

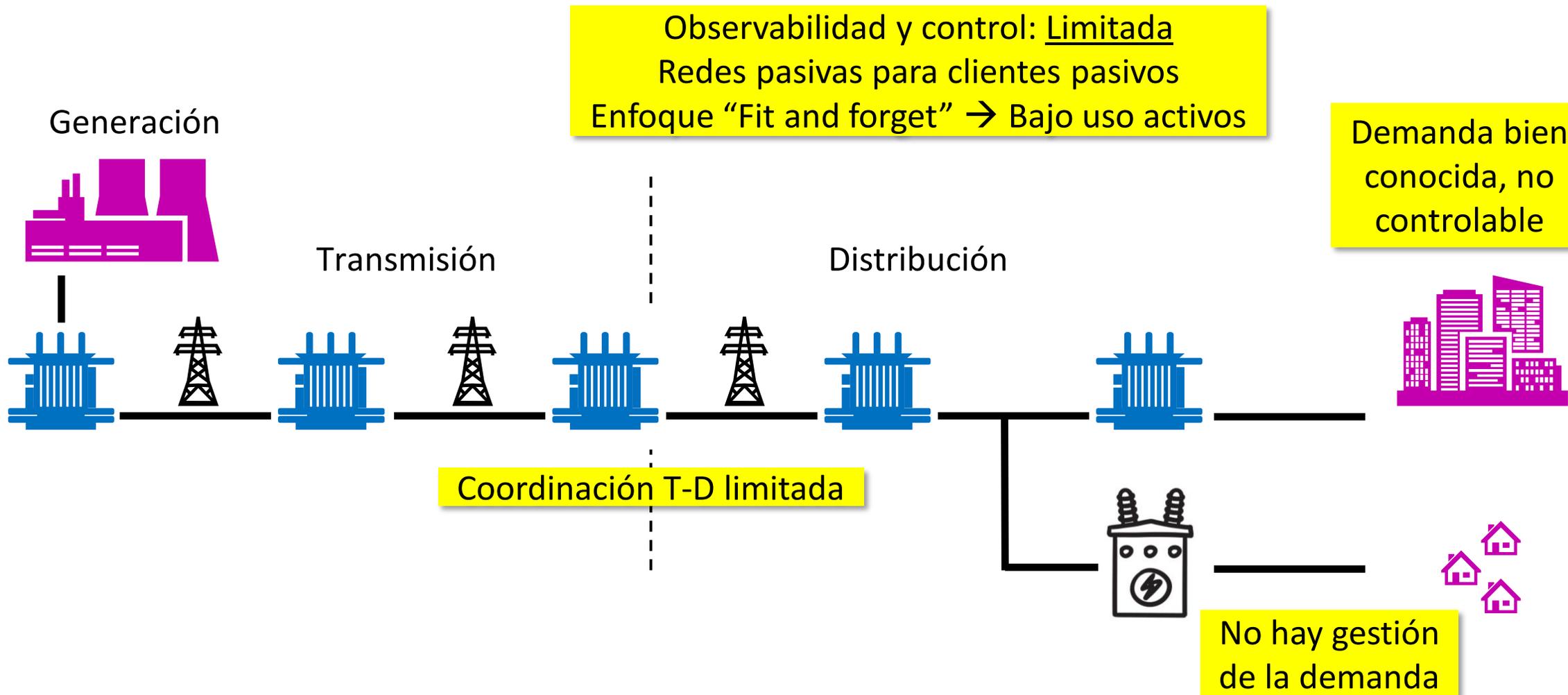


PROYECTO DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA 4.0

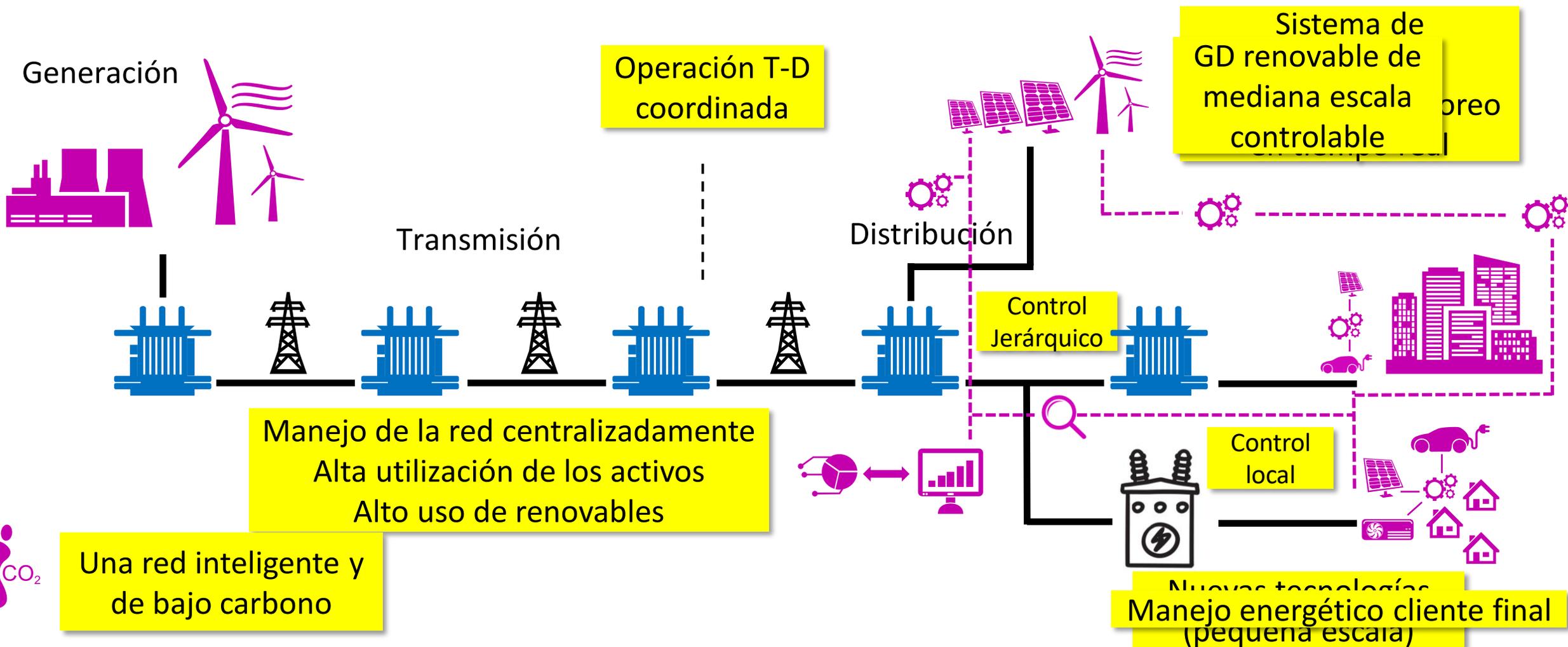
Generación distribuida

Introducción

Redes eléctricas actuales



Redes eléctricas del futuro



Redes eléctricas del futuro



La transición hacia las redes eléctricas del futuro presenta un elemento transformador clave



La transición hacia las redes eléctricas del futuro presenta un elemento transformador clave



La generación distribuida!

¿Qué es la generación distribuida?

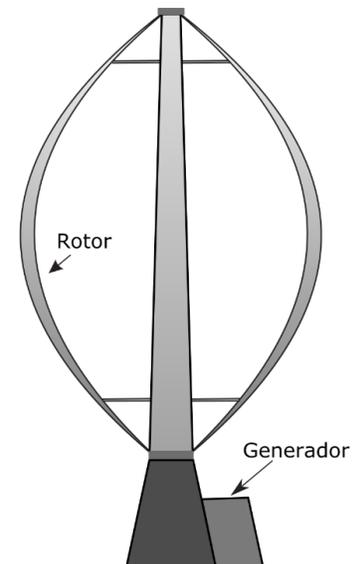
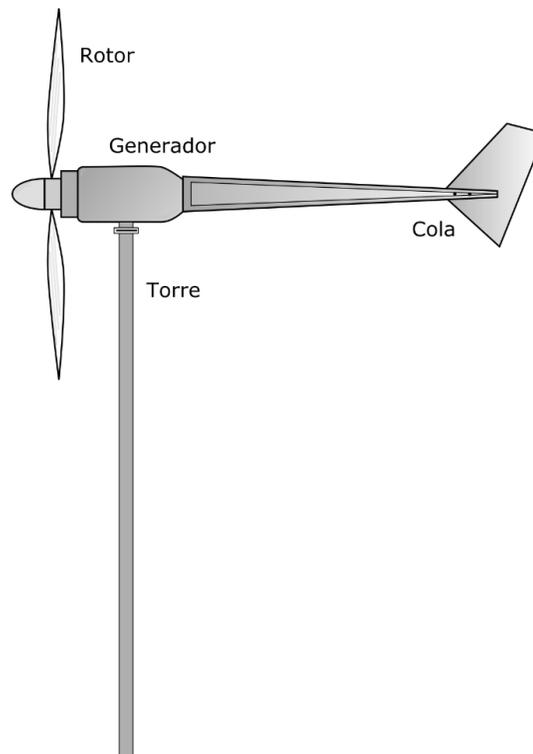
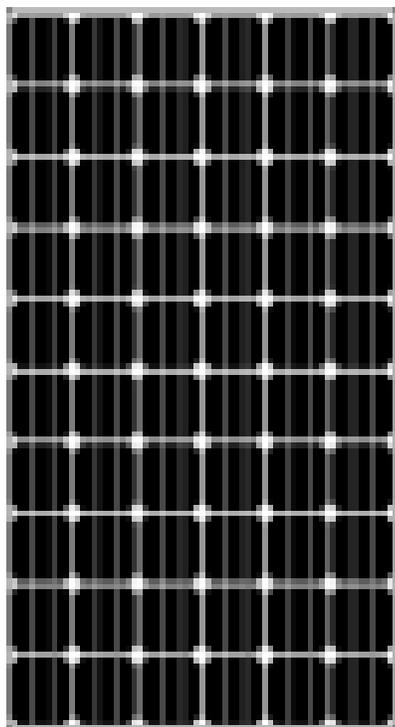
La generación distribuida son sistemas de producción eléctrica de mediana o pequeña escala que se instalan cerca de los centros de carga.

- Lo conforman:
 - Sistemas que se conectan en los hogares, comercios, industrias.
 - Sistemas que se conectan a nivel de media tensión, y ocurre cuando las empresas de distribución instalan sistemas de gran escala.



La generación distribuida es energía solar y eólica

Es común asociar la generación distribuida con plantas solares y eólicas de mediana escala (horizontal o vertical)



Aunque la producción con biomasa y agua a pequeña escala también cuentan como generación distribuida



Aunque la producción con biomasa y agua a pequeña escala también cuentan como generación distribuida



En realidad la literatura nos reporta otras fuentes de energía distribuida

La generación distribuida se suele definir en función del nivel de tensión al cual se conecta



Puede conectarse en los circuitos secundarios, directamente a los puntos de conexión de los clientes.

Usualmente se le define como generación distribuida para autoconsumo.



Puede conectarse en los circuitos de media tensión de las empresas de distribución eléctrica.

Usualmente se le define como generación distribuida de escala empresa (*utility-scale*).

La generación distribuida se suele definir en función del nivel de tensión al cual se conecta y su capacidad



EPRI la define como sistemas de entre 1 kW y 50 MW

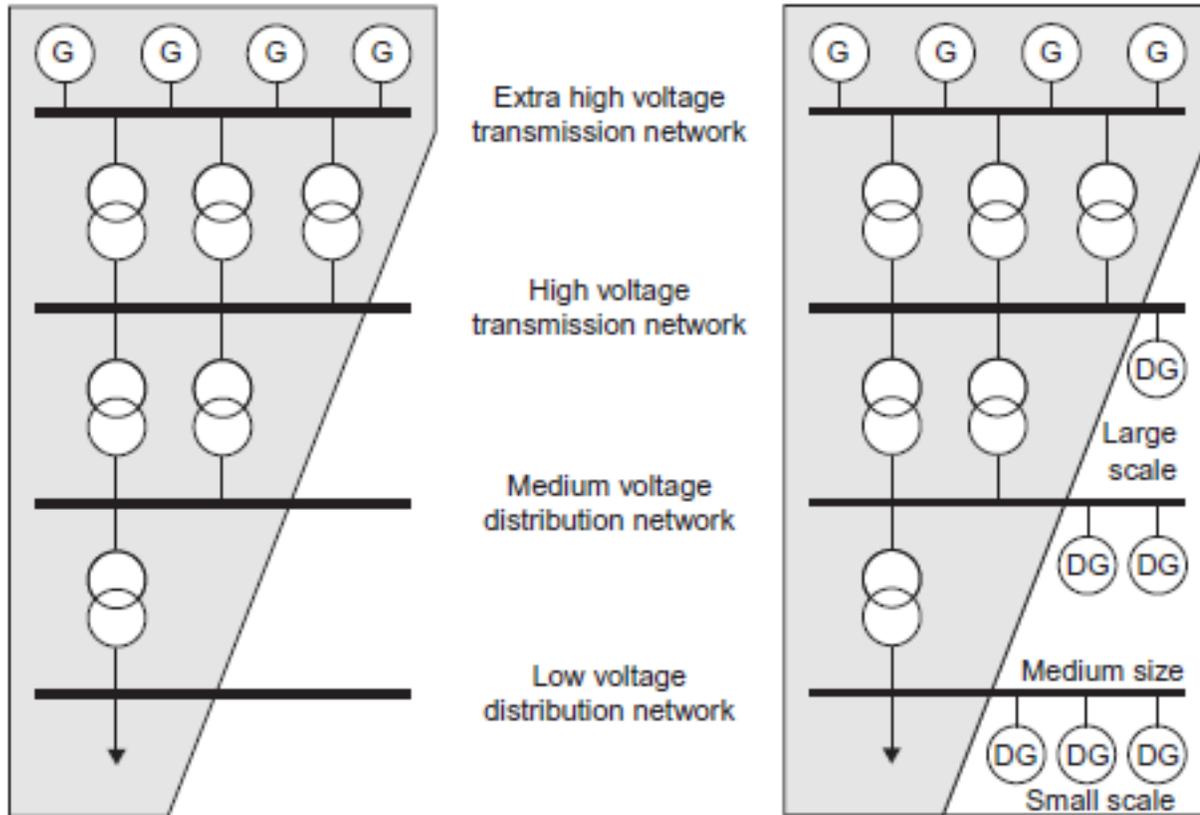


CIGRE la define como sistemas de entre 50 kW y 100 MW

Ha sido bastante consensuado que la GD puede dividirse en cuatro categorías

Micro (de 1 W a 50 kW)	Pequeña (de 50 kW a 5 MW)	Mediana (de 5 MW a 50 MW)	Grande (más de 50 MW)
---------------------------	------------------------------	------------------------------	--------------------------

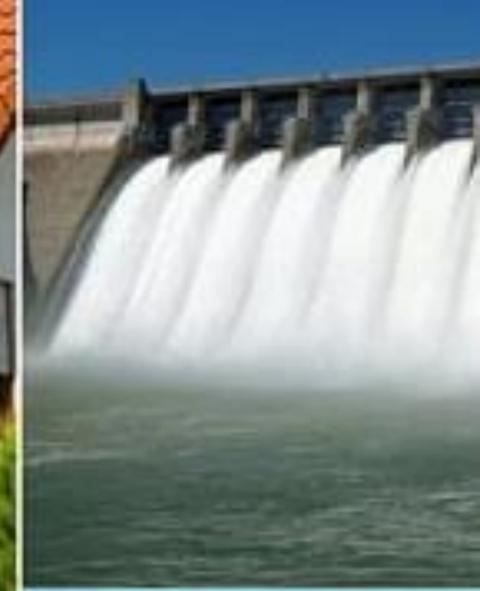
El tamaño de los sistemas se asocia al nivel de tensión donde se conecta



Generation size	Energy market & network level	Relative price of wholesale & retail electricity
	Wholesale energy market	~2-3 p/kWh Wholesale electricity price
>1 GW	Transmission	~4-5 p/kWh HV/MV Industrial consumer supply price
~100 MW	HV	
~10 MW	MV	~5-8 p/kWh
<1 MW	LV Distribution	~8-12 p/kWh Domestic consumer supply price

Menor nivel de tensión → Menor capacidad

La generación distribuida se suele asociar a fuentes de energía renovable





...y con mayor frecuencia a los sistemas solares y eólicos.



