Apuntes

Temas Avanzados en Energías Renovables

Fotovoltaica, eólica y solar térmica

Máster Universitario en Ingeniería de la Energía

ETSI Minas y Energía

Hugo Torres Orejudo

Noviembre 2026

Elaborado con IA a partir del material de la asignatura. Material no oficial.

Índice general

1 Plantas fotovoltaicas **2**
1.1 Recurso solar . . . 2
1.2 El módulo . . . 2
1.3 El inversor . . . 3
1.4 Dimensionado del string . . . 3
1.5 Campo, seguidores y diseño de la planta . . . 3

2 Sistema eléctrico de un parque eólico **3**
2.1 Estructura . . . 4
2.2 Modelo para flujo de cargas . . . 4
2.3 Control de tensión y requisitos de red . . . 5

3 Solar térmica de concentración **5**
3.1 Radiación y balance del captador . . . 5
3.2 Tecnologías . . . 5
3.3 Diseño de una central . . . 6
3.4 Aplicaciones no energéticas . . . 6

4 Qué preguntan las tareas y cuestionarios **6**

Resumen

Resumen de los tres bloques de la asignatura: diseño de plantas fotovoltaicas, sistema eléctrico de un parque eólico y solar térmica de concentración. Para cada bloque, los conceptos y ecuaciones que se usan en las tareas y cuestionarios. Los ejemplos numéricos están en el documento de ejercicios resueltos.

1 Plantas fotovoltaicas

1.1 Recurso solar

La irradiancia global sobre un plano tiene componente directa, difusa y reflejada. Para dimensionar se usan series horarias o un año meteorológico típico de bases de datos (PVGIS, Meteonorm, NSRDB, SolarGIS...). Magnitudes: irradiancia G (W/m^2), irradiación H (kWh/m^2 en un periodo) y **horas solares pico** $HSP = H/1\,\text{kW/m}^2$. Las bases de datos difieren entre sí unos puntos porcentuales: es una fuente de incertidumbre en la producción esperada (P50, P90).

1.2 El módulo

Los datos de catálogo se dan en condiciones estándar (STC: 1000 W/m^2, 25 °C de célula, AM1,5): V_{oc}, I_{sc}, V_{mp}, I_{mp}, P_{mp} y los coeficientes de temperatura.

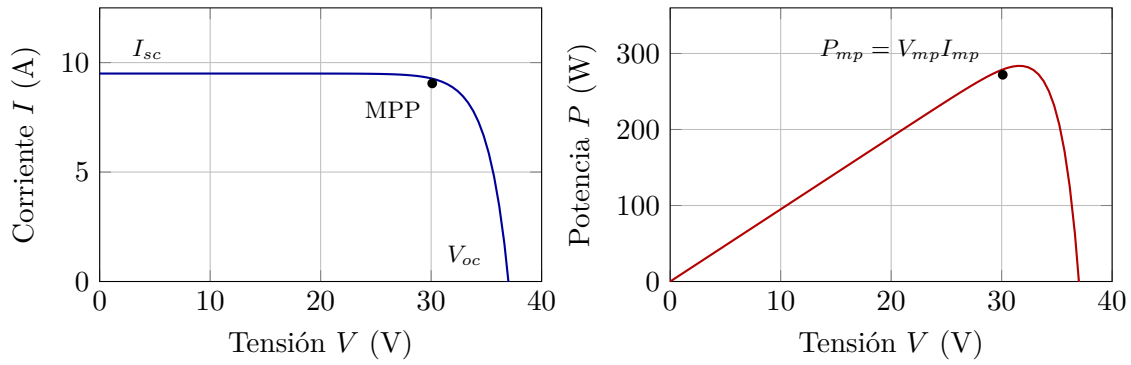


Figura 1. Curvas I–V y P–V de un módulo de 60 células (condiciones estándar, valores ilustrativos). El punto de máxima potencia (MPP) queda justo antes del codo, que es donde trabaja el MPPT del inversor.

Temperatura de célula y corrección

$$T_c = T_a + \frac{NOCT - 20}{800} G \qquad V_{oc}(T) = V_{oc}\,[1 + \beta(T_c - 25)] \qquad I_{sc}(T) = I_{sc}\,[1 + \alpha(T_c - 25)]$$

$$P(G,T) \approx P_{mp}\,\frac{G}{1000}\,[1 + \gamma(T_c - 25)] \qquad (\beta, \gamma < 0,\ \alpha > 0;\ \text{en } \%/^\circ\text{C})$$

La tensión baja con la temperatura (unos $-0{,}25\,\%/^\circ$C a $-0{,}3\,\%/^\circ$C) y la corriente sube muy poco: en verano el módulo pierde un 6–10 % de potencia por temperatura. Tecnologías actuales: silicio monocristalino PERC, TOPCon y heterounión, bifaciales, de 550 a 700 Wp y eficiencias del 21–24 %.

