

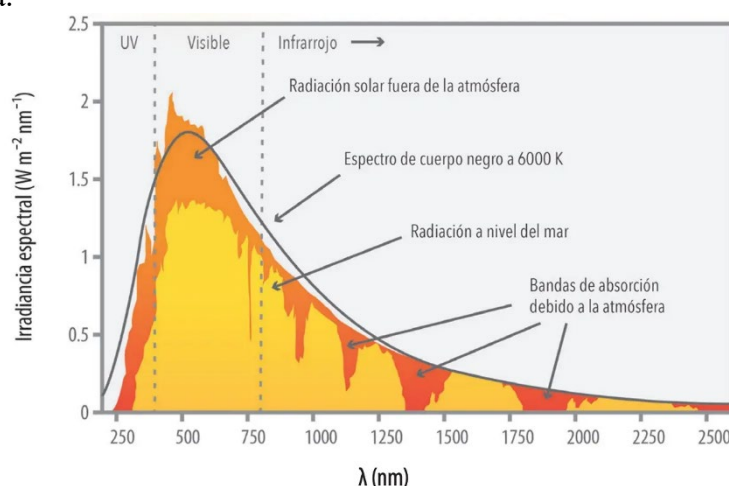
# Introducción a la Energía Solar

*Energía y Medio Ambiente - S.Gil – UNSAM – julio 2024*

## Introducción

El concepto de transición energética (TE) se refiere a la transformación de los combustibles fósiles a recursos energéticos no carbonatados en los próximos lustros. Por lo tanto, suministrar energía a través de Energías Renovables (ER), combinadas con una política de promoción del Uso Racional y Eficiente de la Energía (UREE), pueden ser herramientas muy útiles para mitigar las emisiones de gases efecto de invernadero (GEI) en los próximos años. Las energías renovables se pueden adoptar fácilmente para satisfacer diversos tipos de servicios energéticos, desde generar electricidad, calentar agua, producir calefacción, cocción, etc. mediante tecnologías maduras y accesibles. [1]

El sol, la estrella central de nuestro sistema solar, es la fuente primordial de energía para nuestro planeta. De hecho, el sol es responsable, en última instancia, de casi todas las formas de energía que utilizamos en la Tierra.



**Figura 1.** Irradiación solar total: se trata de aquella radiación que engloba a todas las longitudes de onda. Aquí se muestra la radiación que llega a la tierra, área amarilla. La zona naranja es la radiación absorbida por la atmósfera terrestre. La curva sólida negra es la radiación de un cuerpo negro a 6000K.

El sol también es responsable de la fotosíntesis, un proceso fotoquímico y fotobiológico que produce la biomasa del planeta, como la leña y otras plantas. Esta biomasa sirve de alimento para los animales, por lo que toda la materia orgánica del planeta es un subproducto de la energía solar. Además, los combustibles fósiles se formaron a partir de materia orgánica atrapada en la tierra durante eones. De modo tal, que tanto la biomasa como los combustibles fósiles son subproductos de la energía solar. Desde tiempos antiguos, hemos aprovechado los efectos térmicos del sol. Más recientemente, a mediados del siglo XX, comenzamos a utilizar el efecto fotovoltaico para generar electricidad.

La generación de energía hidráulica, eólica y la producida por las olas también, son todas consecuencia de la energía solar. Por su parte, la energía del sol se origina en los procesos de fusión nuclear que ocurren en su núcleo. El astro rey ha iluminado y calentado nuestro planeta durante más de 4500 millones de años y se espera que continúe haciéndolo por un tiempo similar.

La radiación emitida por el sol tiene un espectro continuo que incluye principalmente radiación visible, además de algo de ultravioleta (UV) e infrarrojo (IR), muy similar a la radiación emitida por un cuerpo negro a una temperatura de unos 6000 K, como se ilustra esquemáticamente en la **Figura 1**.