Tecnología solar fotovoltaica



El silicio es el material más utilizado para construir las celdas solares

- El silicio se encuentra en el grupo de los carbonoides (Grupo IV A o 14). Es un metaloide y es abundante en la tierra.
- Al material utilizado varia ampliamente y depende de la generación del panel solar.
 - Primera: silicio principalmente (usados en residencias)
 - Segunda: cadmio-telurio, cobre-indio-galio-di-selenio, capa fina de silicio amorfo (usado en plantas solares)
 - Tercera: varios materiales incluyendo nanotubos, hilos de silicio, perovskita (en mucho desarrollo)

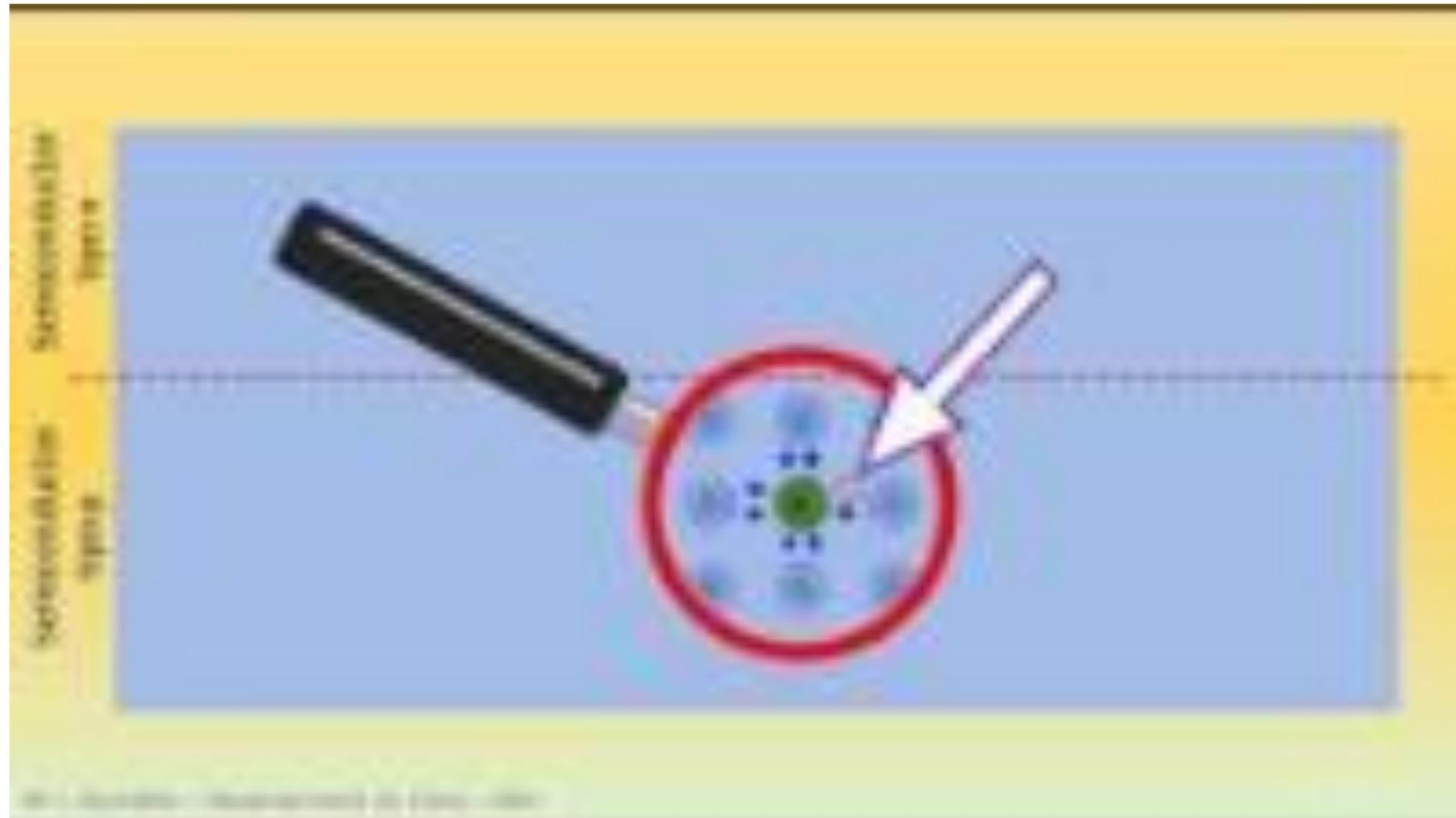
TABLA PERIÓDICA DE LOS ELEMENTOS

1 1.0079 H HIDRÓGENO	2 4.0026 He HELIO											13 26.9815 Al ALUMINIO	14 12.011 Si SILICIO	15 14.007 P FÓSFORO	16 15.999 S AZUFRE	17 35.453 Cl CLORO	18 39.948 Ar ARGÓN			
3 6.941 Li LITIO	4 9.0122 Be BERILIO											5 10.811 B BORO	6 12.011 C CARBONO	7 14.007 N NITRÓGENO	8 15.999 O OXÍGENO	9 18.998 F FLUOR	10 20.180 Ne NEÓN			
11 22.990 Na SODIO	12 24.305 Mg MAGNESIO	19 39.098 K POTASIO	20 40.078 Ca CALCIO	21 44.956 Sc ESCANDIO	22 47.867 Ti TITANIO	23 50.942 V VANADIO	24 51.996 Cr CROMO	25 54.938 Mn MANGANESO	26 55.845 Fe HIERRO	27 58.933 Co COBALTO	28 58.693 Ni NÍQUEL	29 63.546 Cu COBRE	30 65.38 Zn ZINC	31 69.723 Ga GALIO	32 72.64 Ge GERMANIO	33 74.922 As ARSENICO	34 78.96 Se SELENIO	35 79.904 Br BROMO	36 83.798 Kr KRIPTÓN	
37 85.468 Rb RUBIDIO	38 87.62 Sr ESTRONCIO	39 88.906 Y YTRIO	40 91.224 Zr ZIRCONIO	41 92.906 Nb NIOBIO	42 95.96 Mo MOLIBDENO	43 98 Tc TECNICIO	44 101.07 Ru RUTENIO	45 102.91 Rh RODIO	46 106.42 Pd PALADIO	47 107.87 Ag PLATA	48 112.41 Cd CADMIO	49 112.41 In INDIO	50 114.82 Sn ESTAÑO	51 118.71 Sb ANTIMONIO	52 127.60 Te TELURO	53 126.91 I YODO	54 131.29 Xe XENÓN			
55 132.91 Cs CESIO	56 137.33 Ba BARIO	57-71 La-Lu Lantánidos	72 178.48 Hf HAFNIO	73 180.95 Ta TANTALO	74 183.84 W WOLFRAMO	75 186.21 Re RENIO	76 190.23 Os OSMIO	77 192.22 Ir IRIDIO	78 195.08 Pt PLATINO	79 196.97 Au ORO	80 200.59 Hg MERCURIO	81 204.38 Tl TALIO	82 207.20 Pb PLOMBO	83 208.98 Bi BISMUTO	84 209 Po POLONIO	85 210 At ASTATO	86 222 Rn RADÓN			
87 223 Fr FRANCO	88 226 Ra RADIO	89-103 Ac-Lr Actínidos	104 261 Rf RUTERFORDIO	105 262 Db DUBNIO	106 263 Sg SEABORGIO	107 263 Bh BOHRIO	108 263 Hs HASSIO	109 263 Mt MITHNERIO	110 263 Ds DARMSTADTIO	111 263 Rg ROENTGENIO	112 263 Cn COPECENIO	113 263 Nh NIHONIO	114 263 Fl FLEROVIO	115 263 Mc MOSCOWIO	116 263 Lv LIVERMORIO	117 263 Ts TENESIO	118 263 Og OGANESÓN			
			57 138.91 La LANTANIO	58 140.12 Ce CELENIO	59 140.91 Pr PRASEODIMIO	60 144.24 Nd NEODIMIO	61 145 Pm PROMETIO	62 150.36 Sm SAMARIO	63 151.96 Eu EUROPIO	64 157.25 Gd GADOLINIO	65 158.93 Tb TERBIO	66 162.50 Dy DISPROSIO	67 164.93 Ho HOLMIO	68 167.26 Er ERBIO	69 168.93 Tm TERMIO	70 173.05 Yb YTERBIO	71 174.97 Lu LUTECIO			
			89 223.04 Ac ACTINIO	90 223.04 Th TORIO	91 227.03 Pa PROTACTINIO	92 227.03 U URANIO	93 227.03 Np NEPTUNIO	94 237.04 Pu PLUTONIO	95 238.03 Am AMERICIO	96 238.03 Cm CURIO	97 238.03 Bk BERKELIO	98 238.03 Cf CALIFORNIO	99 238.03 Es EINSTEINIO	100 238.03 Fm FERMIUM	101 238.03 Md MENDELÉVIO	102 238.03 No NOBELIO	103 238.03 Lr LAWRENCIO			

metales alcalinos
alcalinotérreos
metales
metales de transición
lantánidos
metaloides
no metales
halógenos
gases nobles
actínidos

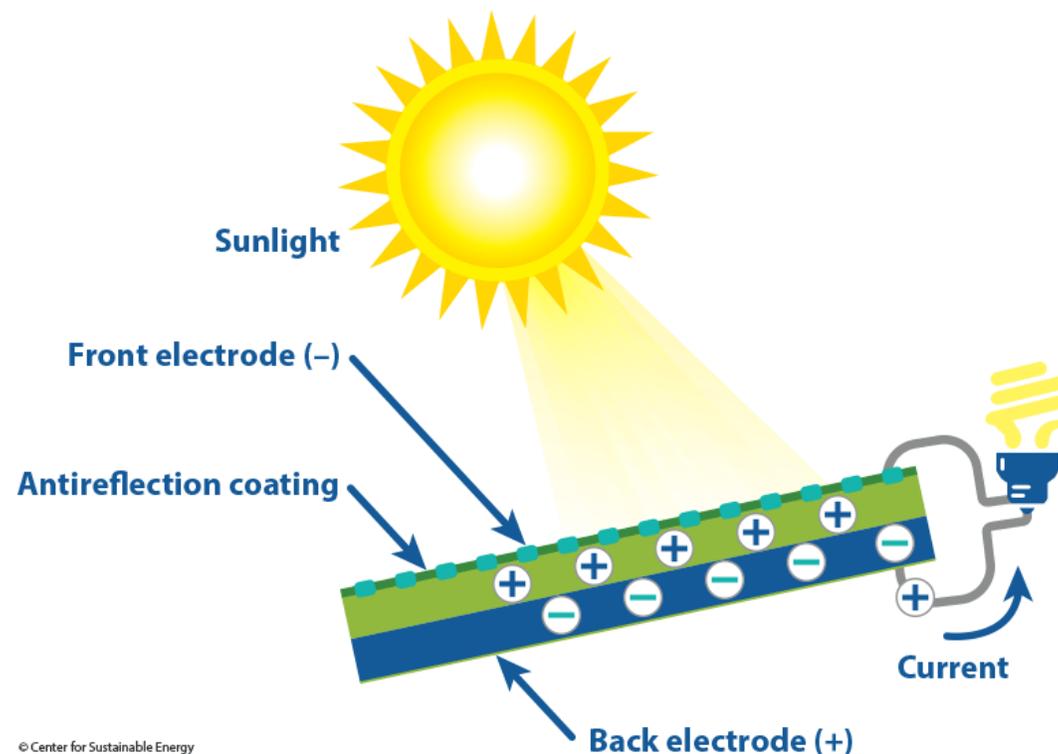
El principio de funcionamiento de una celda solar se basa en el efecto fotovoltaico de los materiales semiconductores

- El efecto fotovoltaico de un material semiconductor implica que este produce una carga cuando se pone en contacto con la radiación solar

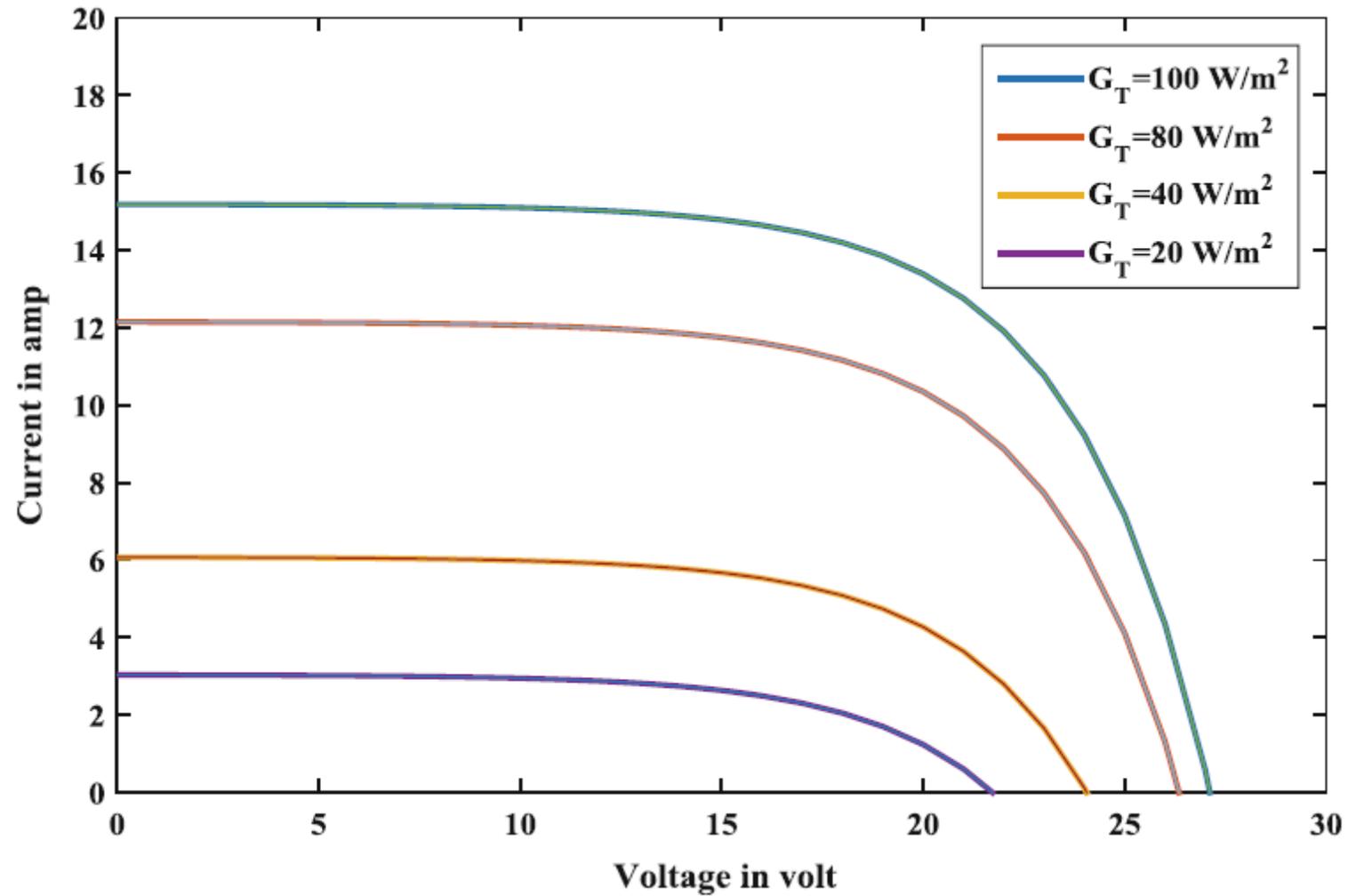


El principio de funcionamiento de una celda solar se basa en el efecto fotovoltaico de los materiales semiconductores

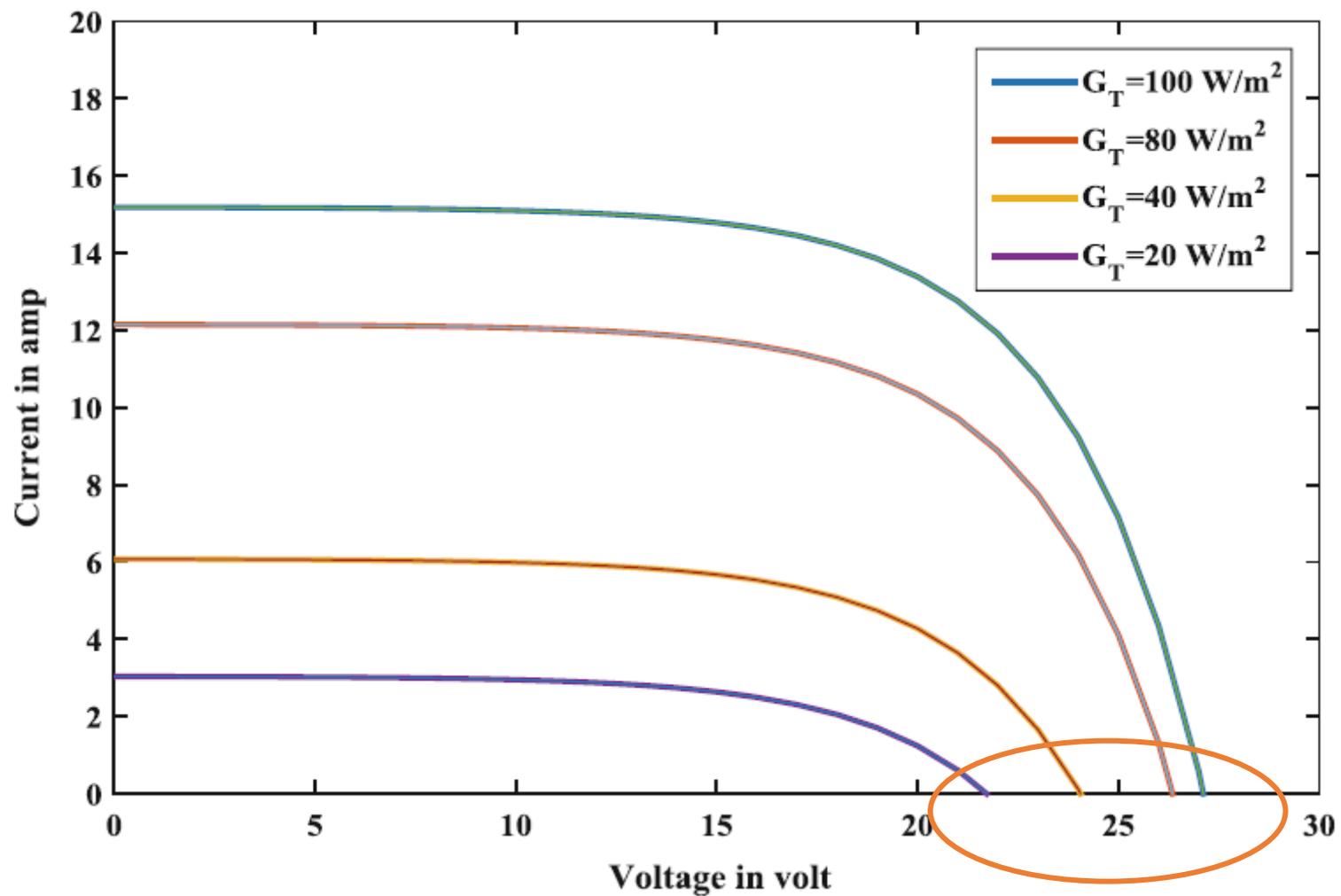
- El efecto fotovoltaico de un material semiconductor implica que este produce una carga cuando se pone en contacto con la radiación solar
- Una celda solar se forma al emplear la propiedad fotoeléctrica de los semiconductores, en donde electrones se producen en el material semiconductor cuando fotones de alta intensidad energética impactan su superficie.
- El movimiento de los electrones causa una carga eléctrica en corriente continua.



