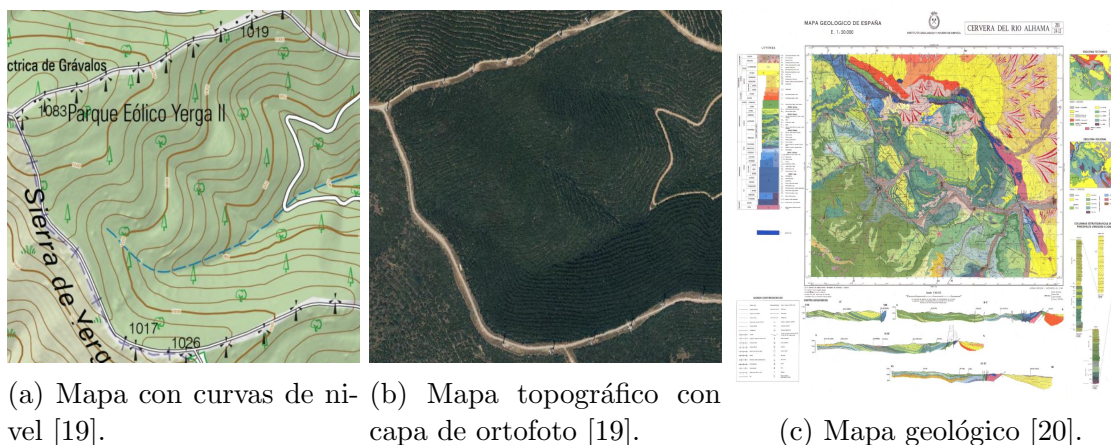


Ilustración 5.1: Ejemplos de terrenos en los mapas utilizados

de ellas será estimado en la herramienta a desarrollar.

5.2. Unidades de obra

5.2.1. Preparación del terreno:

- **Limpieza y desbroce del terreno:** En función de la cantidad de vegetación, rocas y diferentes obstáculos que puedan encontrarse en el terreno, se le asignará un coste mayor o menor a esa partida. En el mapa topográfico [19], utilizando las capas "Imágenes de satélite Sentinel y ortofotos PNOA" y "Curvas de nivel", podemos tener una percepción de todos estos obstáculos que encontraremos, así como datos de la altura de la vegetación presente. Para elaborar la aproximación del coste, será necesario incluir una serie de datos de entrada en la herramienta para que pueda estimarlo con la mayor exactitud posible:

 - **Topografía:** Es importante categorizar la superficie de terreno que cuenta con un desnivel nulo, mínimo, medio, alto o muy alto. Se puede hacer uso de la herramienta de medición presente en el mapa topográfico [19] para calcular el área total ocupada por cada tipo de desnivel. Estos datos deberán ser introducidos en la herramienta.
 - **Medios:** Se decide que se usarán medios mecánicos para esta labor, por otorgar en la mayoría de los casos una mayor efectividad y eficiencia a un menor coste que al utilizar medios manuales.
 - **Presencia de arbustos:** En caso de que haya una cantidad considerable de arbustos, se tendrá en cuenta y se incrementará el precio acorde a lo que marca el generador de precios de CYPE [21]. Se deberá indicar como dato de entrada el área ocupada por los arbustos a eliminar, pudiendo valerse de nuevo de la herramienta de medición presente en el mapa [19] para obtener el área de terreno que contiene arbustos.

- **Presencia de árboles:** En caso de que el terreno contenga árboles, se deberá obtener la cantidad aproximada de árboles que alberga para estimar el coste. La herramienta tendrá una sección en la que se pregunte al usuario si el terreno contiene una notable masa arbórea o no. En caso de que no haya una masificación de árboles, se seleccionará un área lo suficientemente grande del terreno como para ser representativa del total y se contará la cantidad de árboles que contiene, para después poder estimar el total que habrá en el terreno completo. En caso de masas arbóreas, donde puede ser complicado contar la cantidad de árboles desde el mapa, bastará con introducir en la herramienta la superficie ocupada por esta masa forestal. Utilizando una densidad de 1.600 árboles por hectárea, por ser esta una densidad habitual en sistemas forestales [22], la herramienta calculará la cantidad total de árboles.

Para obtener estas áreas que deben introducirse en la herramienta, se podrá hacer uso de nuevo de la herramienta de medición presente en el mapa topográfico [19].

Para simplificar la herramienta y el trabajo a dedicar en cada estudio, se decide que los árboles que estén presentes en el terreno sean de tamaño promedio (altura entre 5 y 10 m, diámetro de 30 a 60 cm y copa con frondosidad media).

- **Movimiento de tierras:** En caso de que el terreno presente un desnivel importante, deberá tenerse en cuenta el coste del desmonte de tierra sobrante y del terraplenado correspondiente. Si se decide que el parque solar en cuestión haga uso de seguidores solares, la pendiente a alcanzar será de 15 % [23]. Si por el contrario se decide el uso de una estructura fija, se permitirá un 25 % de pendiente.