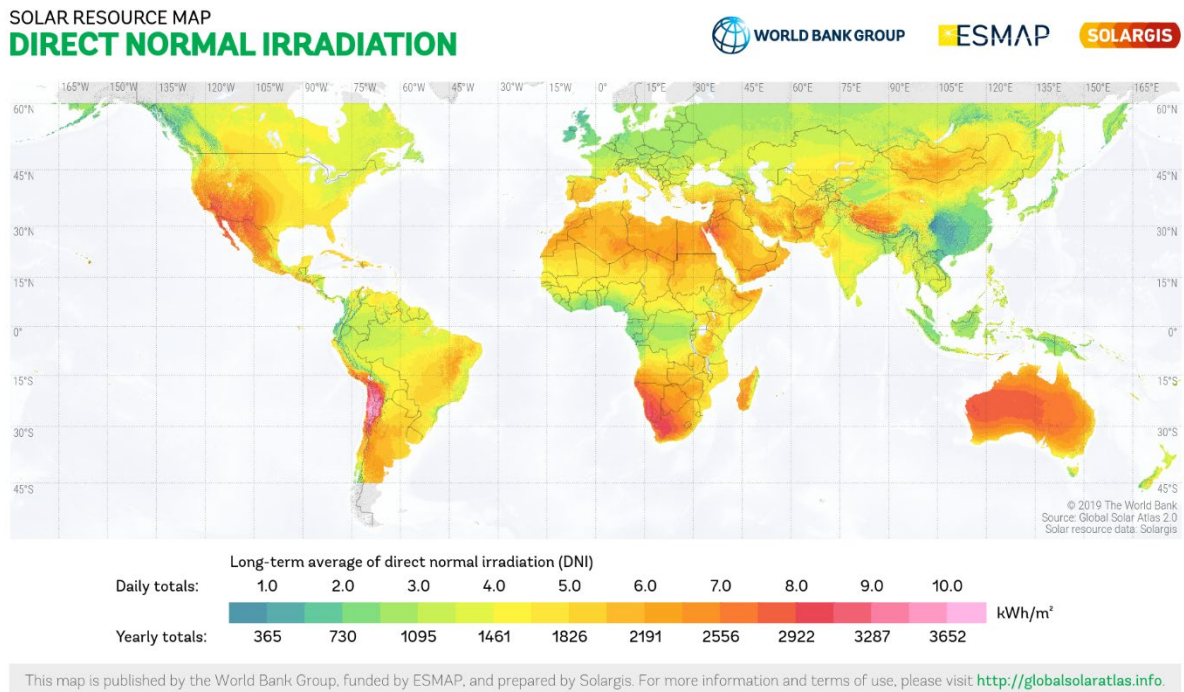
La *intensidad energética* que se recibe del sol en forma de radiación electromagnética se denomina **irradiancia solar** ( $I_{sol}$ ) y se mide en Watts por metro cuadrado ( $W/m^2$ ) en el sistema de unidades SI. También se utiliza el término **irradiación solar** ( $E_{sol}$ ), que es la energía por unidad de área ( $Wh/m^2$ ) generalmente acumulada en algún periodo de tiempo, día, mes o año. La irradiancia se puede medir en el espacio o en la superficie de la Tierra, donde es parcialmente absorbida y dispersada por la atmósfera. En la superficie de la Tierra, la cantidad de irradiancia depende de la inclinación de la superficie de medición, la altura del sol sobre el horizonte y las condiciones atmosféricas. La Figura 2 muestra la irradiancia del sol en la superficie de la Tierra tanto en términos de irradiancia normal directa (DNI) como de irradiancia horizontal global (GHI). Fuera de la atmósfera, la *Irradiancia Solar* normal a la incidencia solar, se denomina la **Constante Solar** y tiene un valor de 1.361 kW/m. [2], [3] Sin embargo, el valor de la radiación solar que llega a la superficie de la tierra, es menor a consecuencia de la atenuación que produce la atmósfera, dejando la irradiancia superficial normal máxima en aproximadamente 1 kW/m<sup>2</sup> al nivel del mar en un día claro, pero desde luego varía notablemente con la dirección de incidencia de la radiación, como se ilustra esquemáticamente en la **Figura 4**. [4].