Curva corriente-tensión (I-V)

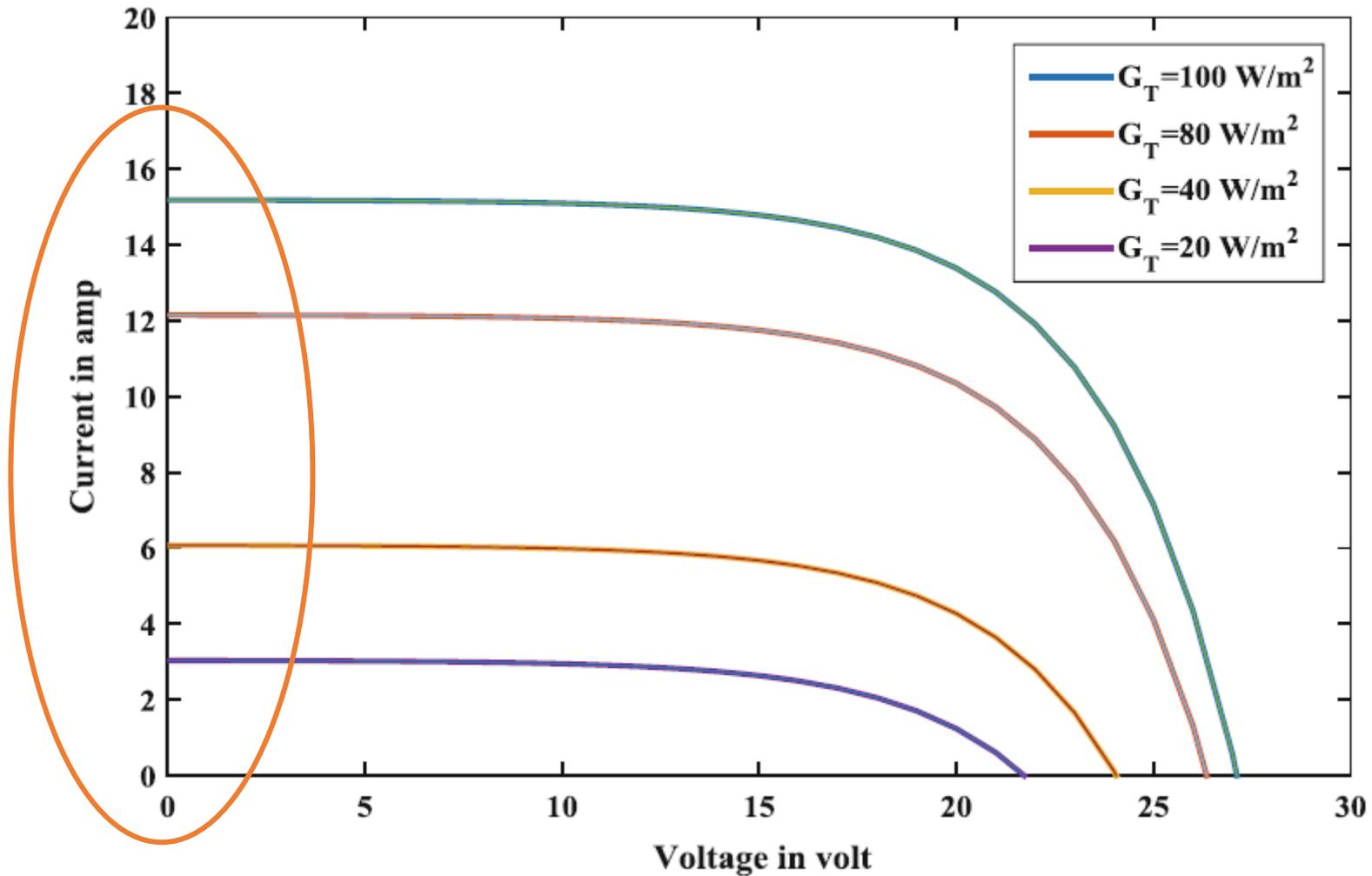


Curva corriente-tensión (I-V)



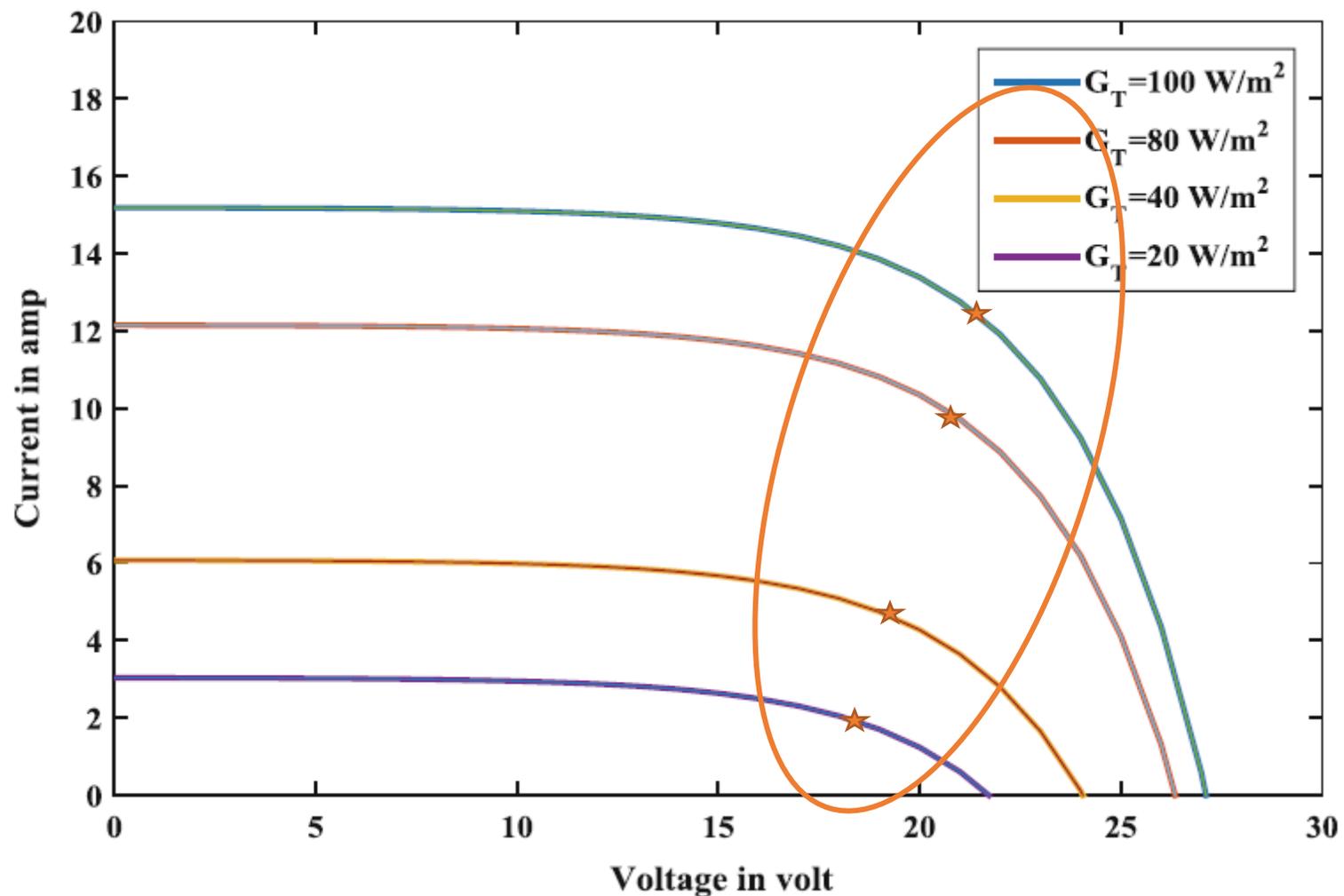
Cuando la corriente es cero (circuito abierto) tenemos la máxima tensión de la celda

Curva corriente-tensión (I-V)



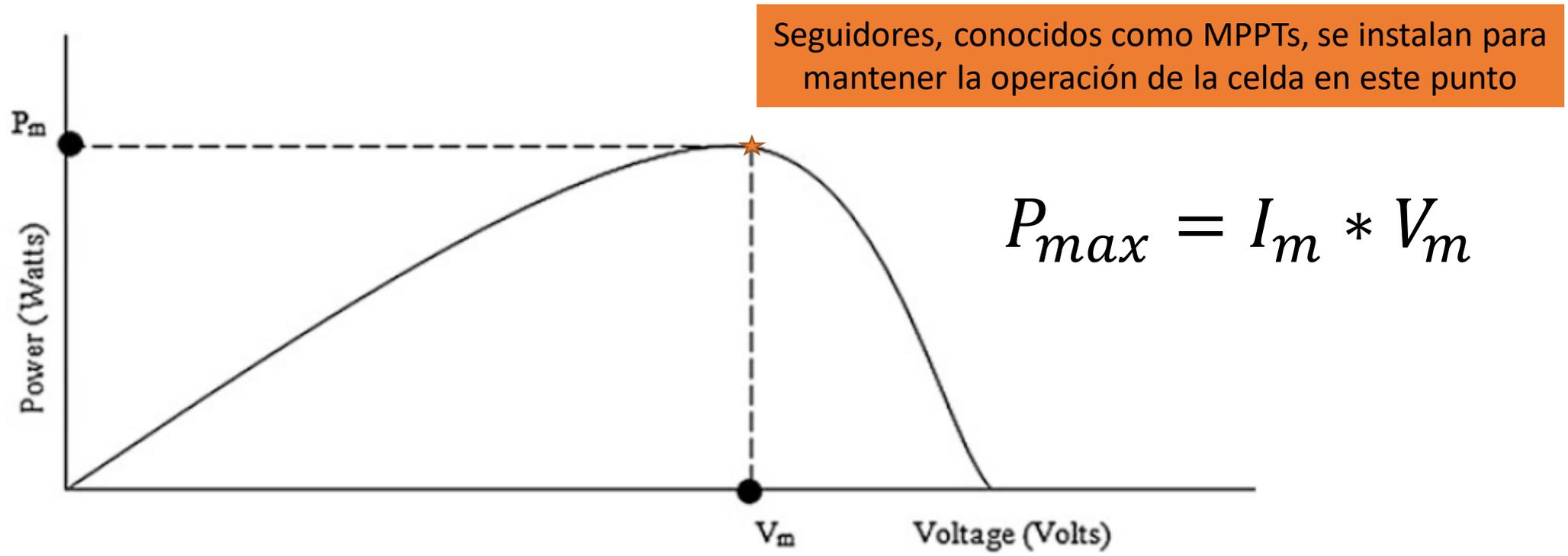
Cuando la tensión en los terminales es cero (corto circuito) tenemos la máxima corriente de la celda

Curva corriente-tensión (I-V)

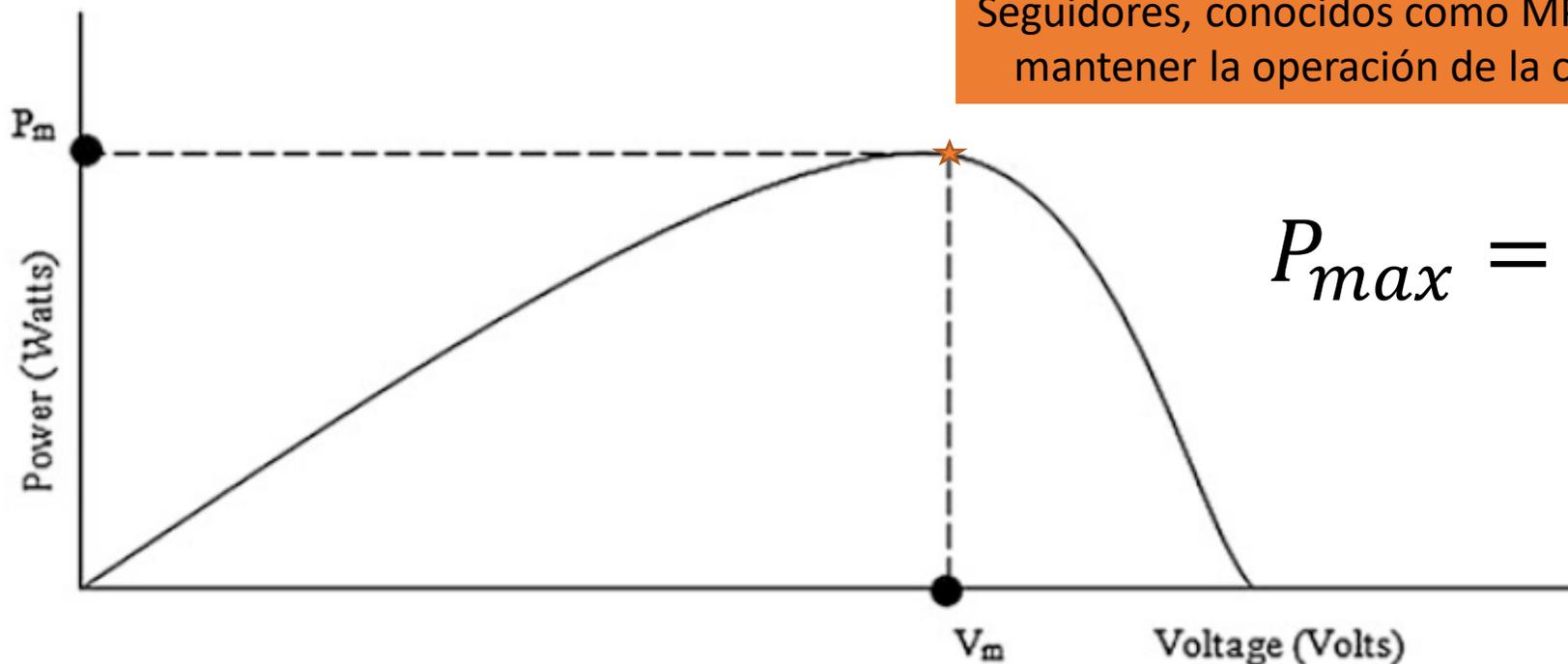


El punto de inflexión (codo de la curva) representa el punto óptimo de operación de la celda

La curva potencia-tensión (P-V) de una celda fotovoltaica nos indica el punto óptimo e ideal de operación de la celda



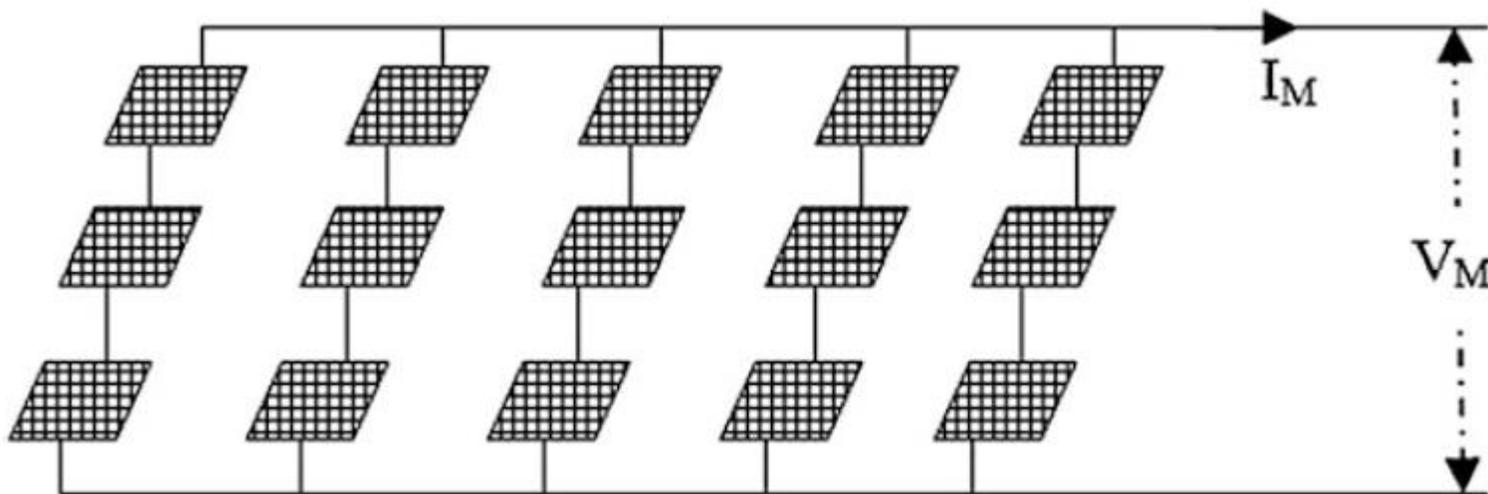
La curva potencia-tensión (P-V) de una celda fotovoltaica nos indica el punto óptimo e ideal de operación de la celda



Seguidores, conocidos como MPPTs, se instalan para mantener la operación de la celda en este punto

El valor de la potencia máxima se suele estimar también en razón del “factor capa” que define la calidad de la operación de la celda.

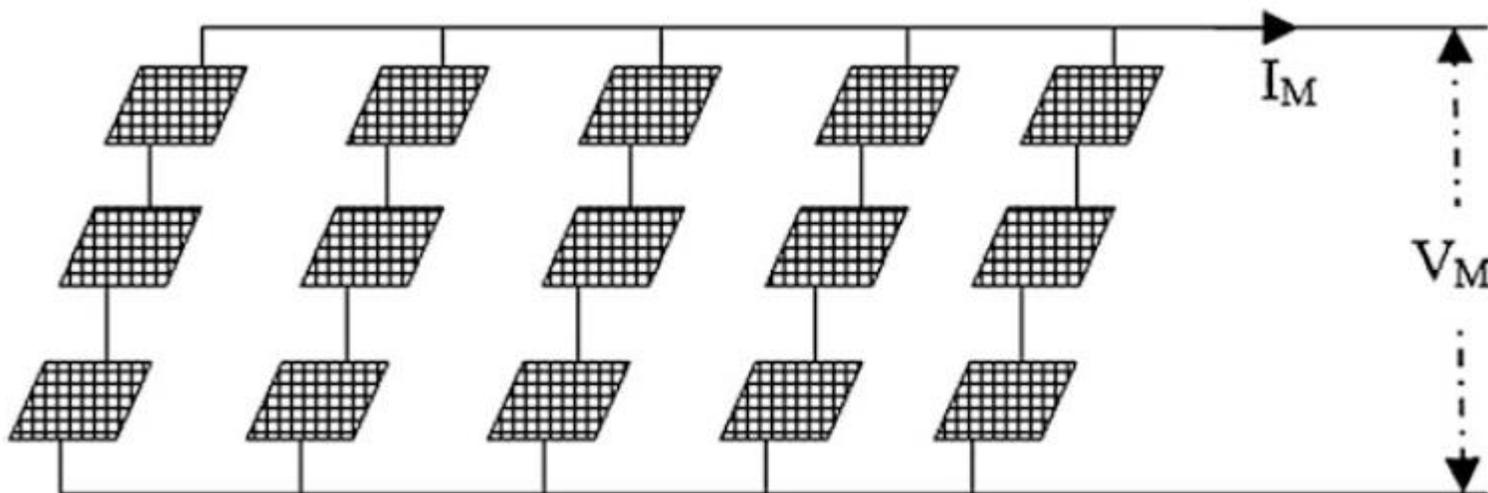
Una celda fotovoltaica no es suficiente para producir un panel solar, se ocupan varias celdas



Una celda produce una tensión de unos 0.6 V

Usualmente se conectan (a través de elementos de protección) en una configuración para producir un módulo fotovoltaico

Una celda fotovoltaica no es suficiente para producir un panel solar, se ocupan varias celdas



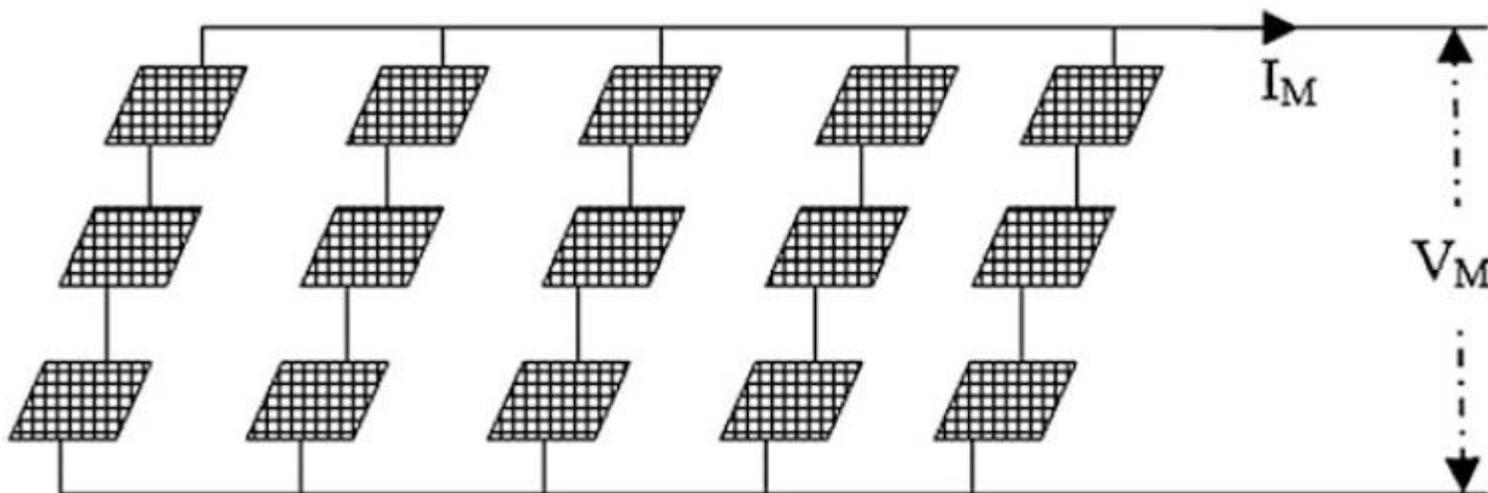
La configuración puede ser en serie, paralelo o serie-paralelo (depende de la aplicación)

Paralelo: Para aplicaciones que requieran aumentar la corriente de salida.