De esta forma, se deberá introducir en la herramienta la pendiente máxima que se considera que tiene el terreno. Utilizando el mapa topográfico [19] con la capa denominada "Curvas de nivel", podemos medir la distancia desde una curva de nivel a otra y su diferencia de altura para obtener la pendiente aproximada. En caso de que haya secciones del terreno que superen la pendiente a alcanzar, se considerará que debe efectuarse un desmonte de tierra. Si la pendiente medida es inferior a la pendiente a alcanzar se considerará innecesario efectuar el desmonte.

Para calcular el volumen de tierra que utilizar para terraplenado y el volumen de tierra a desmontar, la herramienta cuenta con los datos de decenas de plantas solares con los que se realiza un método de regresión lineal con el que se estimarán estos volúmenes en función del área de terreno total para el cálculo del desmonte, y en función de las áreas de terreno con desnivel medio, alto o muy alto para el cálculo del volumen de tierra para terraplenado (datos de entrada que ya debían haber sido introducidos, como se ha explicado anteriormente).

Esta solución propuesta se trata sin duda de un enfoque muy general en el que se asume que los resultados que se obtendrán en el caso de estudio mantendrán la correlación con los datos introducidos para realizar el método de regresión. Sin embargo, la razón por la que se decide utilizar este método radica en que permite

mantener la facilidad de uso y rapidez de la herramienta. Hacerlo de otra manera que pudiera aportarnos más precisión, requeriría el uso de mapas topográficos más específicos, que la sobrecargarían y complicarían innecesariamente. Así mismo, conviene tener en cuenta que se trata de una herramienta para apoyo en etapa de proyecto temprana, donde se está estudiando la viabilidad y los riesgos asociados al desarrollo de la infraestructura.

En la herramienta que se está elaborando, siempre que se deba realizar un desmonte de tierra, se tomará que la cantidad de tierra extraída es suficiente como para realizar con ella el terraplenado. Habitualmente, en un proyecto de estas características se busca un movimiento de tierras neto, es decir, sin préstamos ni vertidos a vertedero. En caso de que no se precise hacer desmonte, la tierra que se utilice para el terraplenado será importada.

Por simplificar, en los casos en los que haya que importar material para el terraplenado, se define que deberá ser siempre un material tolerable para el proyecto en el que se está trabajando y que el grado de compactación respecto a la densidad seca máxima obtenida en el ensayo Proctor Modificado sea de un 95 % en núcleo de terraplén.

- **Preparación del terreno para cimentación:** La elección de la cimentación a utilizar dependerá de las características del terreno. A continuación, se mencionan las situaciones en las que se podrían utilizar diferentes tipos de cimentaciones:
 1. Pilotes directamente hincados: Los pilotes directamente hincados son una opción común en terrenos con suelos poco firmes. En la herramienta se asignará este tipo de cimentación siempre y cuando el suelo sea cuaternario.
 2. Pilotes helicoidales: Los pilotes helicoidales son especialmente útiles en áreas donde se encuentran capas de suelo más firmes a profundidades relativamente poco profundas. Se utilizará, por tanto, en los terrenos con suelo moderadamente firme. En concreto, en los casos en los que el suelo no sea de tipo cuaternario, pero tampoco sea rocoso.
 3. Pilotes hincados en pozo perforado: Este método se utiliza en terrenos con suelos duros o rocosos. Son adecuados cuando se encuentran capas de suelo resistentes a profundidades superficiales. Por tanto, cuando el suelo no sea cuaternario pero sí rocoso, se utilizará esta opción.
 4. Cimentación superficial de hormigón: Se utilizan en terrenos estables y con buena capacidad de carga superficial. Son una opción adecuada cuando el suelo de soporte tiene suficiente resistencia y no requiere una transferencia profunda de cargas. Así mismo, es una opción recomendada en suelos químicamente agresivos. Por este motivo, se elegirá esta opción cuando el suelo pueda afectar a los pilotes metálicos por ser químicamente agresivo.

Así, en función del tipo de suelo obtenido del mapa geológico [20], se introducirán en la herramienta los datos que especifican si el suelo es cuaternario, rocoso o químicamente agresivo. Con ello, la herramienta asignará un tipo de cimentación o varios a la instalación.

Los dos primeros tipos no requieren de excavación alguna, por lo que el coste de esta subpartida en esos casos es nulo.

El pilote hincado en pozo perforado sí que requiere de una pequeña excavación, normalmente más costosa, en la que se aproximará que cada pozo tiene una profundidad de unos $2,5m$ y unos $0,4m$ de diámetro [24], lo que hace un volumen de $0,31m^3$ por pozo.

Para el caso de la cimentación superficial de hormigón, se estimarán las siguientes medidas, basándose en la investigación realizada sobre las dimensiones promedio de la cimentación en solares:

- Ancho y largo de la cimentación: Se decide elaborar una cimentación que sea de una dimensión suficiente como para proporcionar un espacio adecuado y garantizar una correcta distribución de carga efectiva. En consecuencia, las medidas de cimentación por cada pilote serán de $2x2m$.
- Profundidad de la cimentación: Con respecto a la profundidad de la cimentación, se sugiere una estimación de $0,5$ metros, basándose en los valores promedio que suelen encontrarse en los parques solares. Así mismo, esta primera capa de suelo suele corresponder a tierra vegetal con muy poca capacidad portante [25].