1.3 El inversor

Convierte la continua del generador en alterna sincronizada con la red y busca el punto de máxima potencia (MPPT). Tipos: **central** (cientos de kW a varios MW, en estaciones de potencia junto al transformador de MT) y **de string** (decenas a cientos de kW, distribuidos). Datos clave: tensión máxima de entrada (1500 V en plantas), ventana de MPPT, corriente máxima por entrada, potencia nominal AC y rendimiento europeo o CEC.

1.4 Dimensionado del string

1. **Número máximo de módulos en serie**: con V_{oc} a la temperatura mínima (amanecer frío, sin irradiancia) la tensión del string no puede superar la tensión máxima del inversor ni la del sistema: $N_s \leq V_{dc,max}/V_{oc}(T_{min})$.
2. **Mínimo**: con V_{mp} a la temperatura de célula máxima el string debe quedar dentro de la ventana MPPT: $N_s \geq V_{MPPT,min}/V_{mp}(T_{c,max})$.
3. Comprobar que $N_s\, V_{mp}(T_{min})$ no supera el máximo de la ventana MPPT.
4. **Ramas en paralelo**: por la corriente máxima de entrada (I_{sc} corregida) y por la potencia: ratio DC/AC habitual de 1,1 a 1,35.

1.5 Campo, seguidores y diseño de la planta

- **Estructura fija**: inclinación cercana a la latitud menos unos grados, orientación sur. **Seguidor a un eje** horizontal norte-sur: un 15–25 % más de producción, con *backtracking* para evitar sombras entre filas.
- **Separación entre filas** y **GCR** (ratio de cobertura del terreno): compromiso entre sombras y ocupación.
- Producción anual: $E = P_{dc} \cdot H_{plano} \cdot PR$, con un *performance ratio* típico de 0,80–0,85 (temperatura, suciedad, cableado, inversor, transformador, disponibilidad).
- Planta: módulos, estructuras, cajas de string, inversores, centros de transformación a MT, red de MT interna, subestación elevadora y línea de evacuación.

2 Sistema eléctrico de un parque eólico

2.1 Estructura

Cada aerogenerador (típicamente a 690 V) tiene su transformador elevador a media tensión (20–36 kV); los aerogeneradores se agrupan en circuitos radiales de cable subterráneo hasta la subestación del parque, que eleva a alta tensión y conecta con la red en el punto de conexión.

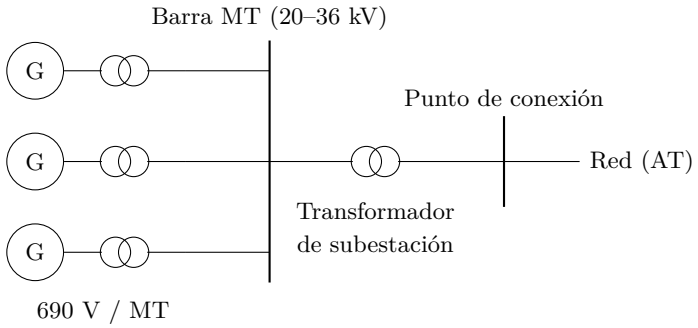


Figura 2. Esquema unifilar de un parque eólico. Cada aerogenerador (G) tiene su transformador elevador. Los circuitos radiales se agrupan en la barra de media tensión y un transformador único eleva a la tensión de la red.

2.2 Modelo para flujo de cargas

Se trabaja en por unidad con una potencia base común y tensiones base iguales a las asignadas de cada nivel:

- **Aerogenerador**: nudo PQ con su potencia activa y la reactiva que fije el control (factor de potencia o consigna de tensión).
- **Transformadores**: impedancia de cortocircuito (y rama de vacío si se quieren las pérdidas en el hierro), con su toma.
- **Cables**: modelo en π; en MT la capacidad del cable genera reactiva apreciable.
- **Red**: nudo de referencia (*slack*) con tensión fijada.

El flujo de cargas (Newton–Raphson en herramientas como InduPSS, MATPOWER o PowerFactory) da tensiones en todos los nudos, pérdidas y la reactiva intercambiada con la red.