Serie: Para aplicaciones que requieran aumentar la tensión de salida.

Una celda fotovoltaica no es suficiente para producir un panel solar, se ocupan varias celdas

Este módulo tiene 5 módulos conectados en paralelo y 3 en serie



La configuración puede ser en serie, paralelo o serie-paralelo (depende de la aplicación)

Paralelo: Para aplicaciones que requieran aumentar la corriente de salida.

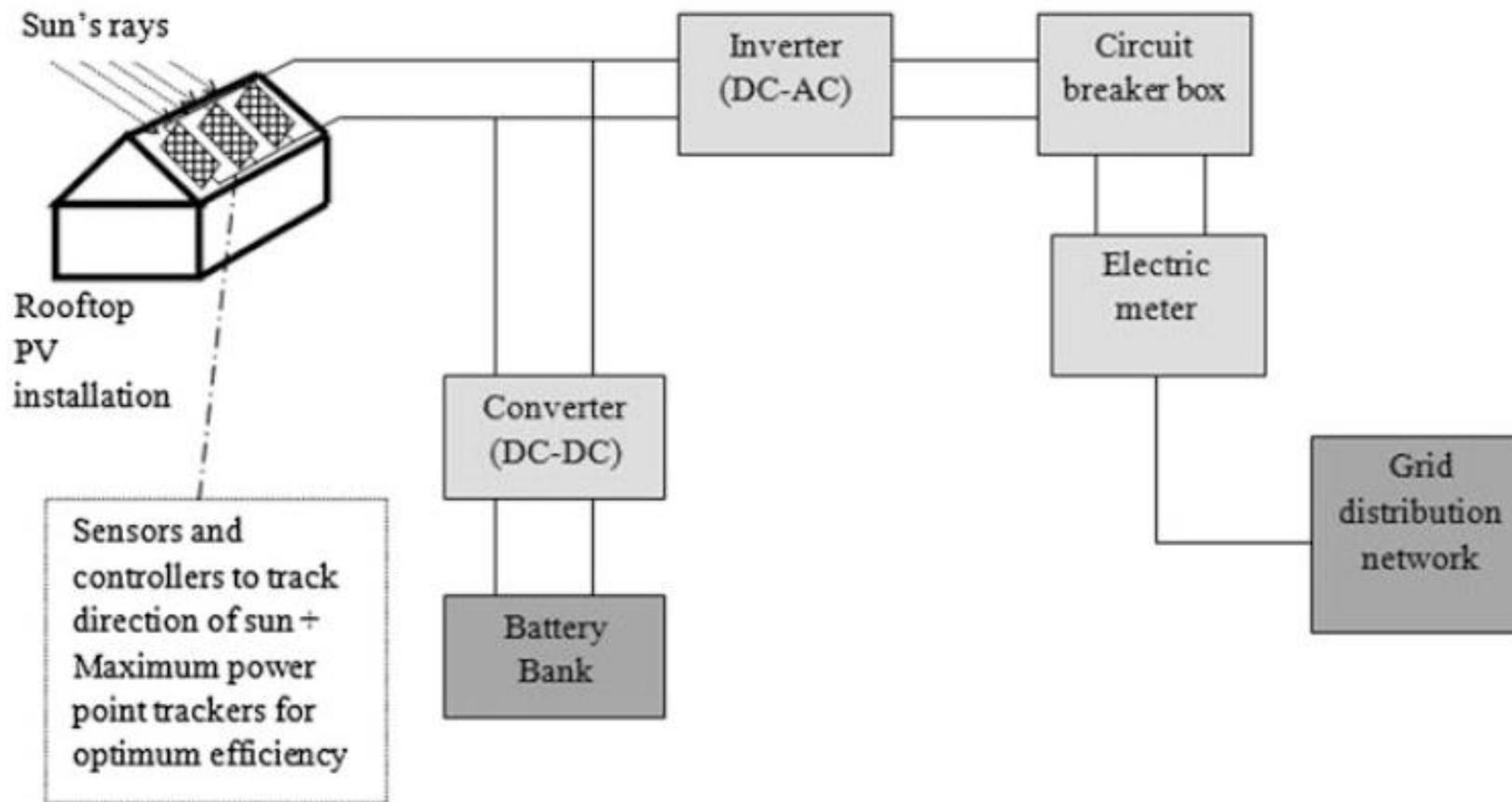
Serie: Para aplicaciones que requieran aumentar la tensión de salida.



La irradiancia es un factor en la estimación de la producción, pero no es el único ya que existen otros aspectos a tomar en cuenta; entre ellos la temperatura y la inclinación del panel

Parameter	Impact on PV cell performance
Ambient temperature	High ambient temperatures do not always indicate high power output, as even at ideal operating point, only 10–15% of solar radiation is converted to electricity; the rest is converted into thermal energy
Moisture interference	Moisture can seep into the modules through the deterioration of protective layers due to the usage of low-quality materials, rough handling and harsh temperature conditions. It causes degradation of the PV module
Presence of reflective materials	The presence of any reflective materials on the surface of the module is counterproductive to the process of converting solar energy to electricity, as a portion of light energy will be lost through reflection. For this reason, antireflective coatings are mandatory in PV modules
Quality of the materials used	Low-quality materials would lead to quick deterioration of the PV cell since PV technology is employed in places receiving very high levels of solar radiation and hence is prone to rough weather conditions. Since the modules are left uncovered, the materials must be able to withstand hail, lightning and other natural hazards
Size of the PV module	The area of a PV module has an impact on the solar power produced; however, larger sizes imply higher capital costs
Operating point	If the operating point of the PV cell is maintained close to the optimal operating point, then it can work efficiently. Trackers must be employed to ensure that the modules are working as close to the optimal operating point as possible
Tilt angle of the module	The tilt angle is defined as the angle the module makes with the horizontal surface on which it is placed. Tilt angle, when adjusted depending on the seasons, will help the modules yield higher power output. Tracking systems, though expensive, can result in even higher energy yields

Los sistemas fotovoltaicos de techo poseen otros elementos para su interconexión a la red eléctrica



En línea existen muchos otros recursos para aprender de la generación distribuida solar o fotovoltaica



<https://www.youtube.com/watch?v=zBYi9ynFNX8>

Oportunidades de negocio en la generación distribuida: experiencias de Perú



En línea existen muchos otros recursos para aprender de la generación distribuida solar o fotovoltaica



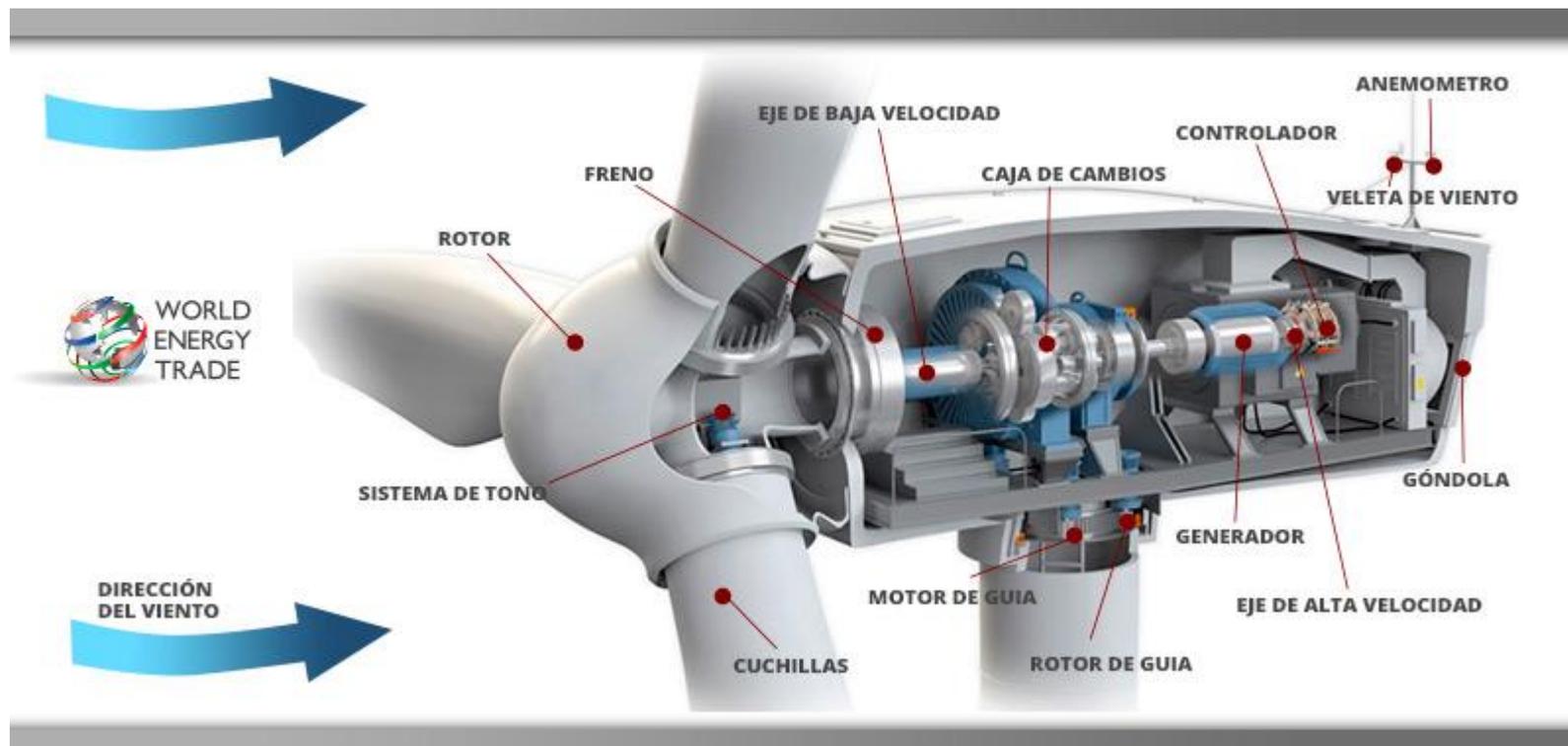
<https://www.youtube.com/watch?v=NZSeZtSQmXQ>

Tecnología eólica



Composición del generador eólico

Un generador eólico consiste en una turbina, un generador, y un controlador o dispositivo de acoplamiento.

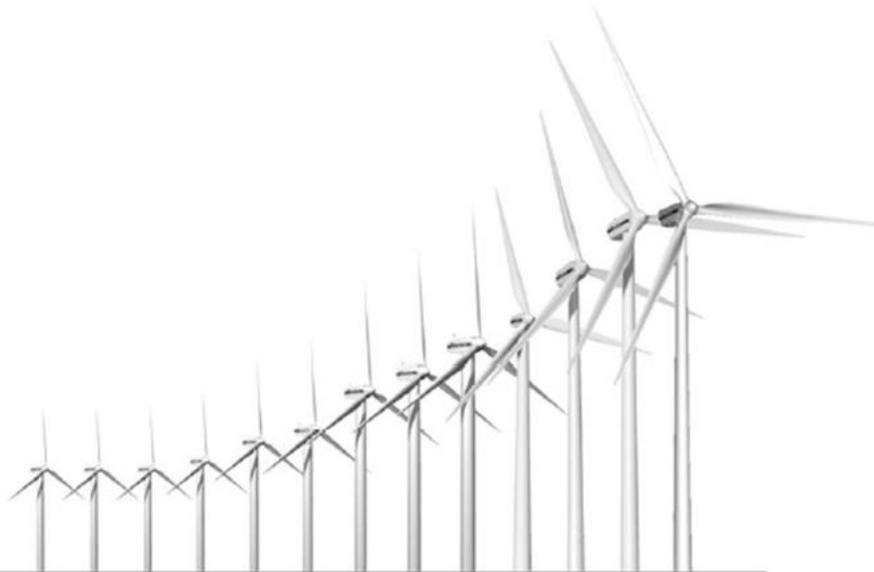


Cómo funciona la generación eólica?

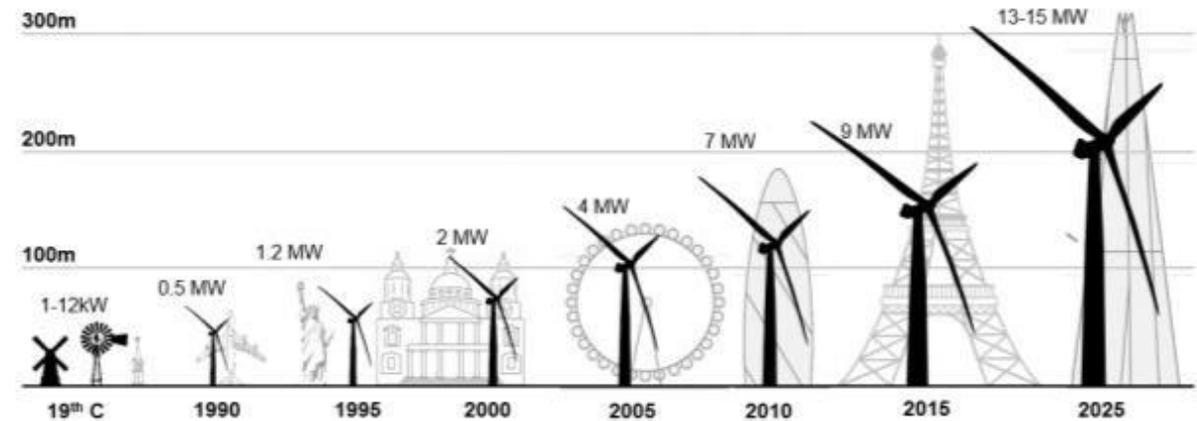


<https://www.youtube.com/watch?v=kmN9qD8vXbY>

Capacidad de generación



Product/Rotor diameter (m)	V15	V17	V19	V20	V25	V27	V39	V44	V47	V52	V66	V80	V90
Year of installation	1981	1984	1986	1987	1988	1989	1991	1995	1997	2000	1999	2000	2002
Capacity (kW)	55	75	90	100	200	225	500	600	660	850	1750	2000	3000
MWh/year	217	265	301	346	481	647	1304	1581	1947	2530	4705	6768	-



Relación de velocidades: $\lambda = \frac{\Omega \times R}{U}$

Turbina grande \rightarrow Velocidad baja

ρ : densidad del aire (1.225 kg/m³)

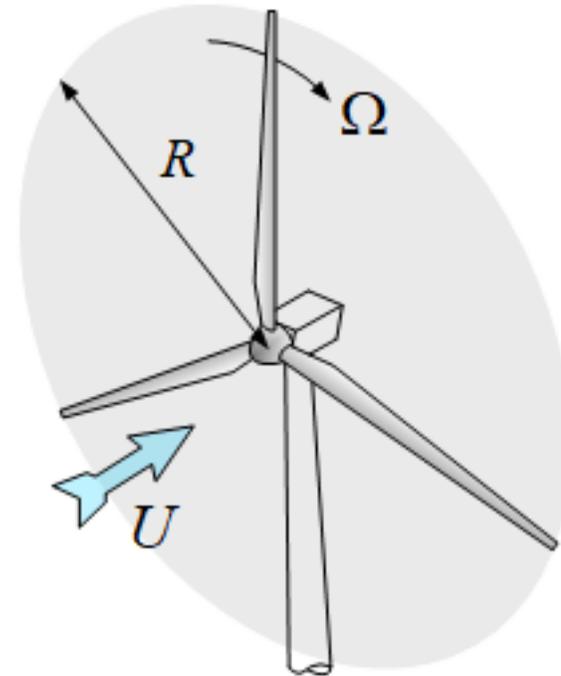
C_p : Coeficiente de potencia

A : Área de impacto del aire sobre las aspas

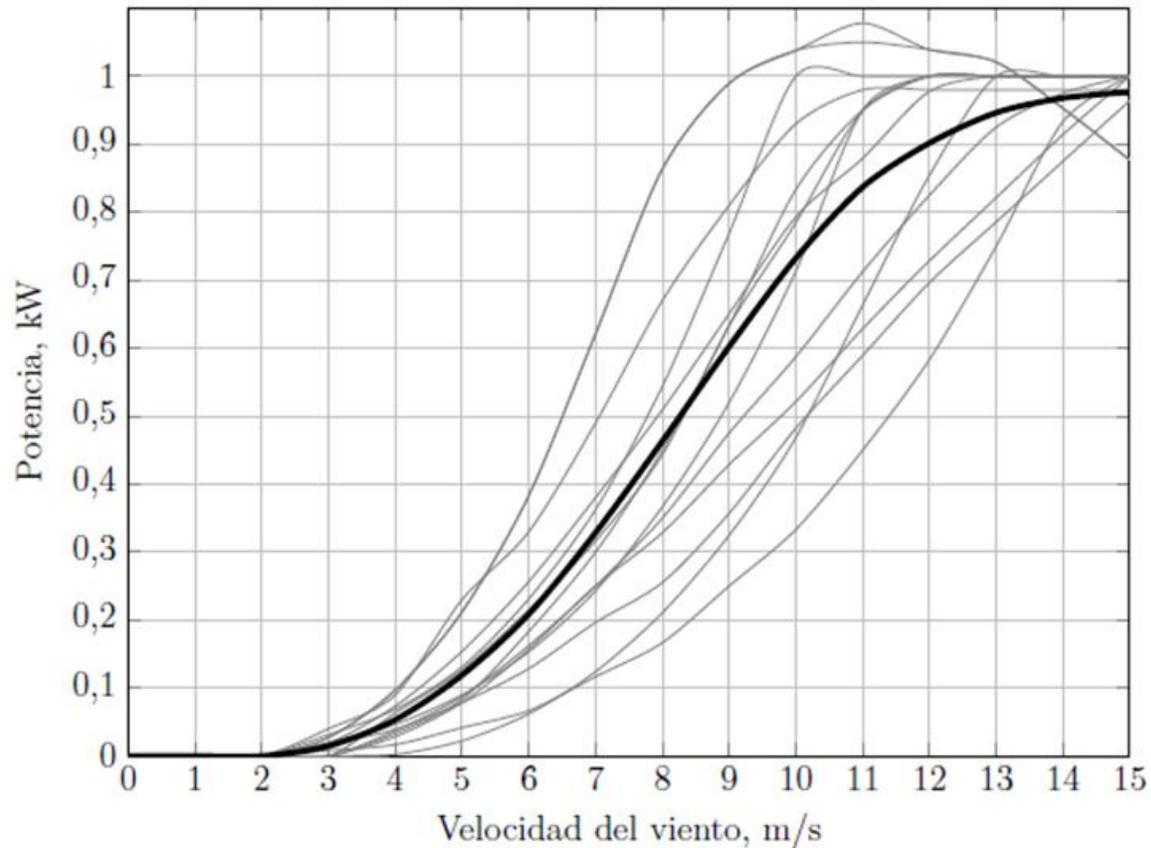
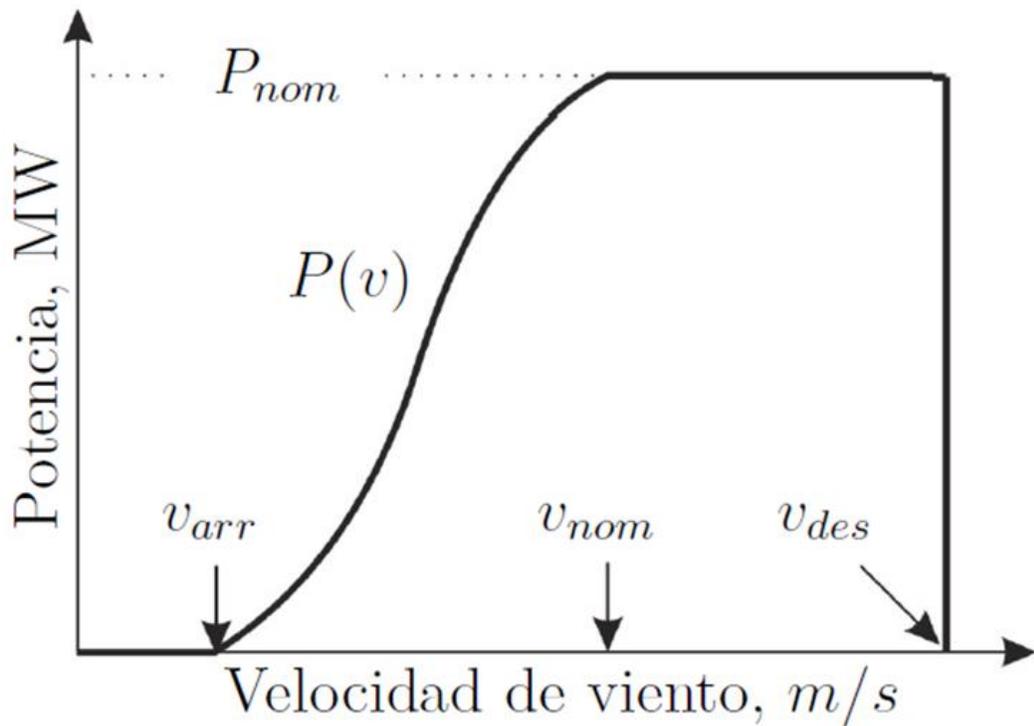
U : Velocidad del viento