Para saber la cantidad total de pilotes y la cantidad total de hormigón a utilizar, se tomarán las siguientes aproximaciones:

- Se establece una media de $400W$ de potencia por panel solar. Con este dato, en función de la potencia total que busca tener el parque solar, se podrá obtener la cantidad total de paneles que debe contener.
- Si se decide que el parque cuente con seguidores solares, cada uno contará con un total de 4 bastidores, conteniendo cada uno 3 paneles [26]. Es decir, por cada 12 paneles se utilizará un pilote.



Ilustración 5.2: Ejemplo de paneles solares instalados en un seguidor solar [27].

- Si por el contrario se opta por una estructura fija, por cada 8 paneles se utilizará un pilote [28].



Ilustración 5.3: Ejemplo de paneles solares instalados en una estructura fija [29].

Así mismo, deberá contemplarse también en esta partida la cimentación requerida para albergar a los inversores y los acumuladores. Esta cimentación tendrá en cuenta el área ocupada por estos equipos con un sobrecancho de 0,5 m en cada dimensión y una profundidad de 0,5 m.

Para el cálculo de inversores, se asumirá que se utilizan inversores trifásicos de 3.500kW en toda la planta, y que se debe alcanzar con ellos el equivalente al 90 % de la potencia total de la planta. Cada inversor tiene un área aproximada de $8,14m^2$ [21].

En el caso de las baterías, estas serán de litio-ferrofosfato, a una tensión nominal de 25,6 V y una capacidad de descarga de 500 kWh, con un área aproximada de $1m^2$ cada una [21]. Se estiman los kWh producidos por la planta considerando que recibirán una cantidad de 10 horas de sol al día, y las baterías deberían ser capaces de aguantar esa capacidad. Es decir, los acumuladores otorgarían un día de autonomía a la planta.

Con estos datos, se obtienen la cantidad total de pilotes que se instalarán en la planta, la cantidad de tierra a excavar para instalar pilotes hincados en pozo perforado, para instalar cimentación superficial de hormigón y para instalar la cimentación para inversores y baterías.

5.2.2. Cimentaciones y estructuras de soporte:

- **Construcción de las cimentaciones para los paneles solares, baterías e inversores:** Para estimar el coste de la cimentación superficial de hormigón, se considerarán los siguientes parámetros:

- Exposición y resistencia del hormigón: Se asumirá un riesgo de corrosión XD3, lo que implica que el hormigón estará expuesto a ciclos de humedad y secado. Además, se considerará una exposición XF3 al ataque por hielo/deshielo, una exposición XA2 al ataque químico y una exposición XM2 al ataque por erosión, de acuerdo a lo establecido en el artículo 27 del Código Estructural [30]. Además, se considerará una resistencia del hormigón de $30N/mm^2$.
- Tamaño máximo del árido y consistencia: Se empleará un tamaño máximo del árido de 20 mm y se supondrá una consistencia fluida sin aditivo hidrófugo.
- Volumen de hormigón: El volumen de hormigón necesario será equivalente al volumen de tierra excavada previamente, tal como se explicó en secciones anteriores.

En esta subpartida no está incluido el precio de la instalación de los pilotes sobre el hormigón, sino tan sólo el coste de la elaboración, transporte y montaje del hormigón.

- **Construcción de estructuras de soporte para módulos:** Para estimar el coste asociado a la construcción de estructuras de soporte, se utilizarán los valores promedio proporcionados por el generador de precios de CYPE [21]. En este caso, los pilotes se considerarán con una capacidad de carga máxima a compresión de 150kN. Los pilotes utilizados en cimentaciones superficiales de hormigón serán más pequeños que el resto.

5.2.3. Infraestructura de acceso y caminos:

- **Construcción de caminos internos:** Para determinar la longitud total de los viales internos del parque, se llevará a cabo un análisis de regresión lineal. Utilizando la información sobre los metros de caminos presentes en los datos de plantas solares utilizados como referencia, se estimará la longitud total de caminos internos en el caso de estudio en base al área total del terreno. En cuanto al material a utilizar, se empleará una mezcla de zahorra natural caliza y agua. Se buscará conseguir un espesor de la capa de material de aportación de 25 cm, suficiente para proporcionar una base sólida y uniforme para aguantar cargas. La anchura de los caminos se establecerá en 5 m, suficiente para que haya espacio suficiente para que la maquinaria necesaria pueda hacer uso de él. El camino deberá ser compactado con un rodillo vibrante de guiado manual para conseguir un grado de compactación respecto a la densidad seca máxima obtenida en el ensayo Proctor Modificado de 95 %.
- **Construcción de viales de acceso:** Utilizando el mapa topográfico [19], se estimará la distancia desde el terreno al vial de acceso más cercano. Una vez determinada la distancia, se procederá a elaborar el camino de acceso de manera similar a los caminos internos, utilizando la mezcla de zahorra natural caliza y agua.

5.2.4. Infraestructura de seguridad:

- **Instalación de vallas perimetrales:** El perímetro del parque irá rodeado por vallas metálicas construidas con material de acero galvanizado y tendrán las siguientes especificaciones: un paso de malla de 20 mm, un diámetro de 2 mm y una altura de 2 m. Para asegurar su estabilidad, los postes de las vallas serán empotrados en dados de hormigón, los cuales se ubicarán en pozos excavados en el terreno.