Un concepto importante para tener en cuenta es la atenuación de la radiación solar en la atmósfera. El coeficiente de *masa de aire* (AM) se utiliza en astronomía y ciencias atmosféricas para medir la cantidad de atmósfera que atraviesa la luz solar antes de llegar a la superficie terrestre. Más específicamente es la atenuación de la radiación al pasar por todo el espesor de la atmósfera, atravesada en línea recta desde el zenit hasta la superficie terrestre a nivel del mar, en un día claro. [5] Este coeficiente se expresa como *AM* (*Air Mass*) seguido de un número que indica la cantidad de atmósfera que la luz ha atravesado comparada con la distancia mínima, cuando el sol está en el cenit. Por ejemplo, “*AM1*” significa que la luz solar ha pasado a través de una atmósfera equivalente a la distancia vertical desde el zenit hasta la superficie de la tierra a nivel del mar. “*AM1.5*” indica que la luz ha viajado a través de 1.5 veces esa cantidad de atmósfera. Este valor es crucial para evaluar la eficiencia de celdas solares y colectores térmicos bajo condiciones estandarizadas.

Muchas veces en las hojas de dato de los paneles solares se especifica: Condiciones Estándar de Prueba “*Standard Test Conditions*” o STC, que significa las condiciones estándar bajo las cuales se ensayaron los módulos fotovoltaicos para determinar sus parámetros eléctricos básicos. STC significan una irradiancia de 1000 W/m<sup>2</sup>, una temperatura de la celda de 25 °C y una masa de aire de 1.5 (AM1.5). Aunque estas condiciones son ideales y no siempre se presentan en el entorno real. Por otro lado, NOCT o “*Nominal Operating Cell Temperature*” representa las condiciones más cercanas a las condiciones operativas reales, con una irradiancia de 800 W/m<sup>2</sup>, una temperatura ambiente de 20 °C, AM1.5 y una velocidad de viento de 1 m/s.

## Radiación Solar

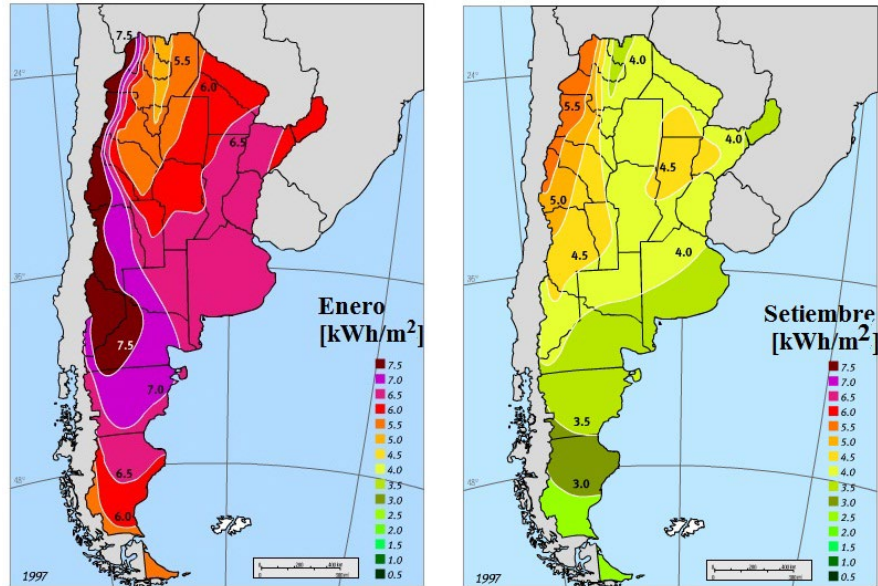
La radiación que proviene del Sol llega a la Tierra en forma de ondas electromagnéticas con todas las longitudes de onda, pero que se concentran principalmente entre 0,2 y 4  $\mu\text{m}$  (ver Figura 1). La irradiancia solar se puede medir en el espacio o en la superficie de la Tierra, después de haber sido parcialmente absorbida y dispersada por la atmósfera. En la superficie terrestre, la cantidad de irradiancia depende de la inclinación del instrumento de medición, la altura del sol sobre el horizonte (hora del día y latitud) y las condiciones atmosféricas. La Figura 2, muestra la irradiancia normal directa (DNI) en la superficie de la Tierra.