Potencia disponible: $\frac{1}{2} \rho A U^3$

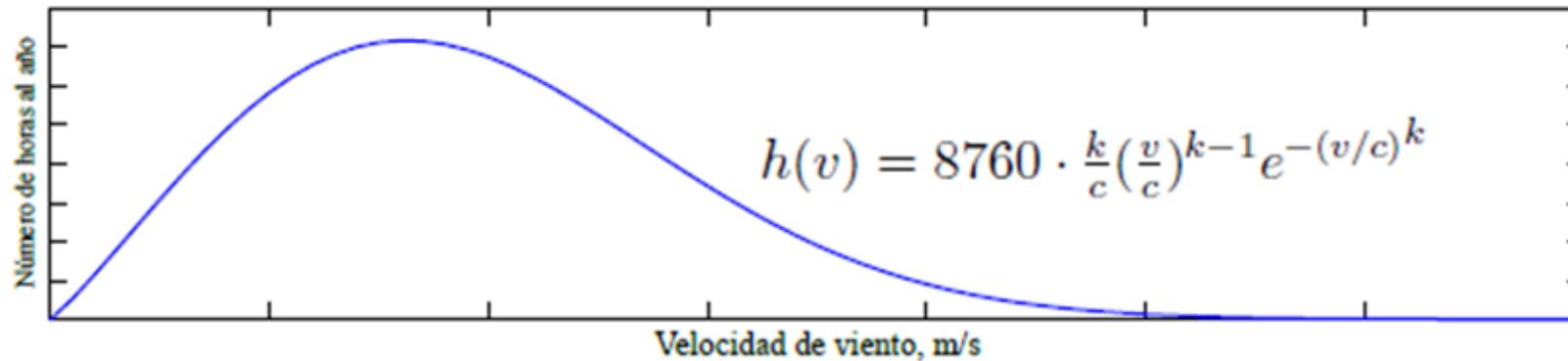
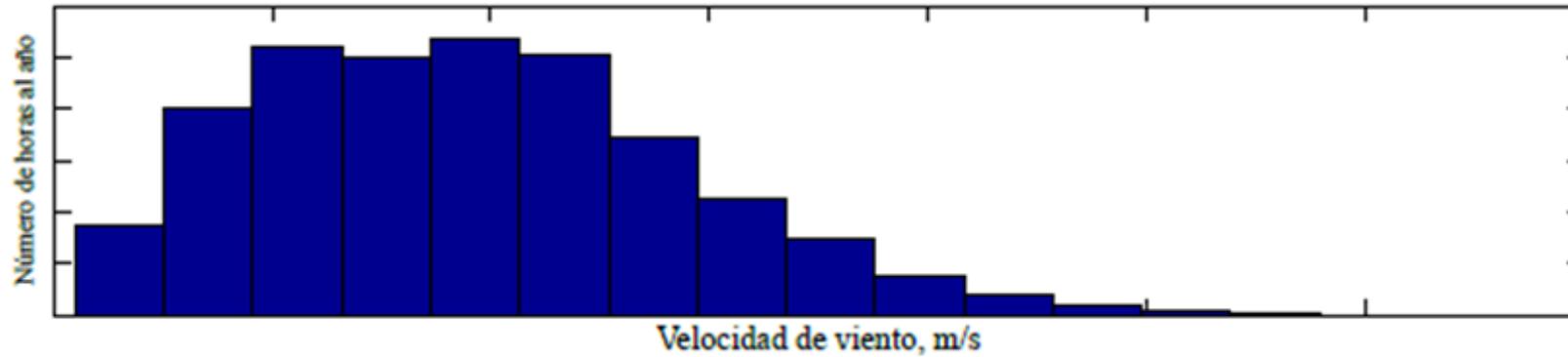
Potencia extraída: $\frac{1}{2} C_p \rho A U^3$



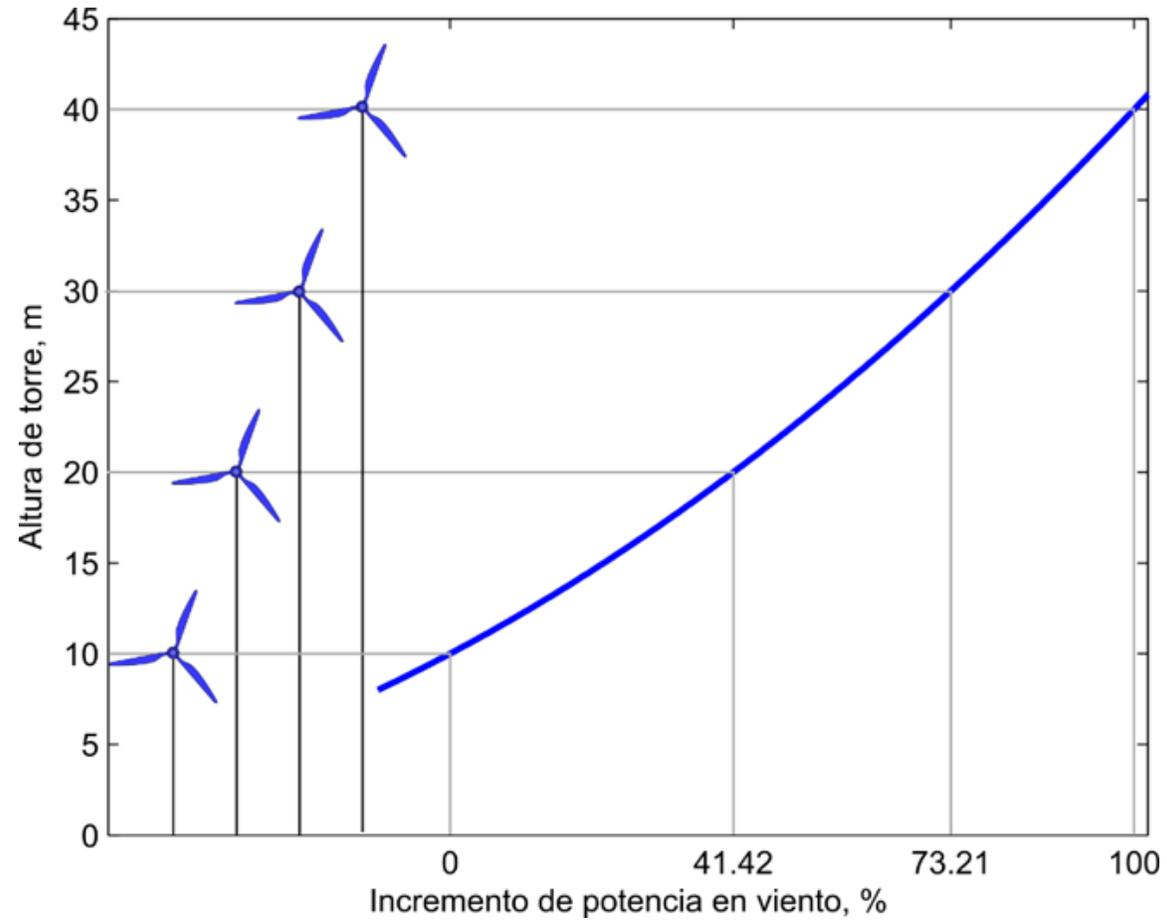
Curva de potencia



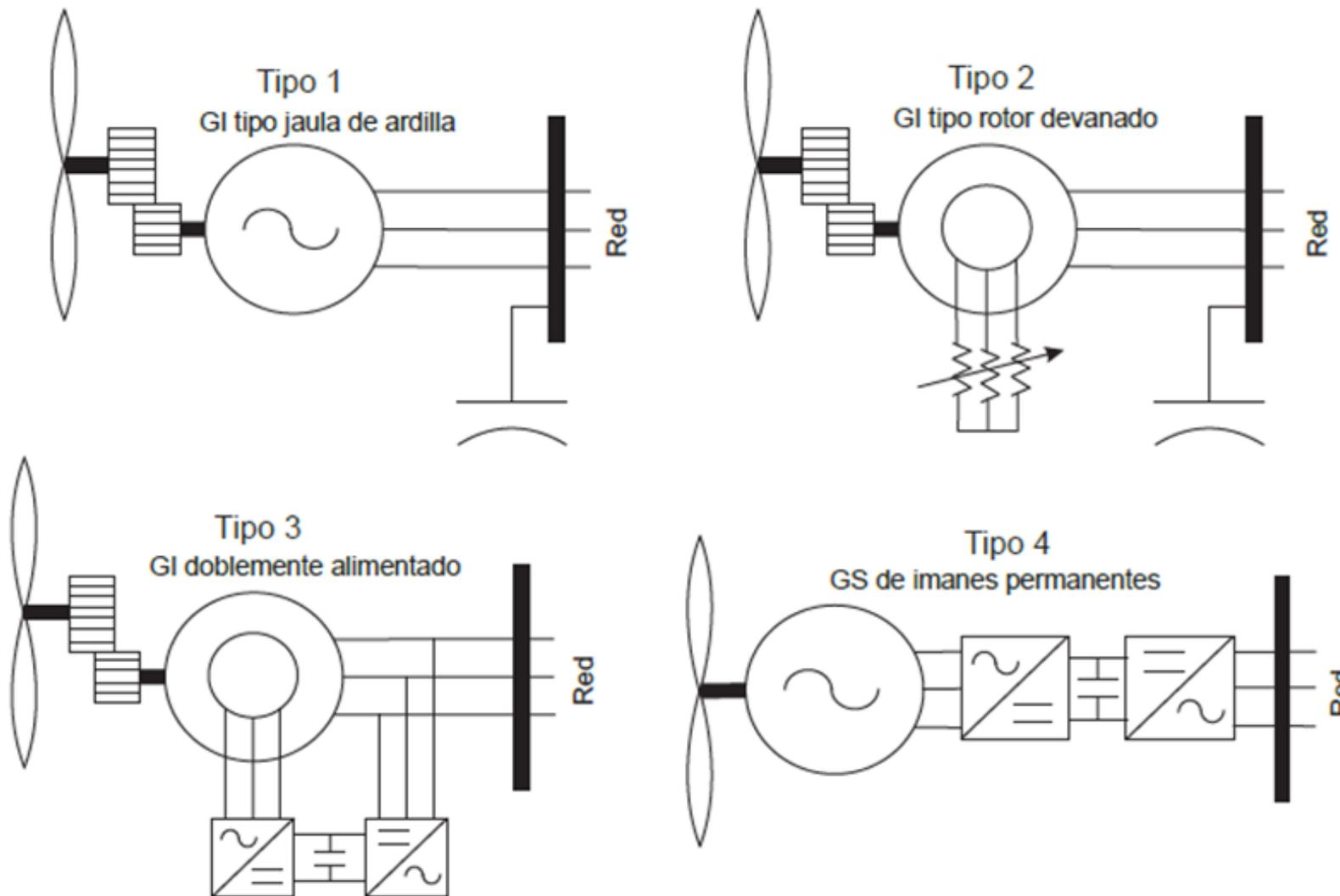
Estimación de potencial energético a una altura H0



Extracción de potencia según altura



Tipos de aerogeneradores



Un muy buen resumen de la generación distribuida eólica



<https://www.youtube.com/watch?v=MWuIVVYwRk8>

En línea existen muchos otros recursos para aprender de la generación distribuida eólica

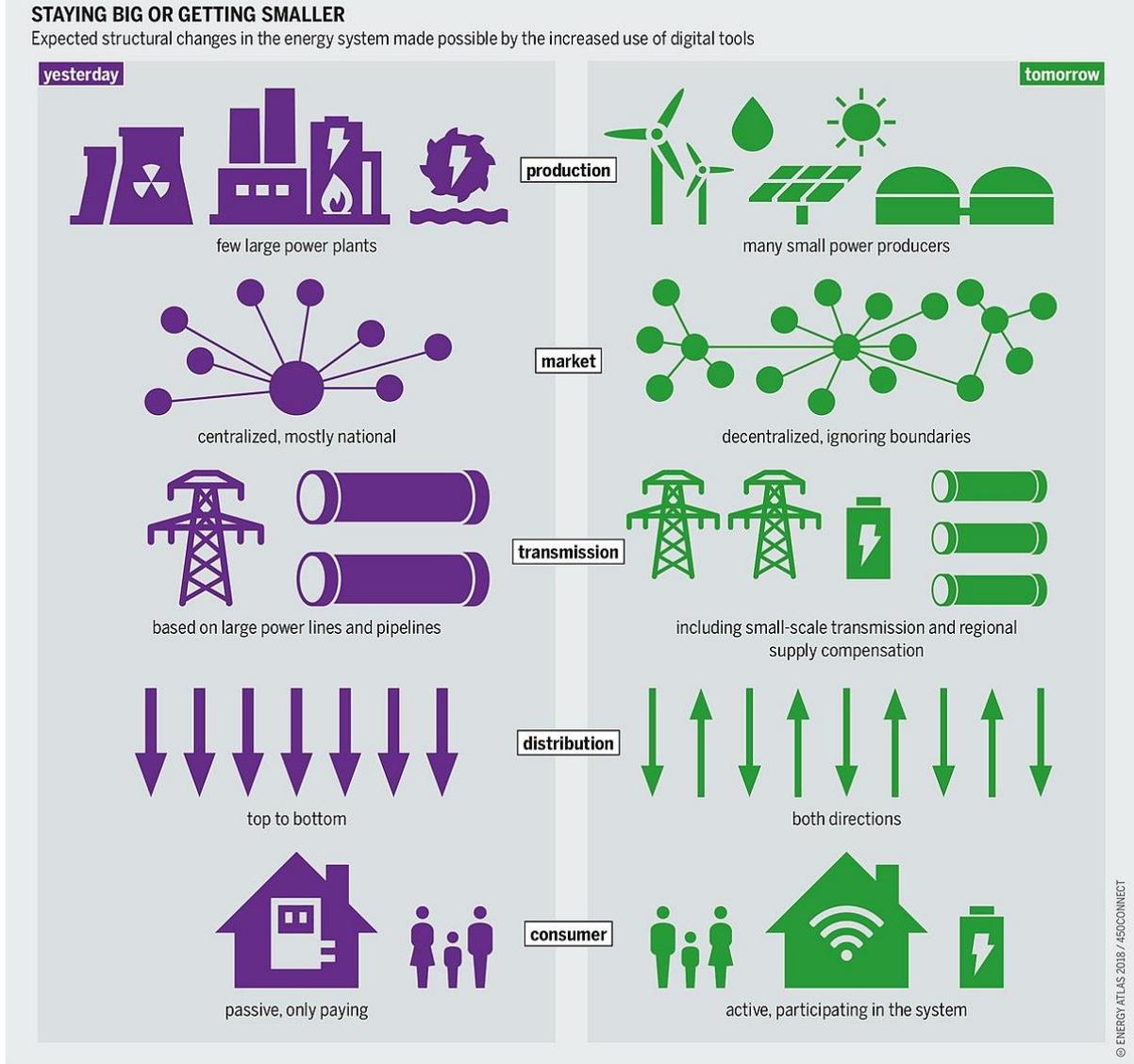


<https://www.youtube.com/watch?v=c818V-fXoWM>

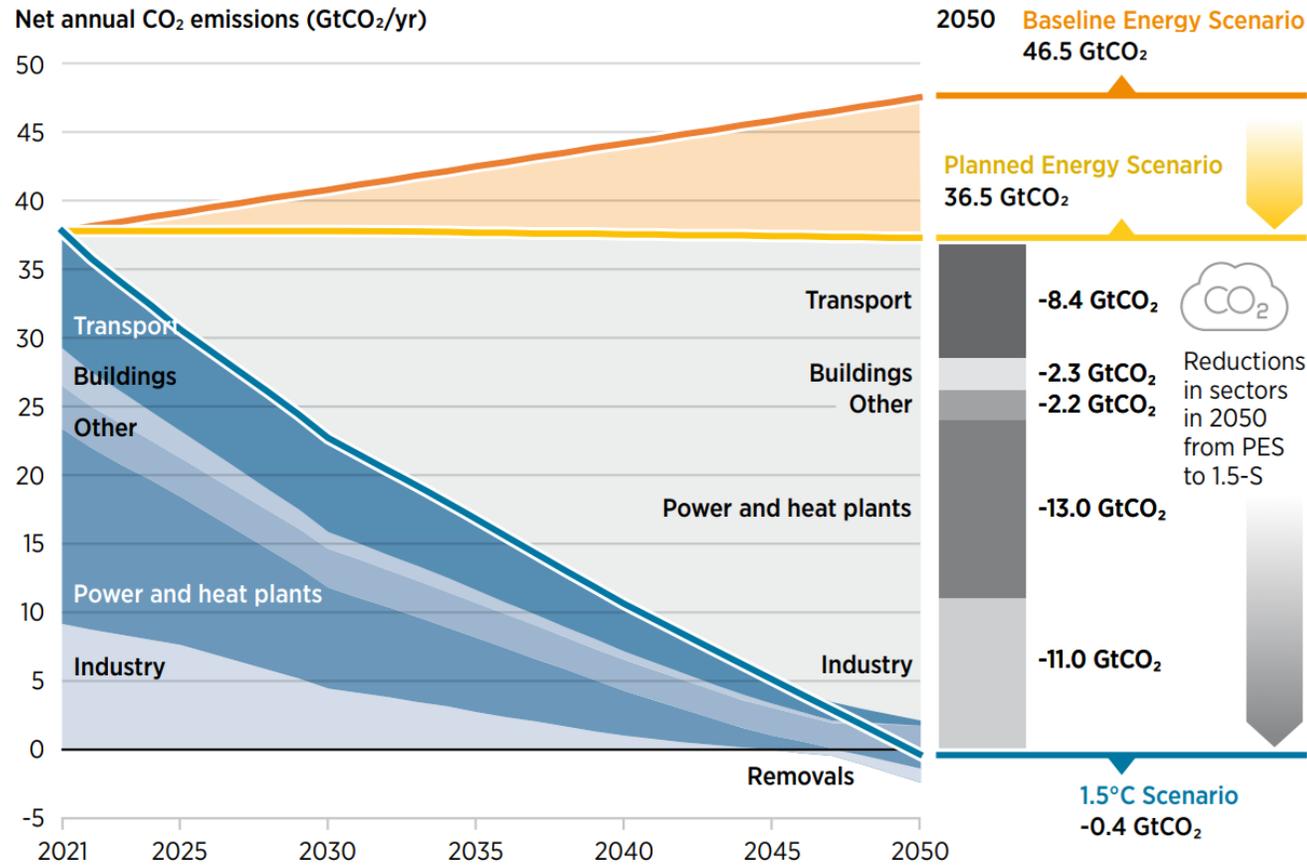
Beneficios de la generación distribuida (con renovables)