A fin de calcular el perímetro de la instalación, se realizará la suposición de que el área especificada del terreno es cuadrada. Cumpliendo con esta premisa la herramienta calculará el perímetro.

5.2.5. Gestión de residuos:

- **Transporte de residuos:** Al realizar las actividades comentadas anteriormente: limpieza y desbroce de terreno, desmonte, terraplenado, talado de árboles... se generan una serie de residuos de carácter vegetal o inerte que deben ser retirados del emplazamiento. Estos residuos serán transportados al sitio correspondiente más cercano, sumándose este gasto al coste de la obra.

Capítulo 6

Aplicación a un caso real

6.1. Introducción

A continuación, se presentará un ejemplo práctico que ilustra detalladamente el funcionamiento de la herramienta. La ubicación elegida es un terreno al sur de la Sierra de Gata, en Cáceres.



Ilustración 6.1: Mapa topográfico con la selección del terreno en el que irá instalada la planta solar [19].

Este terreno tiene una extensión aproximada de $1.210.000 \text{ m}^2$ y se pretende instalar una planta solar que genere una potencia de 50 MW. Con el objetivo de realizar esta inversión, es necesario completar uno a uno los diferentes datos de entrada, a fin de proporcionar a la herramienta la información necesaria para realizar el cálculo.

6.2. Introducción datos de entrada

En primer lugar, accedemos a la pestaña "DATOS", donde encontramos una tabla de color azul en la parte izquierda que debe ser completada con los siguientes datos:

- **Potencia a instalar (MW):** En este caso, se busca construir una planta de 50 MW.
- **¿Instalación de seguidores solares?:** Se responde a esta pregunta utilizando una lista desplegable, seleccionando "Sí" o "No". En este ejemplo, se considera que se llevará a cabo la instalación de seguidores solares para maximizar la producción de electricidad.
- **Área total de terreno (m^2):** Como se mencionó anteriormente, el área aproximada es de $1.210.000 m^2$.
- **¿Se utilizarán baterías en la instalación?:** Nuevamente, se utiliza una lista desplegable para indicar si se utilizarán baterías en la instalación. En este ejemplo, se instalarán baterías.
- **Desnivel:** A continuación, se debe indicar qué porcentaje del área total del terreno corresponde a desnivel nulo, bajo, medio, alto o muy alto. Para determinarlo, se utilizarán las curvas de nivel del mapa como referencia.



Ilustración 6.2: Mapa topográfico con las curvas de nivel del terreno [19].

En el caso que nos concierne, se puede observar que las curvas de nivel están más juntas en la parte norte del terreno y se suavizan a partir de la curva de 500 m, lo que indica una pendiente menor. Se utilizará la curva que marca los 500 m como límite entre el terreno con desnivel medio y el resto.

De esta manera, se pueden identificar dos áreas dentro del terreno con desnivel medio. Aunque no se considera un desnivel alto debido a que la pendiente no es

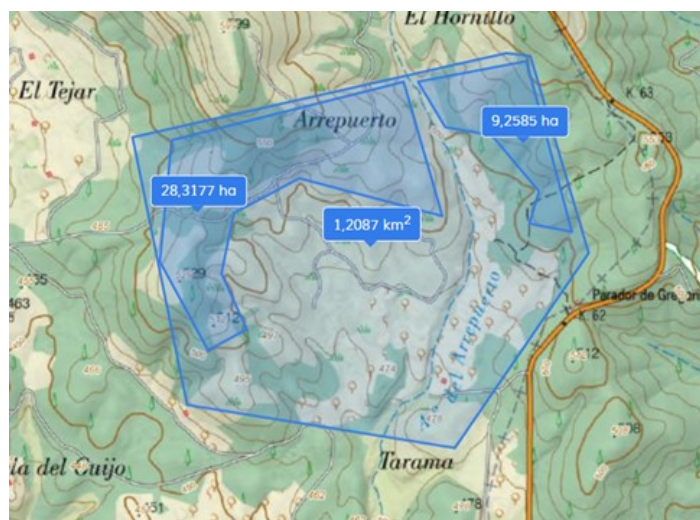


Ilustración 6.3: Mapa topográfico con el área considerada de desnivel medio [19].

excesiva, sí es lo suficientemente pronunciada como para no ser considerada una pendiente baja. La zona adyacente a estas dos áreas tiene una pendiente menor, pero aún significativa, por lo que se clasificará como desnivel bajo.



Ilustración 6.4: Mapa topográfico con el área considerada de desnivel bajo [19].

El resto del terreno se considerará como desnivel nulo. En resumen, se asignan aproximadamente 400.000 m² al desnivel medio, 350.000 m² al desnivel bajo y 460.000 m² al desnivel nulo, aproximando al alza debido a los espacios faltantes en el mapa por completar.