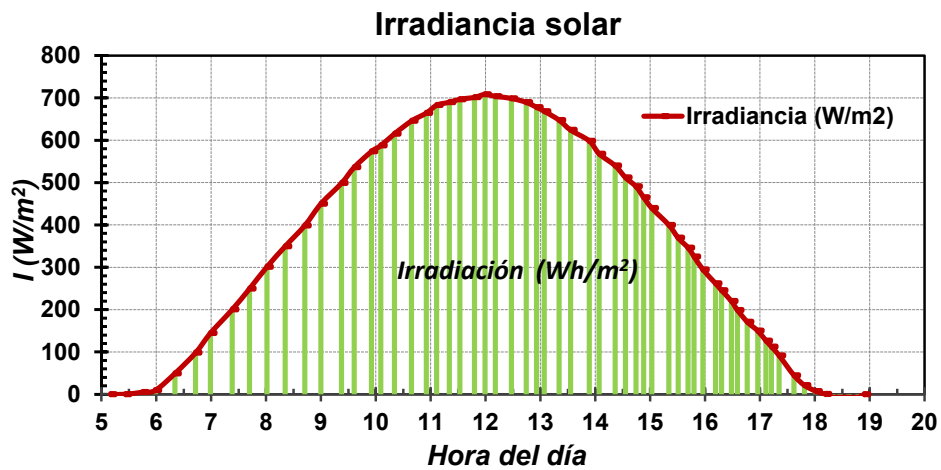
**Figura 2.** El mapa mundial de la irradiancia solar normal directa (DNI) promedio en la superficie de la Tierra. El lugar que más recibe es el desierto de Atacama en Chile, superando los 7 kWh/m<sup>2</sup> por día. [6]

Existen numerosos estudios de la potencialidad de la energía solar en Argentina, en particular, el “Atlas de Energía Solar de la República Argentina”, elaborado por el Grupo de Estudios de la Radiación Solar (GERSolar) de la Universidad Nacional de Luján, es uno de los más completos [7]. En la

se muestra la distribución espacial promedio, de la irradiancia solar diaria sobre un plano horizontal, para dos meses del año.



**Figura 3.** Distribución espacial promedio, de la irradiación solar diaria sobre un plano horizontal, para dos meses del año, enero y septiembre [7]. Enero es representativo de los valores máximos de irradiación y septiembre de los valores medios. En casi todo el territorio argentino, 4 kWh/m<sup>2</sup> es un valor representativo del promedio, aunque en el norte y las zonas andinas, los valores de irradiación son considerablemente mayores. De hecho, la radiación solar en Abra Pampa es de 7.5 kWh/m<sup>2</sup> por día en enero, uno de los valores más altos del mundo, pero esto es un valor común el gran parte de la región andina.



**Figura 4.** Variación diaria media de la irradiancia solar, curva roja, es decir potencia por unidad de superficie, a lo largo de un día de primavera en Málaga. El área verde, corresponde irradiación solar de ese día, en Wh/m<sup>2</sup>.día.

### Usos de la Energía Solar

La utilización de la energía solar se puede dividir en tres categorías principales:

- ✓ **Energía solar térmica:** uso de la energía solar para generar calor. Este calor puede ser utilizado para una variedad de aplicaciones, como calefacción, producción de agua

caliente sanitaria (ACS) y hasta para generar energía eléctrica mediante procesos termomecánicos. Los sistemas de energía solar térmica suelen incluir componentes como colectores solares, circuitos hidráulicos, intercambiadores de calor y sistemas de acumulación para almacenar el calor generado.

- ✓ **Energía solar pasiva:** se refiere al aprovechamiento de la energía solar sin el uso de dispositivos mecánicos o eléctricos. En lugar de convertir la luz solar en electricidad o calor a través de sistemas activos, la energía solar pasiva utiliza el diseño y la arquitectura de los edificios para maximizar la captación, almacenamiento y distribución del calor solar de manera natural. Por ejemplo, a través de un diseño adecuado y su orientación.
- ✓ **Energía solar Fotovoltaica:** es la generación de electricidad a través del efecto fotovoltaico. [8]

Todos estos sistemas son fundamentales para un futuro sostenible, ya que aprovechan la abundante energía del sol para reducir nuestra dependencia de los combustibles fósiles y disminuir el impacto ambiental de nuestras necesidades energéticas.