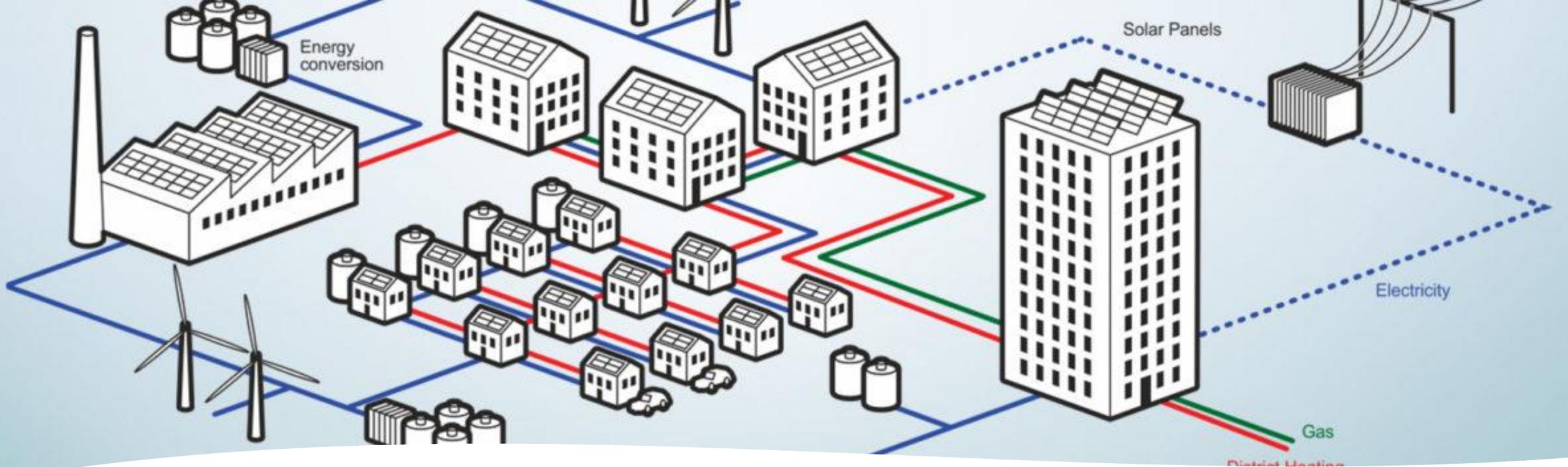
La generación distribuida tiene múltiples beneficios en toda la cadena de valor eléctrico



Potencial para reducir emisiones de gases de efecto invernadero



Un futuro con plantas térmicas causaría un aumento gradual de las emisiones, mientras que el despliegue de renovables permitiría una reducción importante y contribuiría con la descarbonización.



Descentralización de la energía

- La producción de la electricidad estará más cerca de los usuarios.
- Los usuarios tendrán más poder de disposición sobre el recurso (empoderamiento energético).
- Las empresas eléctricas pasarán a ser más operadores de red de distribución

Contribuyen al desarrollo social y económico



^a Includes liquid biofuels, solid biomass and biogas.
^b Direct jobs only.
^c "Others" includes geothermal energy, concentrated solar power, heat pumps (ground based), municipal and industrial waste, and ocean energy.

Source: IRENA jobs database.

Brindan un rápido acceso a la energía



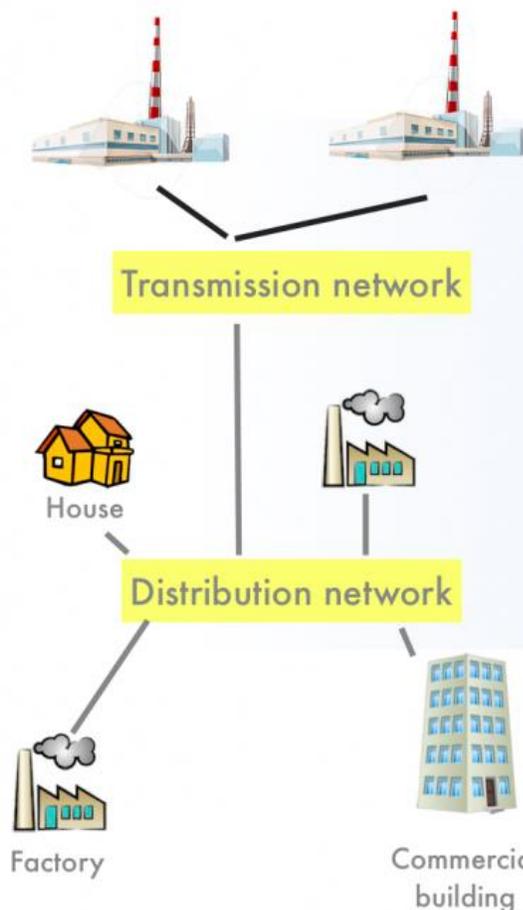
Contribuyen a suministros de energía más seguros

El sistema actual tiene altas dependencias de las plantas centralizadas.

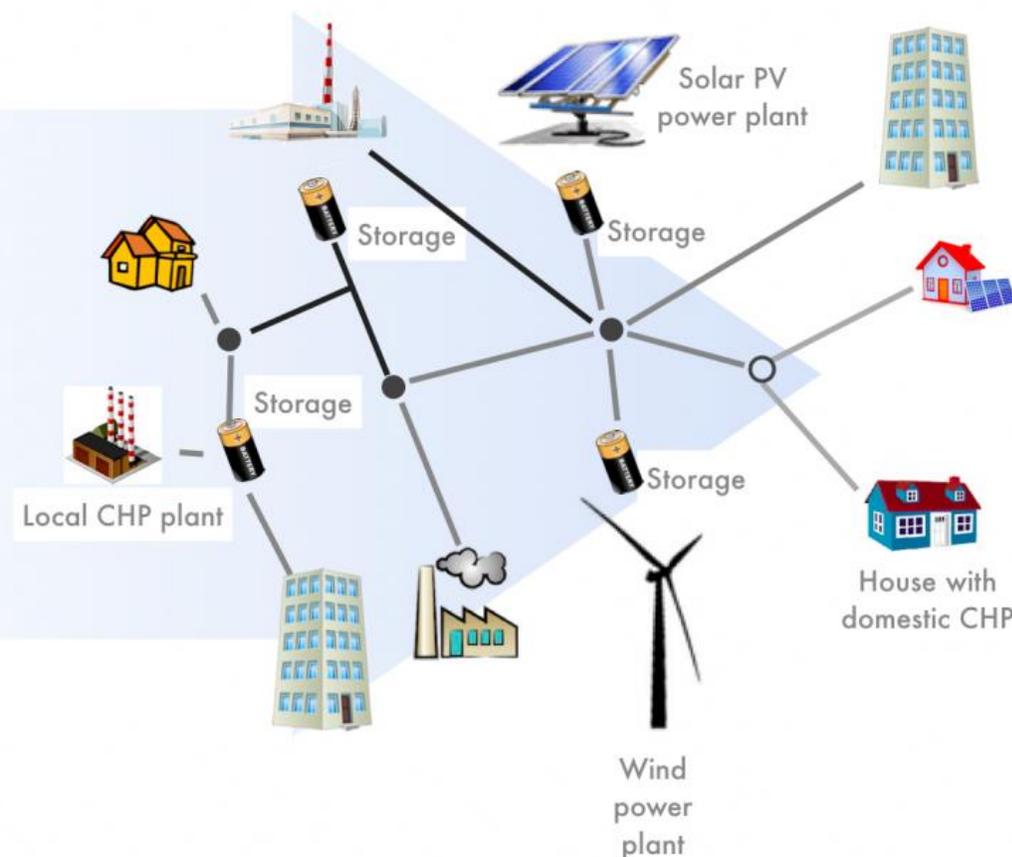
El sistema del futuro presenta múltiples fuentes de energía que sirven de respaldo entre ellas.

En caso de fallas locales, se visualiza la creación de islas eléctricas que permiten la continuidad del servicio de forma local mejorando el acceso y manteniendo una operación continua y confiable de la red eléctrica

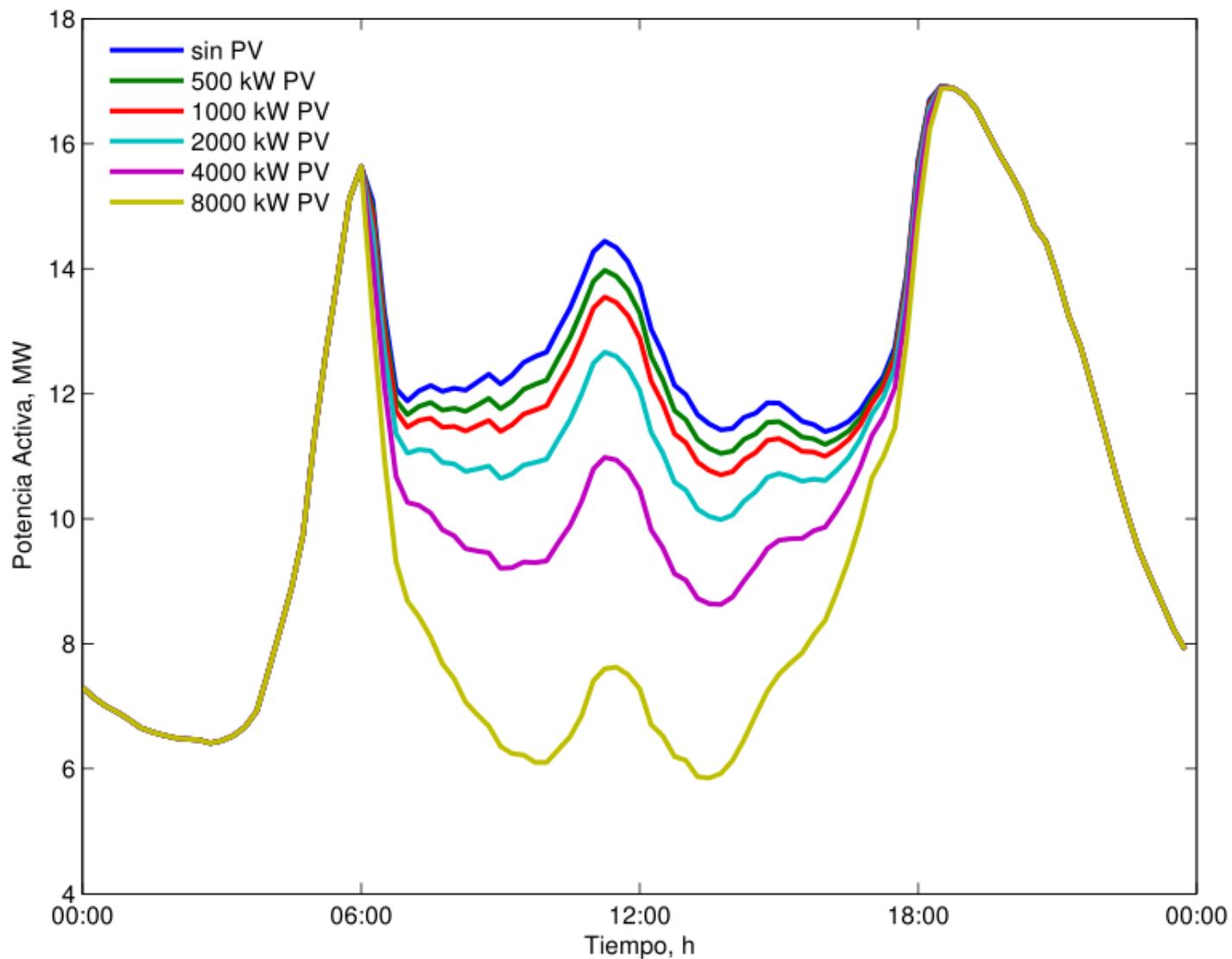
Yesterday Centralized Power



Tomorrow Clean, local power



Ayudan a reducir demandas de los circuitos

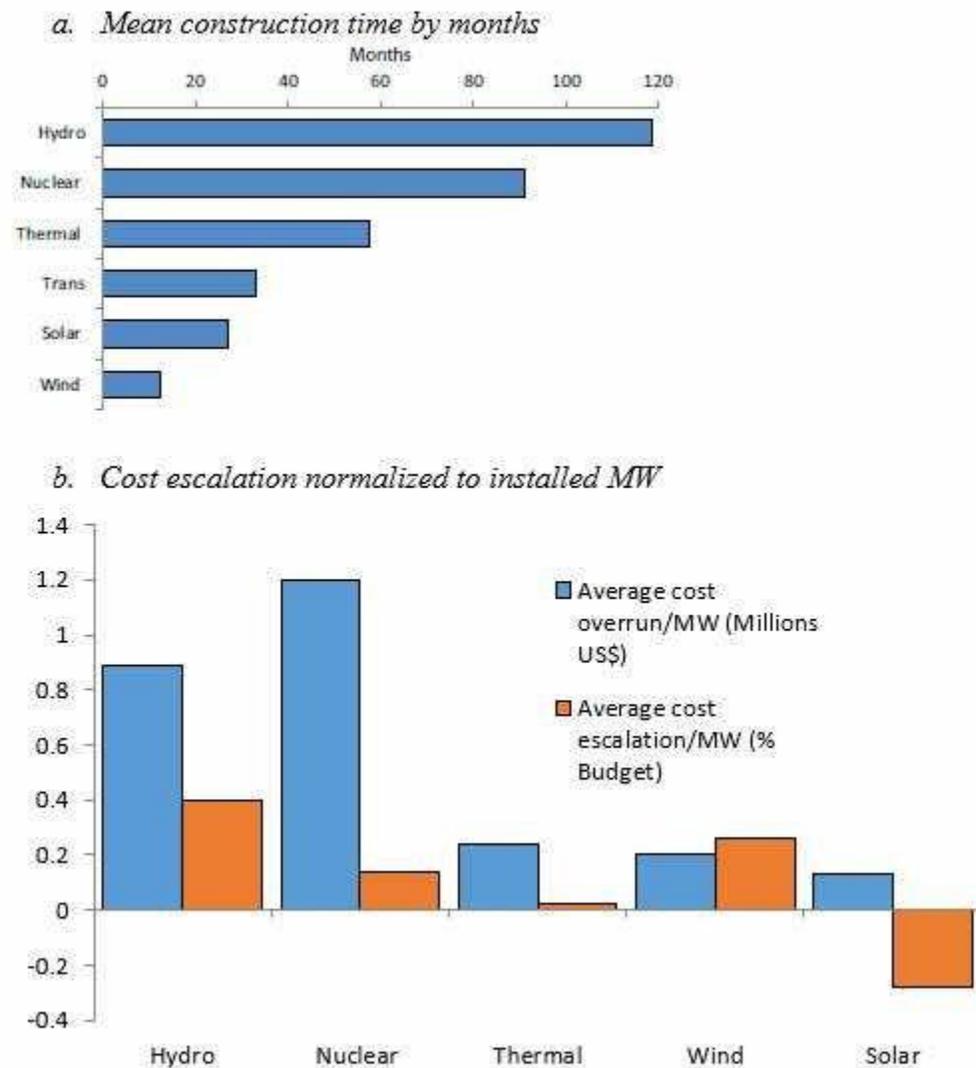


- Aunque la mayoría de circuitos poseen su demanda máxima a horas nocturnas, la GD permite reducir la demanda durante el día.
- En algunos circuitos, esa demanda puede ser la máxima (circuitos comerciales).
- La reducción de demanda es gradual con el nivel de penetración, aunque se debe supervisar los flujos de potencia inversos.