- **Nivel de maleza:** Al observar de cerca el terreno, se puede apreciar que está cubierto por pequeños arbustos en una cantidad moderada. Se supondrá un nivel de maleza medio.
- **Área ocupada por arbustos:** Casi la totalidad del terreno está cubierto por



Ilustración 6.5: Arbustos presentes en el terreno [19].

arbustos, excepto una masa forestal compuesta por árboles. Se medirá la superficie de esta masa forestal, y el área restante del terreno, que no está cubierta por árboles, estará compuesta por arbustos.



Ilustración 6.6: Superficie de la masa forestal del terreno [19].

Como se puede apreciar, el área ocupada por la masa arbórea es de 305.000 m². Por lo tanto, el área compuesta por arbustos corresponde a los restantes 905.000 m².

- **¿El terreno contiene una densa masa arbórea?:** Como hemos mencionado, sí contiene una densa masa arbórea.

- **Área aproximada con árboles:** Según el cálculo realizado en el mapa, la superficie ocupada por árboles es de 305.000 m².
- **Pendiente máxima del terreno:** En la parte norte del terreno, donde se encuentra la zona de desnivel medio, hay un tramo en el que las curvas de nivel están más cercanas, y se produce un desnivel de 50 metros de altura en una distancia de 178,71 metros, lo que resulta en una pendiente de 28 %.



Ilustración 6.7: Medición de la zona de máxima pendiente [19].

- **¿Tipo de suelo cuaternario?:**

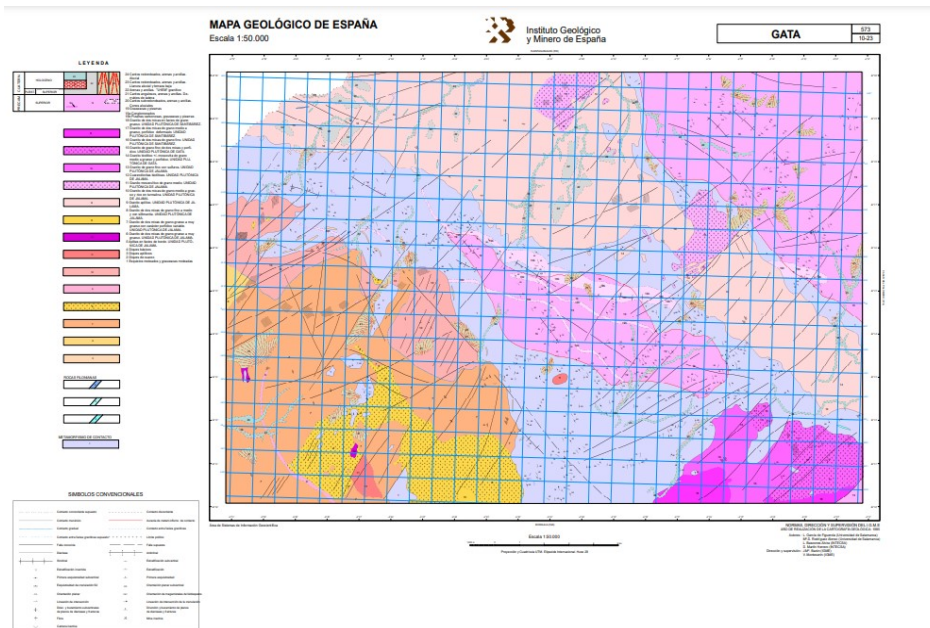


Ilustración 6.8: Mapa geológico del terreno [20].

Utilizando las coordenadas obtenidas del mapa topográfico (latitud 40,20° y longitud -6,72°), consultamos el mapa geológico de la zona seleccionada para determinar el tipo de suelo presente en nuestro terreno de estudio. Aunque no se puede apreciar claramente en la ilustración 6.8, el área donde se ubicará el parque corresponde a la parte superior del mapa, que se representa con un color sepia y pequeñas áreas verdes. Según la leyenda del mapa, este terreno está mayoritariamente compuesto por granito biotítico, moscovita de grano medio a grueso y porfídico. Así mismo, según el mapa, se trata de un suelo no cuaternario.

- **¿Suelo rocoso?:** Sí, el terreno presenta un suelo rocoso.
- **¿Suelo químicamente agresivo?:** Según las características observadas, no se trata de un suelo químicamente agresivo.
- **Distancia del terreno al vial principal de acceso más cercano:** En este caso, un vial atraviesa el terreno, por lo que la distancia al vial de acceso más cercano es nula.

De esta forma, la sección de la herramienta destinada a rellenar los datos de entrada queda de la siguiente forma:

Potencia a instalar (MWs):	50				
¿Instalación de seguidores solares?:	Sí				
Área total de terreno (m ²):	1.210.000				
¿Se utilizarán baterías en la instalación?:	Sí				
Desnivel	Nulo	Bajo	Medio	Alto	Muy alto
Área de terreno (m ²):	460.000	350.000	400.000	-	-
Nivel de maleza:	Medio				
Área ocupada por arbustos (m ²):	905.000				
¿El terreno contiene una densa masa arbórea?:	Sí				
Área aproximada con árboles:	305.000				
Pendiente máxima terreno (%):	28				
¿Tipo de suelo cuaternario?:	No				
¿Suelo rocoso?:	Sí				
¿Suelo químicamente agresivo?:	No				
Distancia del terreno al vial de acceso más cercano (m):	0				

Ilustración 6.9: Datos de entrada en la herramienta.