En 2015, la comunidad internacional estableció los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) como parte de la Agenda 2030 de las Naciones Unidas para el Desarrollo Sostenible. Estos objetivos incluyen compromisos para erradicar la pobreza, el hambre y otros desafíos globales. Entre estos objetivos, algunos, como el suministro de agua limpia, la energía asequible y limpia, y la protección del clima, están directamente relacionados con la energía. El séptimo objetivo (ODS 7) busca proporcionar servicios de energía limpia, asequible y moderna en todo el mundo y aumentar la proporción de energía renovable en la mezcla energética para 2030.

**Playas de estacionamiento  
solares**



**Generación FV comunitaria**



**Generación residencial  
distribuida**



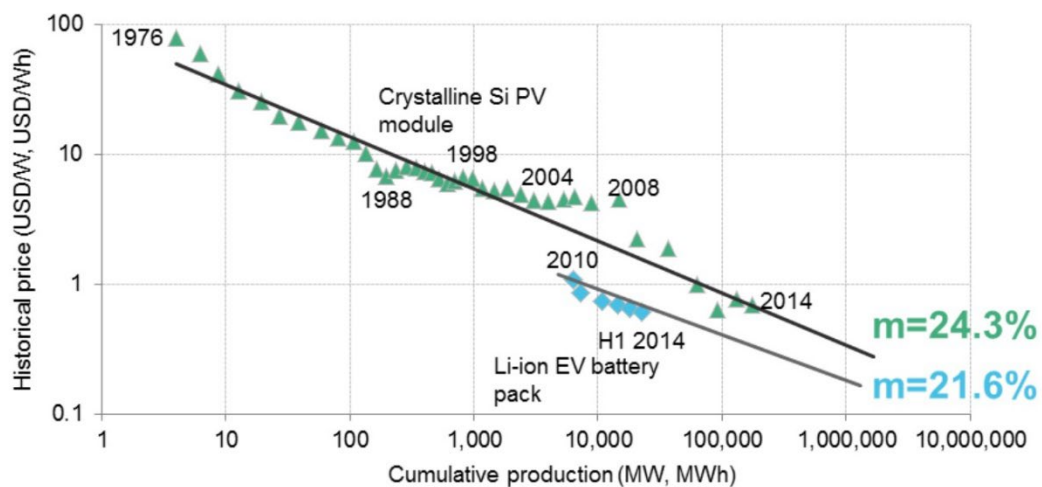
**Figura 5.** Diversos usos de la energía solar: izquierda, estacionamiento solar, además de proveer sombra, se genera electricidad. Centro: sistemas de generación eléctrica comunitaria. Derecha: generación eléctrica doméstica conectada a la red o generación residencial distribuida.

La energía solar fotovoltaica (FV) utiliza sistemas que convierten la luz solar en electricidad. [8] Estos sistemas, compuestos por módulos fotovoltaicos, captan la radiación solar y la transforman directamente en corriente eléctrica gracias a las celdas fotovoltaicas que se activan con la luz. Este tipo de energía ha ganado popularidad recientemente, especialmente con el desarrollo de grandes parques solares, comunidades solares y sistemas de autoconsumo viviendas y pymes que promueven un consumo energético más sustentable. Ver **Figura 5**.

Durante los años 60, la energía solar se utilizaba principalmente en satélites. Sin embargo, con el tiempo, los precios de los módulos solares comenzaron a disminuir. En la década de 1970,

surgieron las primeras aplicaciones terrestres que se realizaron en lugares remotos, como faros y cruces ferroviarios, donde la conexión a la red eléctrica era costosa. Desde 1976 hasta 2019, el precio de los módulos solares cayó de 106 USD/Wp a 0,38 USD/Wp (corregidos por inflación), o sea una disminución del 99,6% en 43 años. Esta alta tasa de aprendizaje ha permitido que la tecnología solar se despliegue más ampliamente en el mundo y sea más asequible.