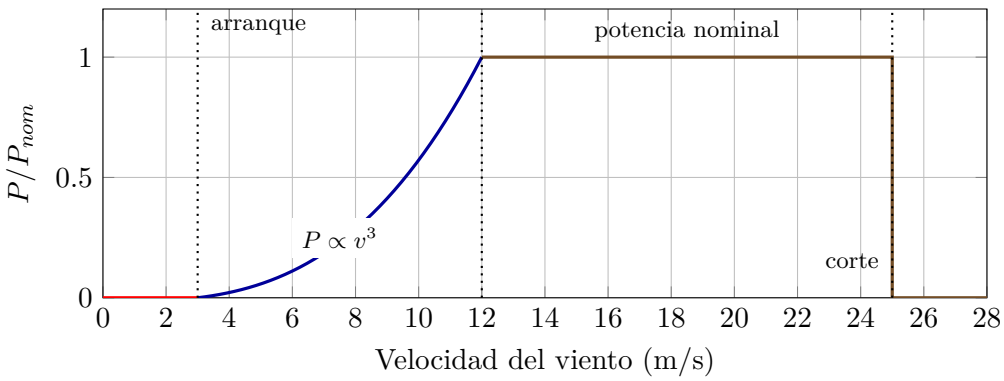


Figura 3. Curva de potencia de un aerogenerador (ilustrativa: arranque a 3 m/s, nominal a 12 m/s y parada a 25 m/s). Por debajo de la nominal la potencia crece con el cubo del viento. Por encima, el control de paso la mantiene constante.

2.3 Control de tensión y requisitos de red

Como en MT y AT la reactancia domina, la tensión en bornes de los aerogeneradores depende sobre todo de la reactiva. Si el parque exporta potencia activa, la tensión en los aerogeneradores sube respecto a la red; absorbiendo reactiva se compensa. Los códigos de red exigen capacidad de reactiva en el punto de conexión (consignas de factor de potencia o de tensión), soportar huecos de tensión y aportar corriente reactiva durante faltas.

> **Idea clave**
>
> Aunque el aerogenerador trabaje con factor de potencia unidad, el parque *absorbe* reactiva de la red: la consumen los transformadores y los cables cargados (menos lo que generan las capacidades de los cables). Esa reactiva y las pérdidas son los dos resultados que se piden siempre.

3 Solar térmica de concentración

3.1 Radiación y balance del captador

Solo la radiación **directa** (DNI) se puede concentrar. En un captador de área de apertura A_c y receptor de área A_r (razón de concentración $C = A_c/A_r$):

$$Q_u = (\tau\alpha)\, G\, A_c - \left[\varepsilon\sigma\,(T_s^4 - T_a^4) + U\,(T_s - T_a)\right] A_r, \qquad \eta = (\tau\alpha) - \frac{\varepsilon\sigma\,(T_s^4 - T_a^4) + U\,(T_s - T_a)}{C\,G}.$$

> **Idea clave**
>
> Las pérdidas dependen del área del receptor y la ganancia del área de apertura: concentrar permite trabajar a alta temperatura con buen rendimiento. Un captador plano ($C = 1$) a 400 °C tendría rendimiento negativo; con $C = 80$ supera el 68 %.

Temperatura de equilibrio radiante (sin convección, conducción ni calor útil): $\alpha\, G\, C = \varepsilon\sigma T^4$, de donde $T = (\alpha G C/\varepsilon\sigma)^{1/4}$. Crece con la concentración y con la selectividad α/ε del recubrimiento.

3.2 Tecnologías

Tecnología	Concentración	Temperatura	Uso
Fresnel lineal	10–200	150–650 °C	Calor industrial, potencia
Cilindroparabólico	50–90	150–550 °C	Potencia (aceite térmico o sales)
Torre (receptor central)	300–1000	500–1000 °C	Potencia con sales, usos avanzados
Disco parabólico	1000–3000	650–800 °C	Potencia distribuida (Stirling)

3.3 Diseño de una central

- **Punto de diseño**: normalmente mediodía solar del equinoccio de primavera en el emplazamiento.
- **Múltiplo solar** $SM = \dot{Q}_{campo}/\dot{Q}_{bloque}$: con $SM > 1$ el campo sobra a mediodía y el exceso carga el almacenamiento.
- **Almacenamiento térmico** (sales fundidas en dos tanques): horas de funcionamiento a plena carga sin sol, $E_{TES} = h \cdot \dot{Q}_{bloque}$.
- Ciclo de potencia (Rankine de vapor, ORC, Brayton), refrigeración (húmeda o seca), tipo de receptor y si hay apoyo fósil.
- **Coste normalizado**: $LCOE = \dfrac{CC \cdot FCR + O\&M}{E_{anual}}$, con CC la inversión y FCR la tasa de cargo fijo anual.

3.4 Aplicaciones no energéticas

El calor solar concentrado también se usa en procesos industriales (calor de proceso), química solar y producción de combustibles (hidrógeno por ciclos termoquímicos), tratamiento de materiales a alta temperatura y desalación.

4 Qué preguntan las tareas y cuestionarios

1. Corregir los parámetros del módulo por temperatura y dimensionar strings y ramas frente al inversor.
2. Estimar la producción anual con el PR y discutir fijo frente a seguidor.
3. Montar el modelo del parque eólico en por unidad, resolver el flujo de cargas y analizar casos (sin reactiva, cables más largos, sin admitancias): tensión, pérdidas y reactiva en la red.
4. Balance térmico del captador, rendimiento frente a temperatura y concentración, temperatura de equilibrio.
5. Diseño básico de una central CSP: múltiplo solar, almacenamiento y LCOE.