6.3. Datos de interés

En la misma pestaña de "DATOS", en el lado derecho, hay otra tabla en la que se pueden visualizar las distintas estimaciones que realiza la herramienta sobre posibles datos de interés para el proyecto. En nuestro caso, es de la siguiente forma:

Paneles totales (ud.):	125.000
Perímetro terreno (m):	4.400
Cantidad de inversores a utilizar (ud.):	13
Cantidad de baterías a utilizar (ud.):	1.000
Pendiente a alcanzar (%):	15
Volumen de tierra para terraplenado (m ³):	22.958
Volumen de tierra a desmontar (m ³):	28.340
Longitud de caminos internos (m):	5.119
Tipo de cimentación:	Pilote hincado en pozo perforado
Pilotes a utilizar (ud.):	10.417
Volumen de hormigón a utilizar para cimentación de paneles (m ³):	-

Ilustración 6.10: Datos de interés para el proyecto.

6.4. Resultados

En esta sección se mostrarán los resultados obtenidos por la herramienta en términos económicos.

Se obtendrán los resultados obtenidos por cada unidad de obra, los resultados obtenidos por partida, el coste por kW de cada partida así como un gráfico en el que se compara el gasto porcentual en cada actividad.

- Resultados desglosados:

PRESUPUESTO OBRA CIVIL	PREPARACIÓN DEL TERRENO	Desbroce y limpieza	Desbroce y limpieza del terreno	Eliminación de arbustos	Talado de árboles	Coste desbroce y limpieza	
			1.605.100,00 €	2.371.100,00 €	6.040.952,00 €	10.017.152,00 €	
		Movimiento de tierras	Desmante	Terraplenado		Coste movimiento de tierras	
			64.048,40 €	311.310,48 €		375.358,88 €	
		Preparación tierras para cimentación	Paneles solares	Inversores	Baterías		Coste preparación tierras para cimentación
			253.465,40 €	2.854,49 €	26.975,00 €		283.294,90 €
	CIMENTACIONES Y ESTRUCTURAS DE SOPORTE	Construcción	Cimentación de hormigón para paneles	Estructura de soporte	Cimentación para inversores	Cimentación para baterías	Coste construcción
			0,00 €	1.852.871,79 €	17.457,65 €	164.975,00 €	2.035.304,44 €
	INFRAESTRUCTURA DE ACCESO Y CAMINOS	Construcción de viales	Internos	De acceso		Coste construcción de viales	
			291.509,97 €	0,00 €		291.509,97 €	
	INFRAESTRUCTURA DE SEGURIDAD	Instalación de elementos	Vallas perimetrales			Coste instalación de elementos	
			157.696,00 €			157.696,00 €	
	GESTIÓN DE RESIDUOS	Transporte de residuos	Tierra	Vegetación		Coste transporte de residuos	
			412.825,60 €	4.452.345,00 €		4.865.170,60 €	

Ilustración 6.11: Presupuesto desglosado de las diferentes unidades de obra.

- Resultados totales:

	Coste total preparación del terreno	Coste total cimentaciones y estructuras de soporte	Coste total infraestructura de acceso y caminos	Coste total infraestructura de seguridad	Coste total gestión de residuos	Coste total obra
€	10.675.805,78 €	2.035.304,44 €	291.509,97 €	157.696,00 €	4.865.170,60 €	18.025.486,79 €
€/kW	213,52 €	40,71 €	5,83 €	3,15 €	97,30 €	360,51 €

Ilustración 6.12: Presupuesto destinado a cada partida y al total de la obra.

■ Gráfico comparativo:

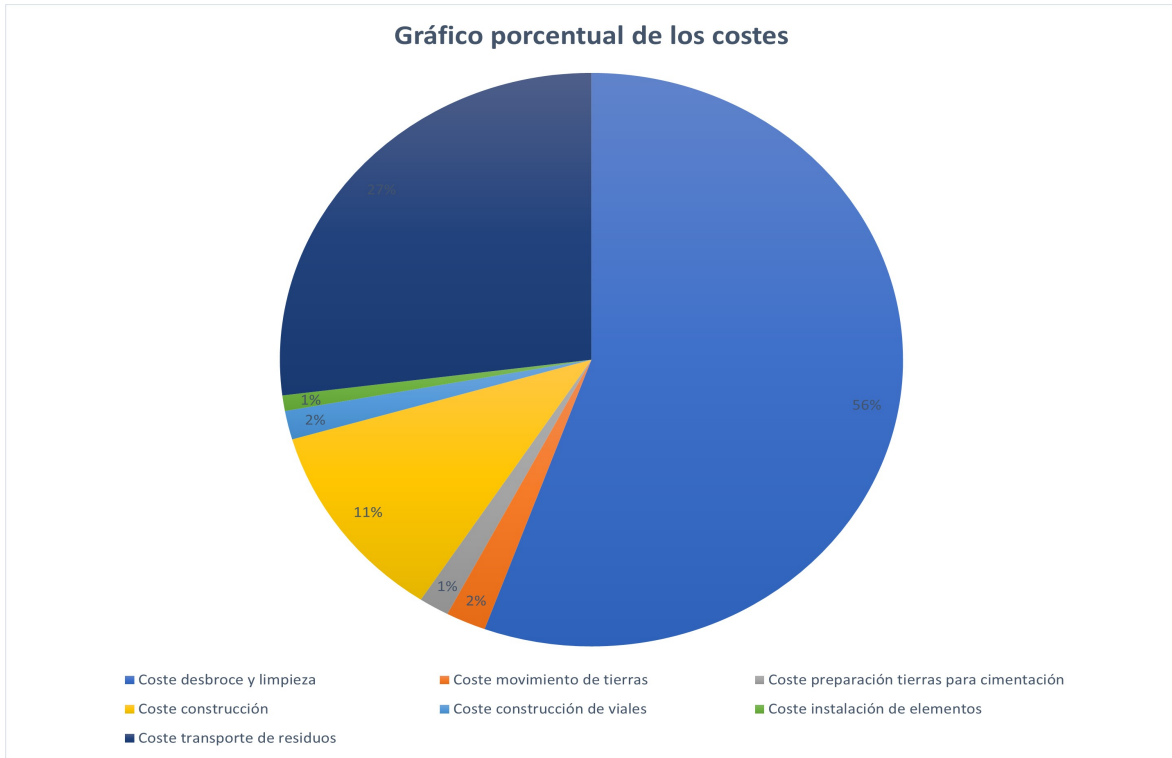


Ilustración 6.13: Gráfico comparativo del porcentaje de dinero invertido a cada partida.

En este caso de estudio, se evidencia que la mayor parte del presupuesto de la obra se destina al desbroce y limpieza del terreno. Esto se debe a que el terreno seleccionado presentaba una extensa área cubierta de arbustos y otra área considerable con árboles que requerían ser removidos.

Además, esta situación conlleva un alto costo en la gestión de residuos, dado que se generan grandes cantidades de desechos vegetales durante el desbroce. De ahí que la segunda partida más costosa sea el transporte de residuos.

El desnivel con el que contaba el terreno era bajo o nulo a excepción de un área catalogada como desnivel medio, lo que hace que el coste de desmonte y terraplenado no sea excesivo

Capítulo 7

Conclusión

En conclusión, el presente trabajo se propuso desarrollar una herramienta precisa y de fácil uso para predecir el presupuesto del coste de la obra civil en plantas solares. A través de una exhaustiva exploración de la situación actual de la energía fotovoltaica a nivel mundial y en España, se proporcionó una base sólida para comprender el contexto en el que se enmarca este estudio.

Se analizaron detalladamente los componentes fundamentales de una planta solar, así como los desafíos inherentes a la ejecución de la obra civil. Este enfoque holístico permitió capturar una visión integral de los factores que inciden en la estimación del presupuesto.

La herramienta desarrollada, supera las limitaciones de los enfoques tradicionales al permitir la estimación precisa del presupuesto sin necesidad de llevar a cabo estudios exhaustivos previos. Su diseño intuitivo y amigable garantiza una experiencia de usuario óptima, al tiempo que ofrece resultados confiables.

Es importante destacar que, si bien la herramienta cumple con sus objetivos en su forma actual, se reconoce el potencial de mejora continua. Se sugiere explorar opciones para aumentar aún más la precisión, considerando la inversión adicional de tiempo y recursos en cada proyecto. Además, se recomienda evaluar la inclusión de partidas adicionales, que podrían tener relevancia para los inversionistas, aun cuando no tengan un impacto económico tan significativo como las principales partidas identificadas en este trabajo.

En resumen, este trabajo ha logrado desarrollar una herramienta innovadora y efectiva para estimar el presupuesto de la obra civil en plantas solares. No obstante, se alienta a futuros investigadores y profesionales a seguir refinando y perfeccionando esta herramienta, con el objetivo de ofrecer estimaciones aún más precisas y completas. El avance logrado hasta ahora representa un paso significativo hacia la optimización de los procesos de planificación y ejecución de proyectos solares, contribuyendo así al crecimiento y desarrollo sostenible de la energía fotovoltaica.

Capítulo 8

Bibliografía

- [1] Wikipedia - energía solar. https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar, 2023. Accessed: 28/02/2023.
- [2] Fundación aquae - energía solar. <https://www.fundacionaquae.org/wiki/energia-solar-ventajas-desventajas/>, 2022. Accessed: 28/02/2023.
- [3] Energes - instalaciones de autoconsumo. <https://www.energes.net/cuantos-tipos-de-instalaciones-de-autoconsumo-hay/#:~:text=Dentro%20de%20cada%20modalidad%20de,o%20instalaciones%20de%20producci%C3%B3n%20pr%C3%B3ximas>, 2020. Accessed: 28/02/2023.
- [4] Informe Anual UNEF - Energía Solar, apuesta segura por la recuperación económica. Technical report, Unión Española Fotovoltaica, 2022.
- [5] Renewable power generation costs in 2017. Technical report, International Renewable Energy Agency, 2018.
- [6] IEA - Renewables report. Technical report, Agencia Internacional de la Energía, 2022.
- [7] IEA - World Energy Outlook. Technical report, Agencia Internacional de la Energía, 2022.
- [8] Tomás Díaz Corcobado y Guadalupe Carmona Rubio. *Instalaciones solares fotovoltaicas*. McGraw Hill, 1 edition, 2010.
- [9] Joshue Smalley. Combiner box. <https://www.solarpowerworldonline.com/2015/06/what-is-a-combiner-box/#:~:text=The%20combiner%20box%20should%20reside,it%20can%20limit%20power%20loss>, 2015. Accessed: 12/05/2023.
- [10] Terrasmart. Instalación caja de combinación. <https://www.terrasmart.com/products/ebos/combiner/>, 2022. Accessed: 12/05/2023.
- [11] Pablo San Juan. Banco de baterías. <https://www.suriaenergy.com/baterias-para-uso-en-proyectos-solares>, 2017. Accessed: 12/05/2023.