El uso racional y eficiente de la energía (UREE) y el aprovechamiento de energías renovables (ER), especialmente la solar, son esenciales para enfrentar los desafíos energéticos actuales y futuros. Esta tendencia global muestra que UREE y ER se complementan, mejorando la gestión energética y reduciendo costos de transmisión y distribución, gracias a la generación de energía “in situ”. El UREE busca una mejor gestión de la energía y los recursos, reduciendo desigualdades, protegiendo el medio ambiente y aumentando la competitividad de las empresas.



Note: Prices are in real (2014) USD.

Source: Bloomberg New Energy Finance, Maycock, Battery University, MIT

**Figura 6.** Ley de Swanson o *curva de aprendizaje*, aplicada a las celdas solares FV de Silicio (triángulos verdes) y las baterías de litio para automóviles eléctricos o EV (rombos celestes). En este análisis el precio de las celdas PV cae un 24.3% cada vez que se duplica la producción acumulada, y del 21.6% de reducción cada duplicación de producción de baterías de litio. Fuente: Bloomberg, Michael Liebreich, N.Y. 14 April 2015.

Así, a medida que disminuye la demanda energética, las fuentes renovables adquieren mayor relevancia, ya que el tamaño de las instalaciones de ER y sus costos se reducen; aumentando a su vez la demanda, que disminuyen aún más sus costos. Creando así un ciclo virtuoso que reduce emisiones de GEI y promueve el desarrollo tecnológico y económico, Mejorando al mismo tiempo la inclusión social y energética. La **Figura 6** ilustra este efecto, conocido como Ley de Swanson, [9] esta ley empírica, descubierta por *Richard Swanson* de *Sun Power Co.* describe como el precio de una dada tecnología desciende a medida que se extiende su uso. Más específicamente, se descubrió observando como el precio de los módulos solares fotovoltaicos tendía a caer a medida que se incrementaba el parque instalado. Se observó una reducción de aproximadamente un 20% cada vez que se duplicaba el volumen acumulado instalado. Para 2022, los costos bajaban a la mitad cada 14 años. Lo interesante de esta ley, es que vale para un número muy grande de tecnologías, como se ve en la **Figura 6** que se aplica también para el caso de las batería de litio. Pero su aplicación es muy amplia y general.

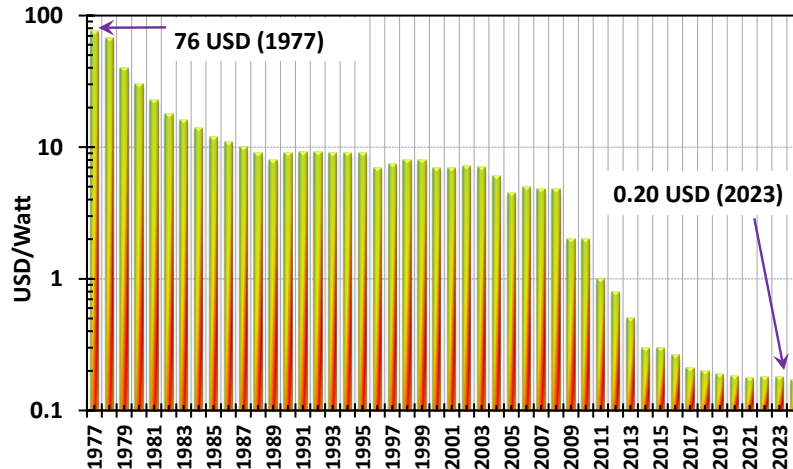


Figura 7. Evolución de los costos por watt de módulos de silicio policristalino.

Por otro lado, la *energía solar térmica* emplea colectores para convertir la radiación solar en calor, utilizado principalmente para calentar agua sanitaria (ACS) en aplicaciones residenciales, industriales o como apoyo a sistemas de calefacción, ver **Figura 8**. Además, la *Energía Solar Concentrada* (CSP) utiliza lentes o espejos para focalizar la luz solar y generar electricidad a través del calor, que produce vapor para mover turbinas generadoras, ver **Figura 9**.