Rápida instalación en comparación con plantas de gran escala

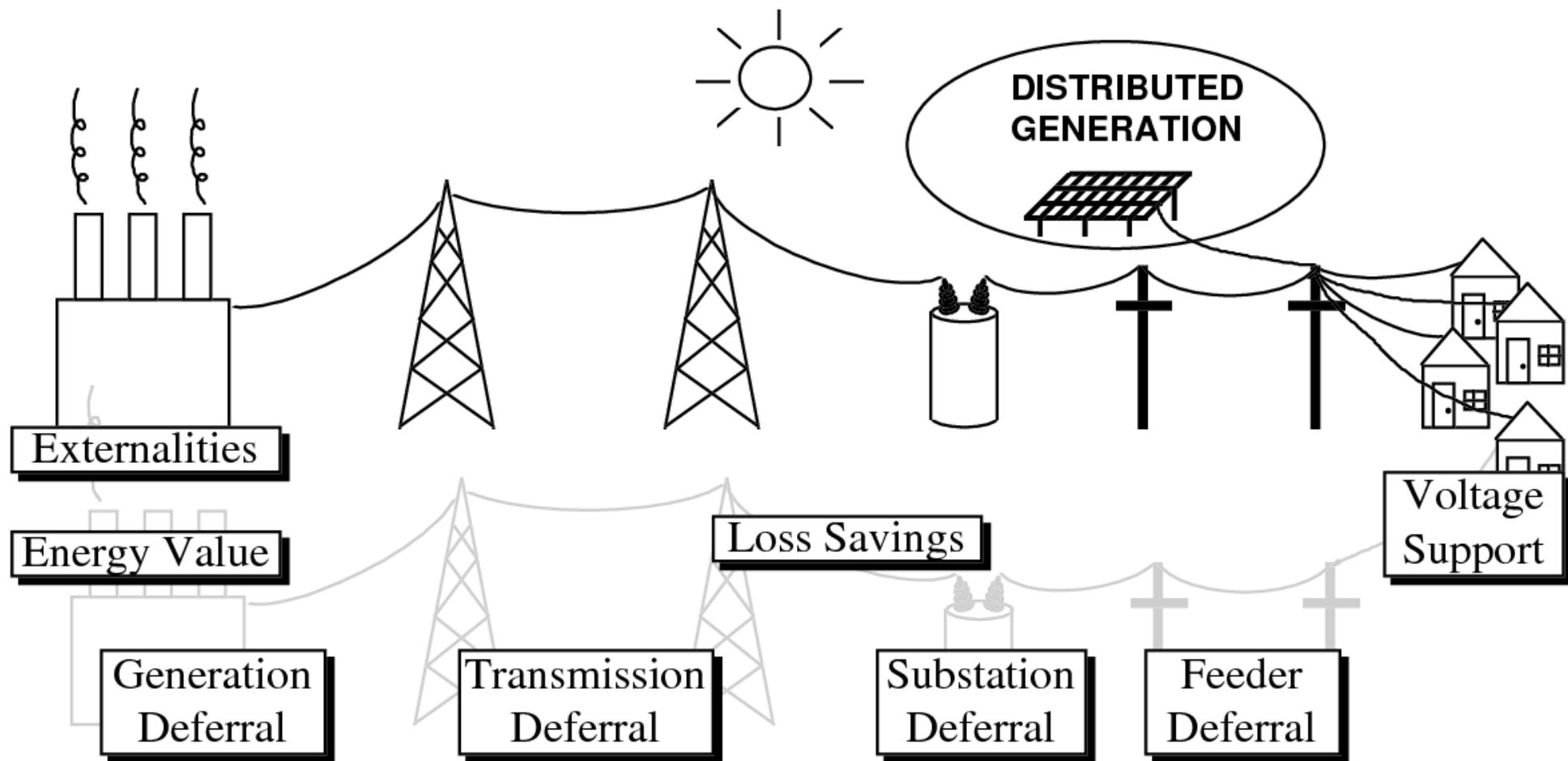
Un Proyecto eólico o solar tarda mucho menos que uno hidroeléctrico, nuclear o térmico, lo que a su vez acelera el acceso a electricidad a lugares que son de acceso complejo en la región amazónica.

Sovacool, B.K., Schmid, P., Stirling, A. *et al.* Differences in carbon emissions reduction between countries pursuing renewable electricity versus nuclear power. *Nat Energy* 5, 928–935 (2020). <https://doi.org/10.1038/s41560-020-00696-3>

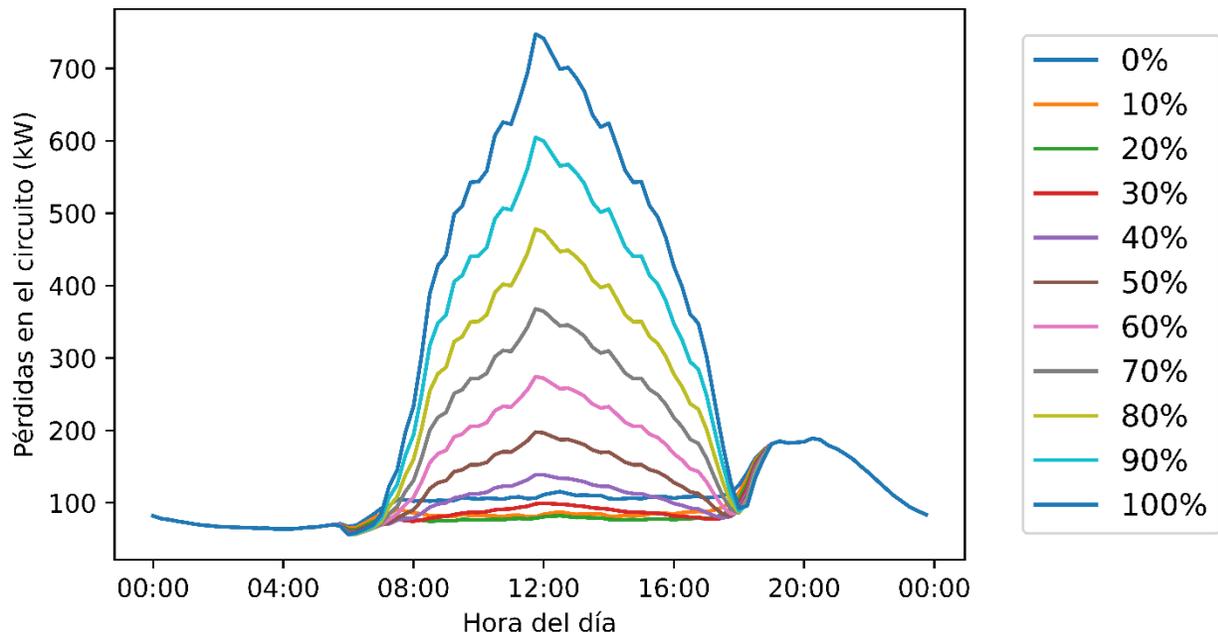


Retrasar inversiones en transmisión (y en la red en general)

Generation Transmission Distribution Demand



Reducción de pérdidas técnicas



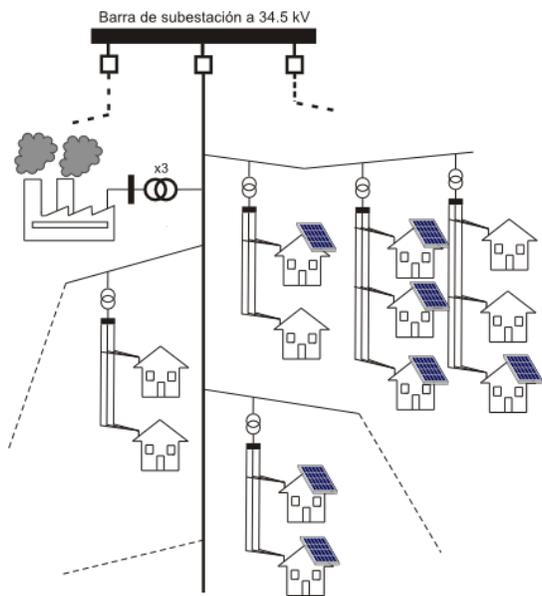
- Si la potencia producida localmente es igual o inferior a la demanda, típicamente se verá una reducción de las pérdidas técnicas del circuito
- Si se presentan flujos de potencia inversos y estos son mayores a los flujos de potencia tradicionales, las pérdidas técnicas podrían aumentar.

Porcentaje de Penetración (%)	0	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Pérdidas (MWh)	2.56	2.31	2.23	2.31	2.54	2.91	3.4	4.03	4.78	5.64	6.63

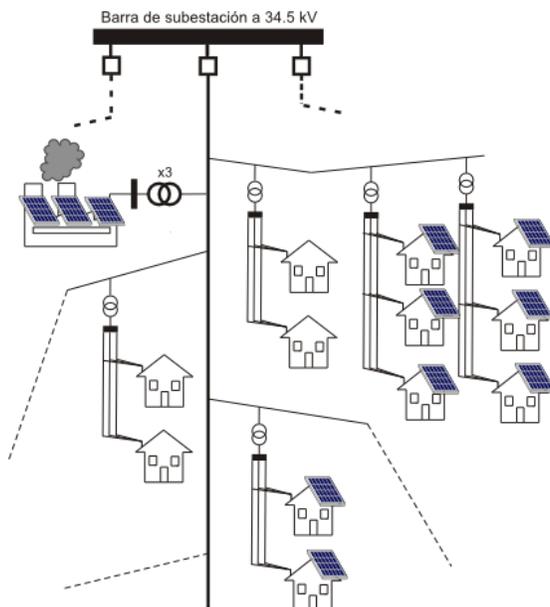
Impactos/desafíos de la generación distribuida (con renovables)



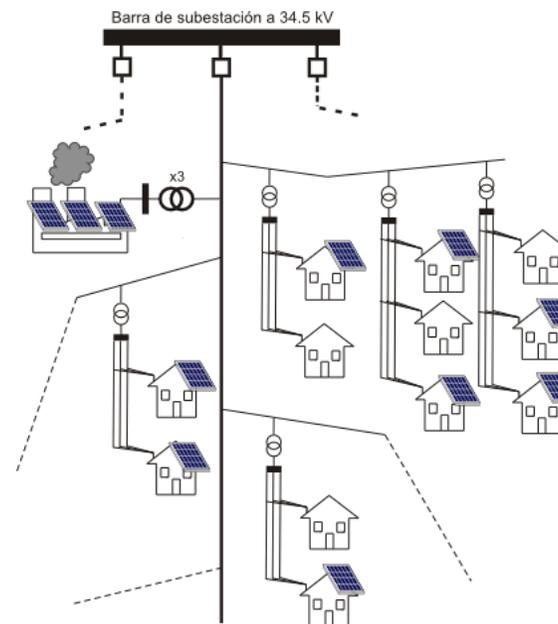
La ubicación de los sistemas es impredecible, por lo que se deben estudiar diferentes escenarios



¿Será así?

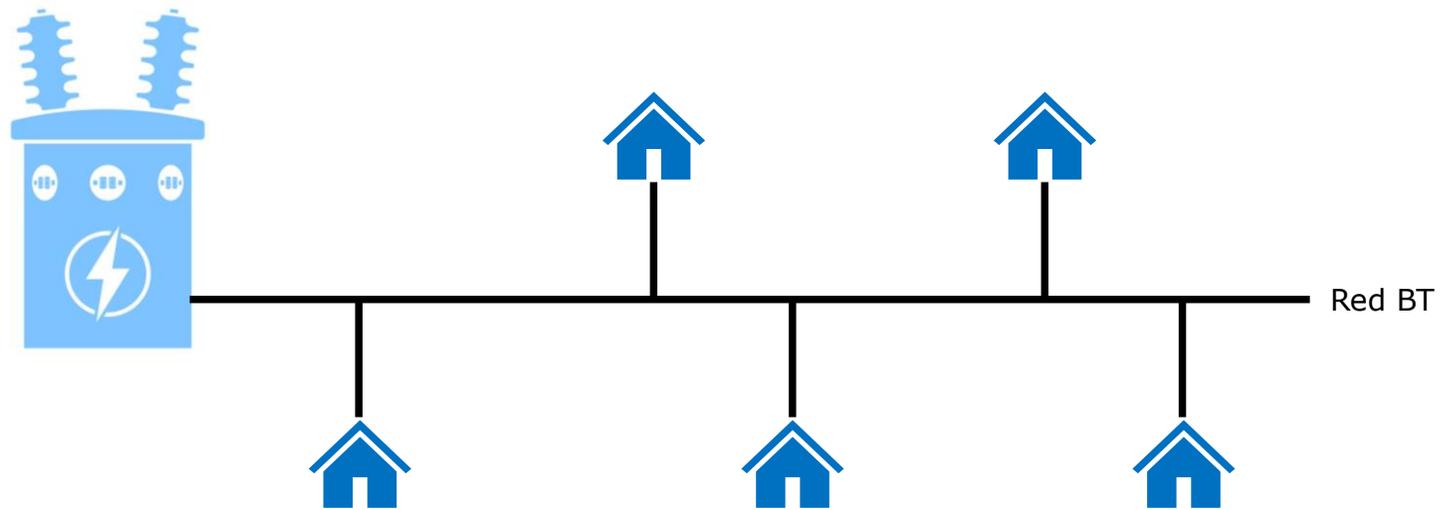


¿Tal vez así?

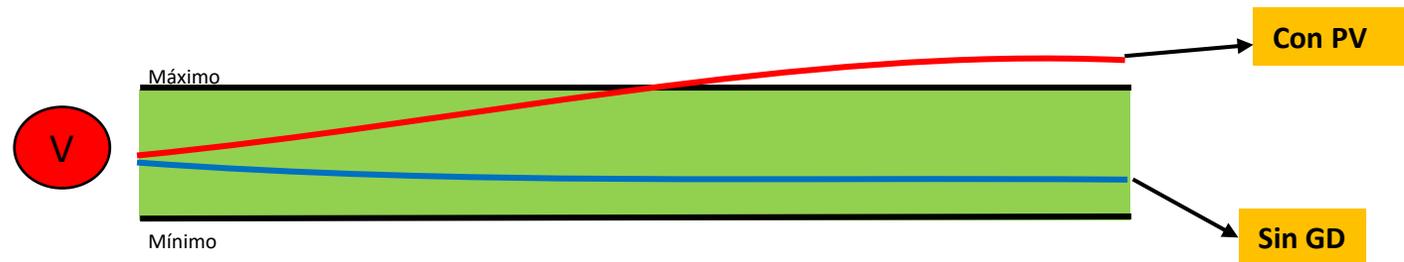
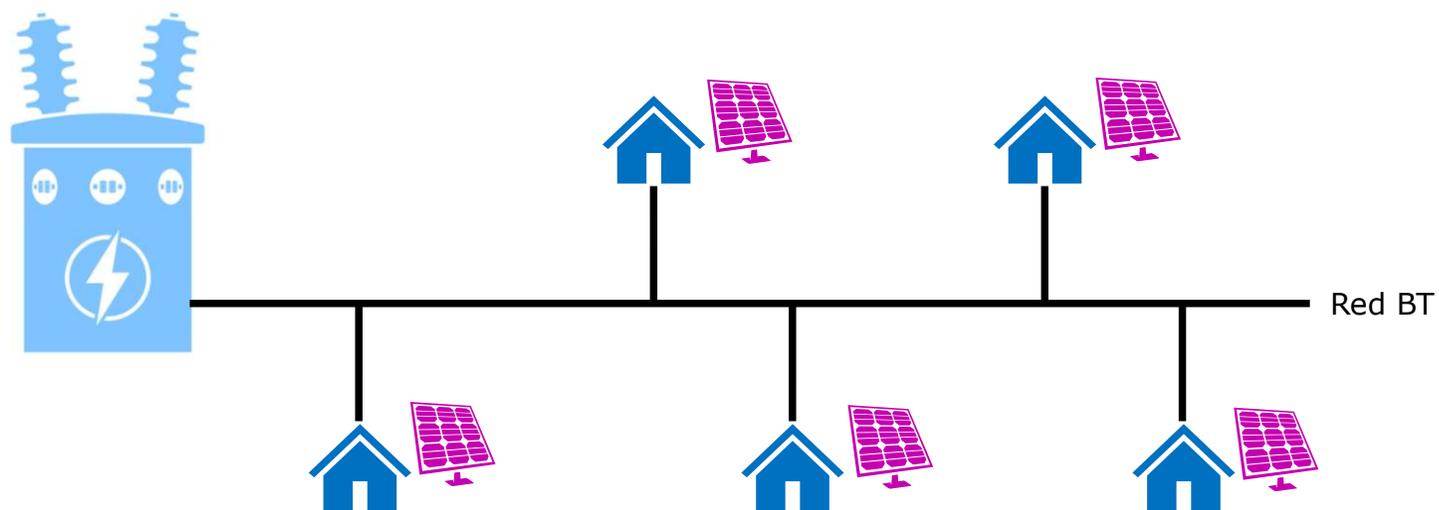


¿O más bien así?

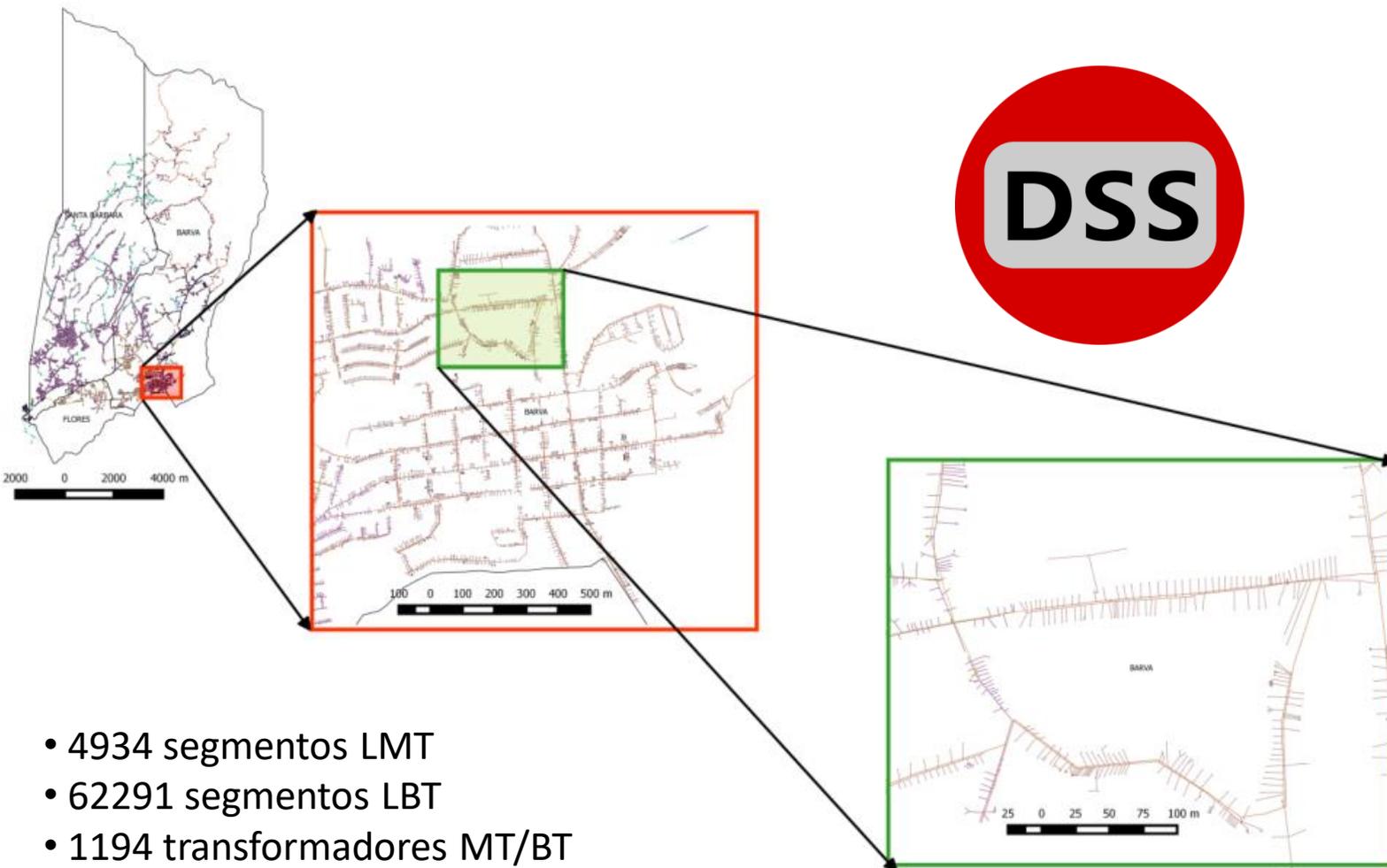
Aumento de la tensión debido a la inyección de potencia activa



Aumento de la tensión debido a la inyección de potencia activa



Los circuitos también son diferentes. La variable del tiempo es importante. La incertidumbre juega su rol. Un cambio de paradigma es necesario.