- [12] Rachel Simmons. Inversores. <https://brightergy.com/how-solar-inverters-work/>, 2013. Accessed: 12/05/2023.
- [13] SmartGridsInfo. Inversores de alta potencia. <https://www.smartgridsinfo.es/2019/07/08/costa-rica-instala-inversores-alta-potencia-proporcionar-energia-solar-comunidades-abb-inversores-potencia-planta-fotovoltaica-costa-rica>, 2019. Accessed: 22/05/2023.
- [14] Alan J. Lutenegger. Foundation alternatives for ground mount solar panel installations. Technical report, University of Massachusetts, 2016.
- [15] Víctor Yepes Piqueras. Pilotes helicoidales. <https://victoryepes.blogs.upv.es/tag/pilotes-helicoidales/>, 2015. Accessed: 22/05/2023.
- [16] Yak Access. Guide to site preparation for solar energy projects. <https://go.yakaccess.com/complete-guide-to-site-preparation-for-solar-energy-projects#5>. Accessed: 18/05/2023.
- [17] PROYECTO EJECUCIÓN PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA “EL CERRO” DE 48,33 MWp. Technical report, : RALOS DESARROLLOS FOTOVOLTAICOS ESPAÑA, S.L, 2021.
- [18] Sofía Icochea. Tipos de suelos difíciles de preparar. <https://igc.com.pe/tipos-de-suelos-dificiles-preparar/>, 2019. Accessed: 24/05/2023.
- [19] Instituto Geográfico Nacional. Mapa topográfico. <http://www.ign.es/iberpix/visor>, 2023. Accessed: 01/06/2023.
- [20] Instituto Geológico y Minero de España. Mapa geológico. <http://info.igme.es/cartografiadigital/geologica/Magna50.aspx>, 2023. Accessed: 01/06/2023.
- [21] CYPE. Generador de precios. <http://generadorprecios.cype.es>, 2023. Accessed: 01/06/2023.
- [22] Gerding. Densidad de árboles en sistema forestal puro. [http://www.gestionforestal.cl/pt_02/plantaciones/txt/Manejo/MAPIN.htm#:~:text=La%20densidad%20inicial%20de%20plantacin,hectrea%20\(Gerding%20%201991\),1991](http://www.gestionforestal.cl/pt_02/plantaciones/txt/Manejo/MAPIN.htm#:~:text=La%20densidad%20inicial%20de%20plantacin,hectrea%20(Gerding%20%201991),1991), 1991. Accessed: 01/06/2023.
- [23] PVHardware. Información seguidores solares pvh. <https://pvhardware.com/axone-duo/#datasheet>, 2023. Accessed: 01/06/2023.
- [24] Yoshua Díaz Gudín. Tipos de instalación de paneles solares y contexto en españa. <https://pansogal.com/tipos-de-instalacion-de-paneles-solares/#:~:text=Estructura%20hincada&text=Esta%20mquina%20es%20muy%20eficaz,terreno%201%20C5m%20de%20profundidad>, 2022. Accessed: 01/06/2023.

- [25] Cimentación para parques solares considerando coeficientes de reducción de la carga de viento. Technical report, Institución Tecnológica de La Habana, 2022.
- [26] Energía Ercam. Tracker para paneles solares. <https://ercam.es/tracker/#:~:text=El%20seguidor%20solar%20consta%20de,contener%203%20%204%20paneles>, 2020. Accessed: 01/06/2023.
- [27] Daryna. Seguidor solar con 12 paneles conectados. <https://sp.depositphotos.com/stock-photos/solar-tracker.html>, 2023. Accessed: 04/06/2023.
- [28] Energía Ercam. Estructura fija para paneles solares. https://ercam.es/wp-content/uploads/2020/05/EF19.2P.72.VR_.2F_DataSheet.pdf, 2020. Accessed: 01/06/2023.
- [29] Estructura fija con 8 paneles conectados. <https://heavendesigns.in/why-detailed-engineering-is-important-for-ground-mount-solar-projects/>, 2023. Accessed: 04/06/2023.
- [30] Movilidad y Agenda Urbana Ministerio de Transportes. Clases de exposición ambiental. https://www.mitma.gob.es/organos-colegiados/comision-permanente-del-hormigon/cph/clases_de_exposicion_ambiental, 2023. Accessed: 01/06/2023.