**Figura 8.** Cuatro colectores solares que se utilizan para calentar agua sanitaria. Como se aprecia estos cuatro sistemas son de dos tecnologías diferentes: placa plana con cubierta (segundo de la izquierda) y tubos de vacío el resto. [10]

Si consideramos un panel solar plano, orientado óptimamente en cada latitud, es posible obtener una radiación media en Argentina de unos  $4,5 \text{ kWh/m}^2$ . Este valor es una media para toda la región centro-norte del país, donde se concentra más del 90% de la población. Con un colector solar de  $2.5 \text{ m}^2$  de área, la energía solar que llegaría a este panel sería unos  $11 \text{ kWh/día}$ , equivalente a un poco más de  $2 \text{ m}^3$  de gas natural. En otras palabras, ***en solo  $2.5 \text{ m}^2$ , el Sol aporta casi el doble que el requerido para calentar toda el agua sanitaria que usa una familia tipo en Argentina.*** Aun con una eficiencia del orden del 70%, una importante fracción de este consumo doméstico se podría lograr con esta tecnología. Es importante destacar que, para este servicio, en general es necesario disponer de un *sistema híbrido*, es decir (Sol-gas o Sol-electricidad). Dada la intermitencia de la energía solar, para abastecer de ACS una vivienda en los periodos nublados y épocas invernales, se

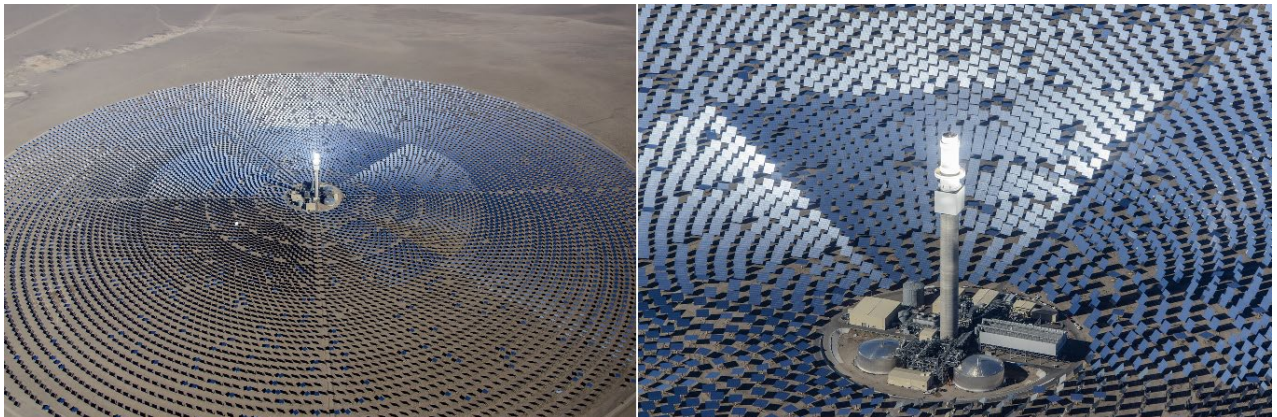
requiere de un respaldo convencional (gas o eléctrico) para satisfacer todo el año la demanda de ACS.

En cuanto a los colectores o captadores solares para este fin, hay varias tecnologías:

- ✓ *Colectores Solares Planos* con cubierta y
- ✓ *tubos de vacío*, ver Figura 8.