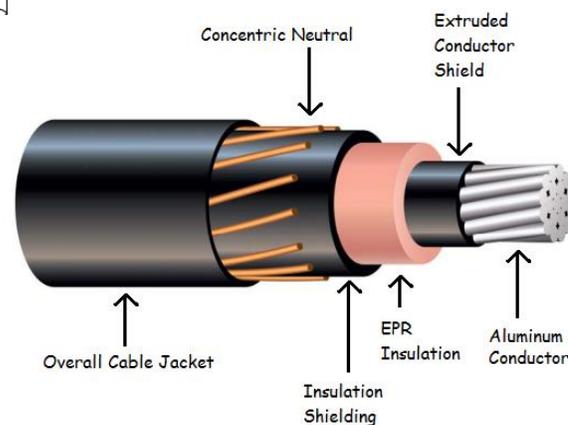
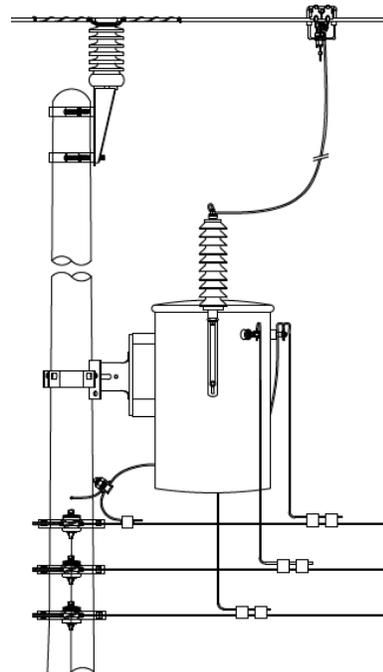
- 4934 segmentos LMT
- 62291 segmentos LBT
- 1194 transformadores MT/BT
- **26395 clientes**

La planificación con nuevas tecnologías implica un cambio de paradigma. Requiere cambiar la forma en que estudiamos la red:

1. Redes balanceadas → **Desbalanceadas**
2. Análisis instantáneo → **Diario con curvas de carga de alta resolución**
3. Análisis determinístico → **Probabilístico**
4. Un solo nivel de tensión → **Integración de BT-MT-AT**
5. Análisis eléctrico → **Multisistémico**

El modelado debe considerar las particularidades de la red

- Líneas de MT y BT
 - Aéreo y subterráneo
- Transformadores
 - Trifásico
 - Monofásico
 - Bancos
- Demanda
 - Estática
 - ZIP
- Equipo de protección
 - Fusibles
 - Seccionadoras
 - Relés
 - Recerradores
- Nuevas tecnologías
 - Fotovoltaico
 - Almacenamiento
 - Vehículos eléctricos



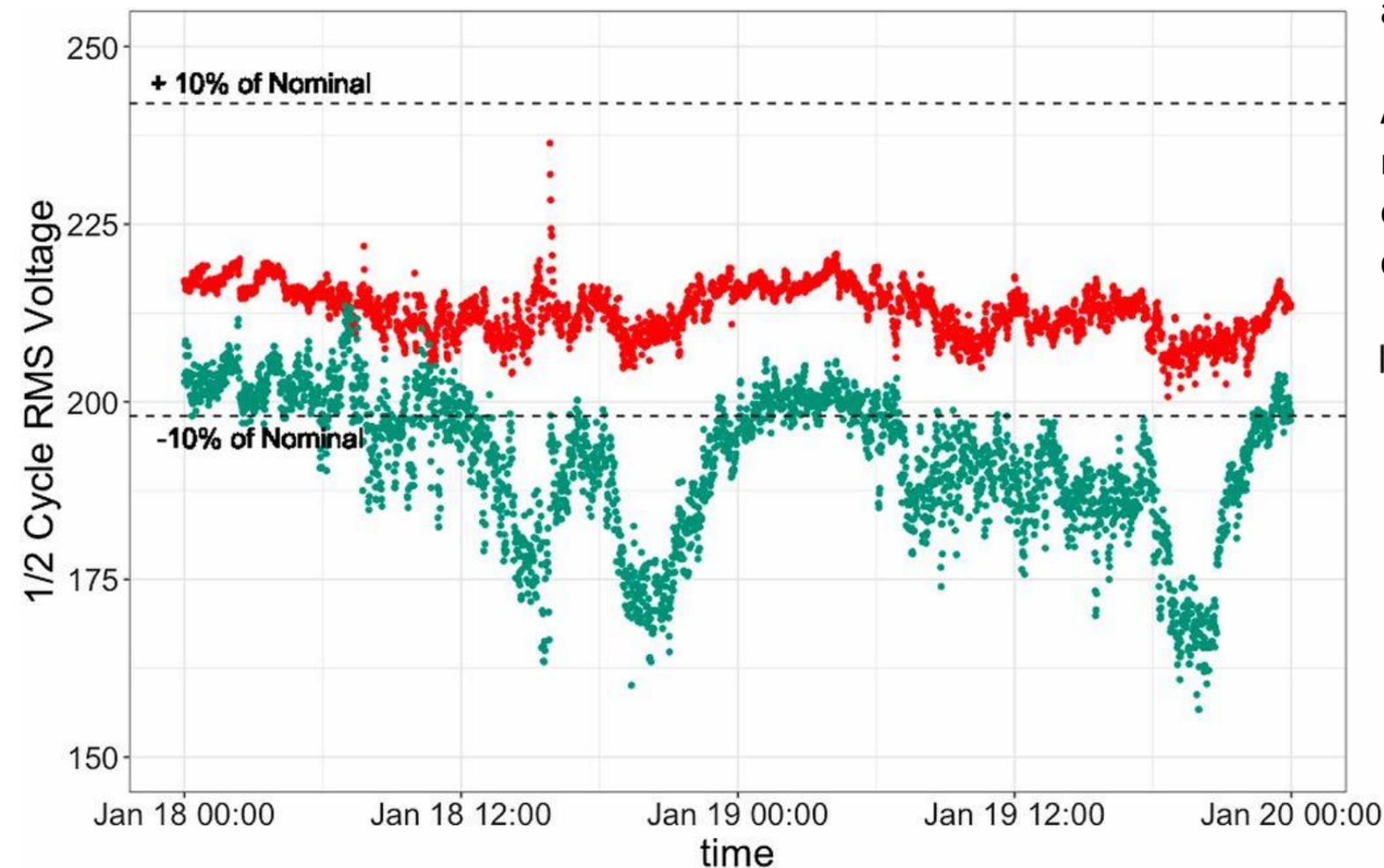
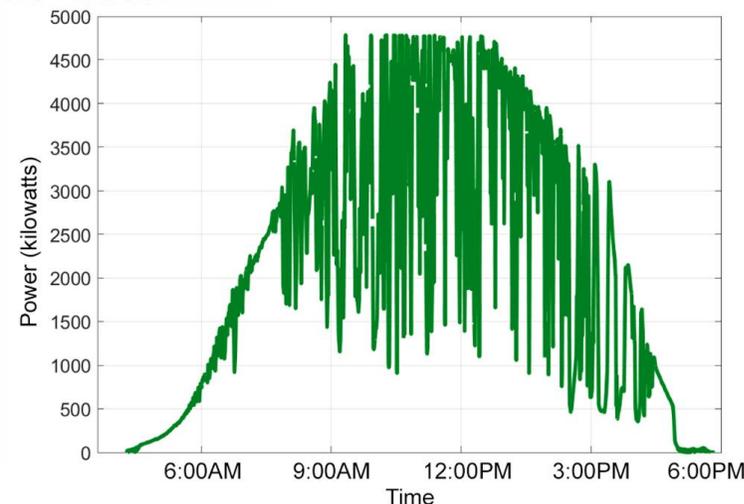
Variaciones en las tensiones de operación por la inyección intermitente de los GDs por las fuentes renovables

La intermitencia de la generación podría causar altas variaciones en la tensión.

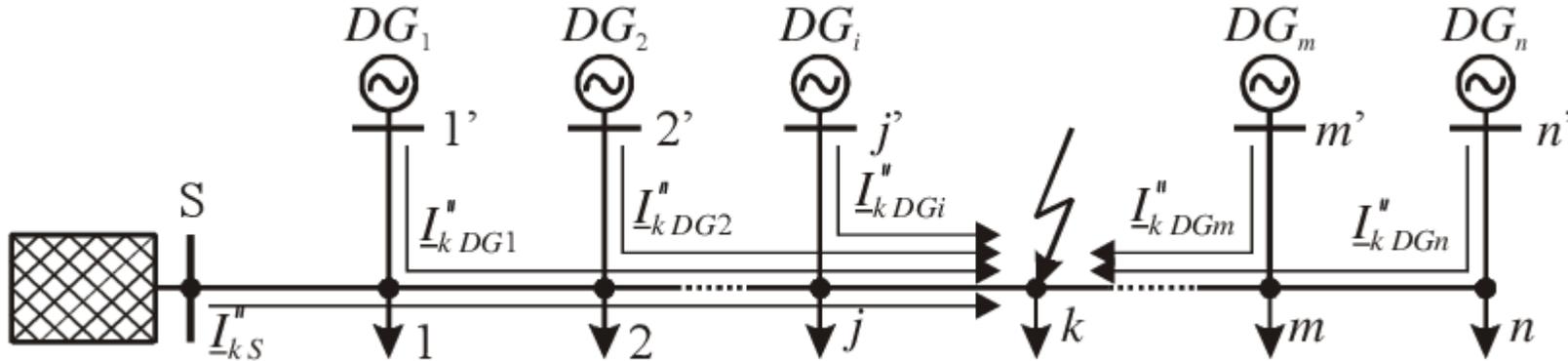
Aunque estas muchas veces se encuentran en rangos aceptables, sus valores pueden disparar el funcionamiento de otros equipos (como los cambiadores de tensión)

location

- beginning of feeder
- end of feeder

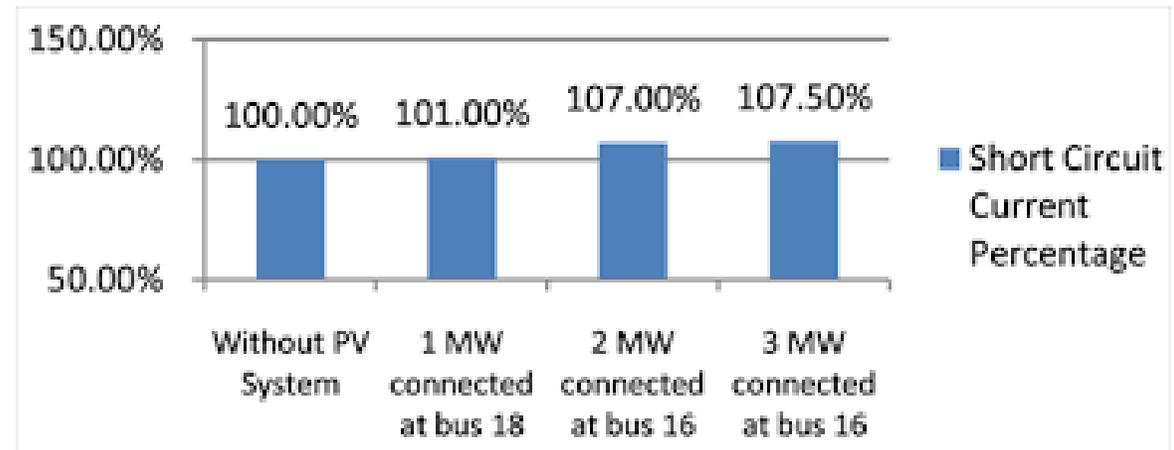


Aumento de las corrientes de cortocircuito según la contribución de los generadores a fallas



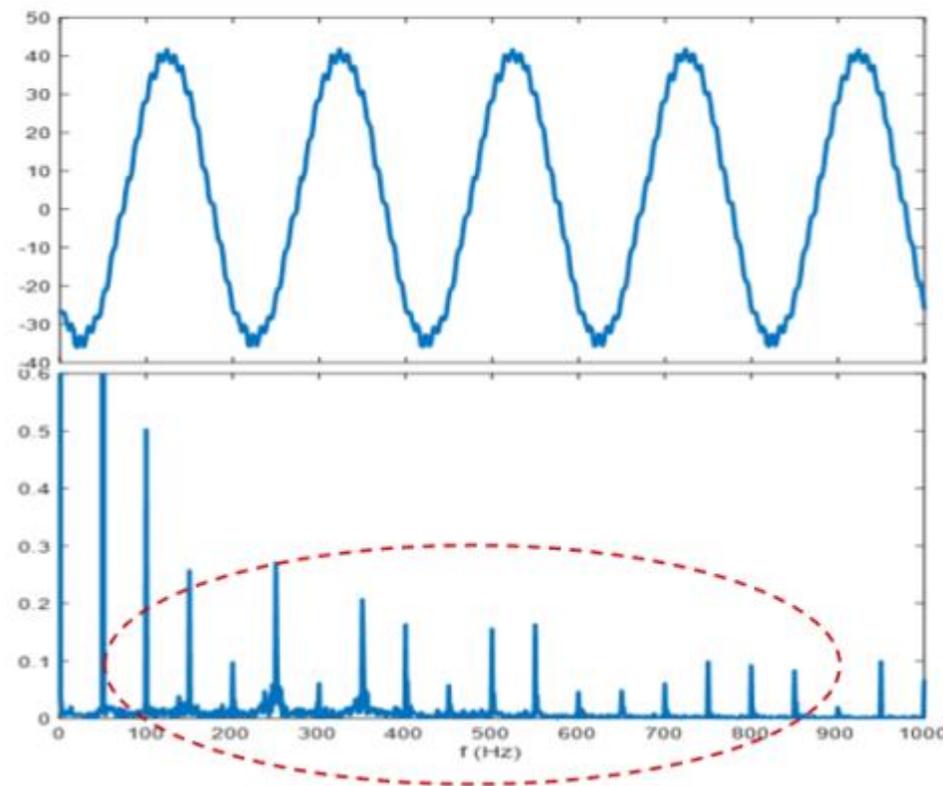
- La generación distribuida contribuye a la corriente de corto circuito.
- La magnitud de la contribución depende de la tecnología.

- Las plantas eólicas tienen una mayor contribución al poseer masa rodante (generador asíncrono o síncrono).
- Las plantas solares se conectan a la red a través de inversores. La tecnología ha avanzado mucho y hoy se consideran inyecciones de corriente de cortocircuito de máximo 1.2 veces el valor nominal.

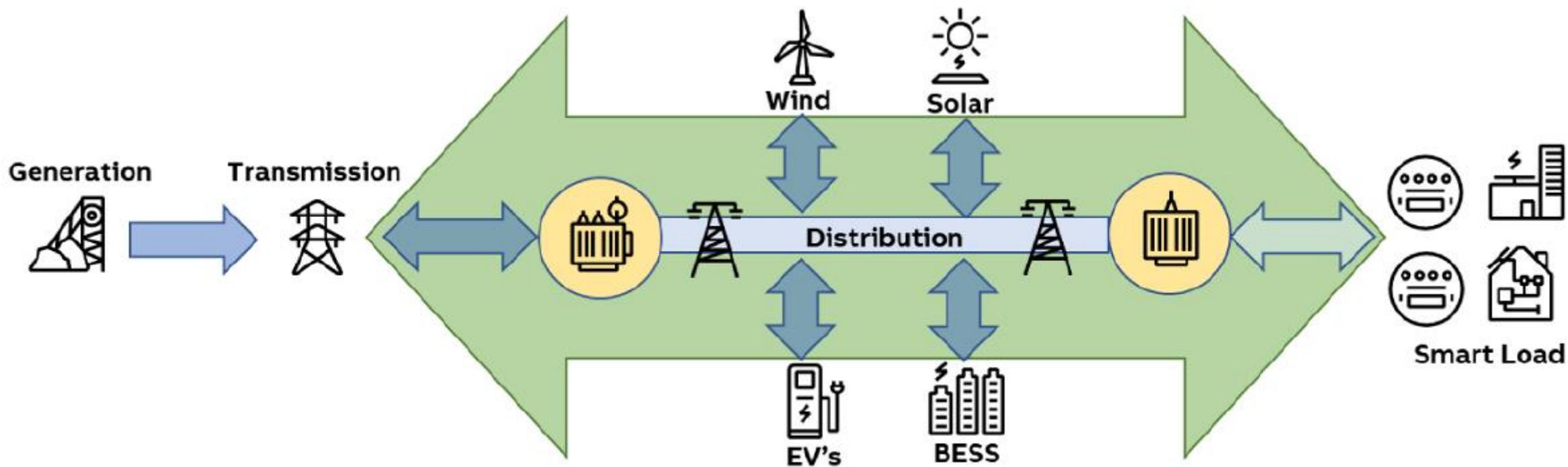


Distorsión de la onda de tensión de los circuitos de distribución por corrientes armónicas

- La generación distribuida fotovoltaica se conecta a la red de distribución a través de inversores
- La electrónica de potencia introduce ondas sinusoidales cuya frecuencia son múltiplos de la fundamental
- El resultado total es una onda principalmente a la frecuencia base más una serie de pequeñas señales



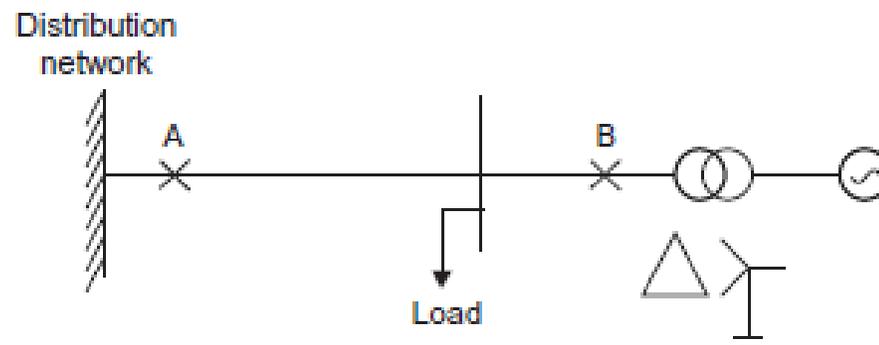
Flujos de potencia inversos



Si la producción local supera la demanda, la red experimentará flujo de potencia inverso

Creación de islas no intencionadas

Ocurren cuando secciones de la red de distribución se aíslan de la red, por accionamiento de las protecciones, y los generadores distribuidos de dichas secciones se mantienen alimentando cargas



La generaci3n distribuida es beneficiosa pero debemos planificar su introducci3n al sistema el3ctrico para maximizar sus beneficios

- Les comparto m1s material para que puedan complementar el aprendizaje:
 - Evento en energ1a solar: <http://www.rider.fing.ucr.ac.cr/index.php/2020-2/>
 - [Solar PV Hosting Capacity Part 1: The Benefits of Traditional Solutions](#)
 - [Solar PV Hosting Capacity Part 2: The Benefits of Non-Traditional Solutions](#)
 - [Aumentando la generaci3n fotovoltaica en las redes de Distribuci3n: El papel de los inversores inteligentes y el almacenamiento](#)

Muchas gracias por su atención

Dr. Jairo Quirós-Tortós
Consultor
jairoquirotortos@ieee.org