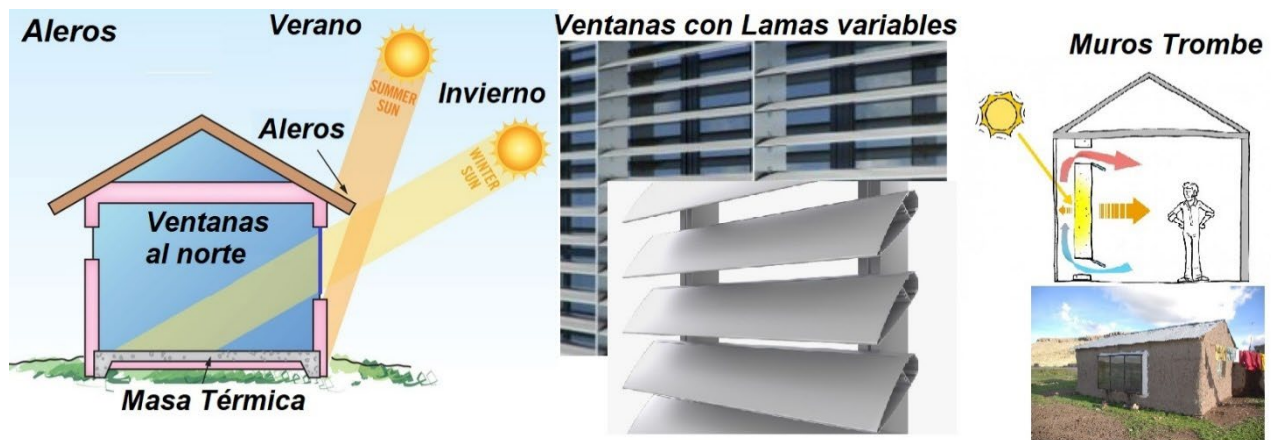
Asimismo, los sistemas de calentamiento de agua pueden ser:

- ✓ *Sistemas de calentamiento de agua directa*, es decir el agua que se consume circula por el captador solar y luego el agua caliente se acumula en un tanque aislado térmicamente para su uso posterior.
- ✓ *Sistema indirecto de calentamiento*, es decir calientan el agua del tanque a través de un líquido caloportador. En general, estos sistemas, si bien son algo más costoso que el primero, tiene varias ventajas: a) no hay riesgo de *congelamiento* del agua en los periodos invernales, b) en lugares con aguas duras, no hay riesgo de *acumulación de sarro* el los tanque de almacenamiento de agua ni en el sistema en general.



**Figura 9.** Vista de la central solar térmica concentrada de 'Crescent Dunes', en Nevada, EE.UU. consistía en la instalación de 10.347 espejos (heliostatos) que forman una espiral de más de tres kilómetros de ancho en torno a una torre en medio del desierto. Con cada espejo se buscaba recoger la luz solar para concentrar energía térmica en dicha torre de casi 200 metros de altura, esto con el objetivo de calentar sal fundida que circula desde la torre hasta un tanque de almacenamiento, donde se utiliza para producir vapor y generar electricidad de día y noche. Sin embargo, este proyecto encontró muchas dificultades.

Finalmente, la **energía solar pasiva** se beneficia del sol sin una transformación energética, integrándola directamente en el diseño de edificaciones para calefacción y aprovechamiento de la luz natural. Es una componente clave del ecodiseño y la arquitectura bioclimática. [11] Algunas de sus ventajas son: reduce el costo de los servicios energéticos, la tecnología es simple, segura y muy económica en el momento del diseños y construcción de una vivienda, requieren poco mantenimiento. Algunos ejemplos se ilustran el la **Figura 10**.

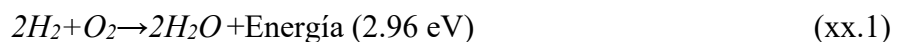


**Figura 10.** Algunos ejemplos de sistemas solares pasivos: izquierda, uso de aleros solares en ventanas orientadas al norte. Permiten el ingreso de la radiación en invierno y la bloquean en verano. Centro, uso de lamas variables en ventanas, que permiten la visibilidad e ingreso de luz, pero pueden bloquear la radiación directa en periodos estivales. Derecha: *muros Trombe* [12] para calefaccionar una vivienda usando la radiación solar.

## Origen de la Energía Solar

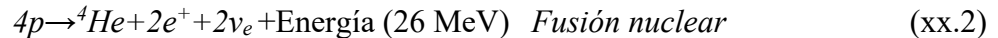
La luz y el calor que irradia el sol se denominan energía solar y es quizás una de las fuentes más importantes de energía en nuestro planeta. Comprender la física del Sol es crucial para entender su evolución y la de las estrellas. Desde la antigüedad, la naturaleza del Sol y su brillo fueron objeto de especulación. Anaxágoras (500-428 a.C.) sugirió que el Sol era una piedra incandescente, y Galileo descubrió las manchas solares, desafiando la idea del fuego perfecto. Giordano Bruno fue quemado por proponer que las estrellas eran soles.

En el siglo XIX, los físicos pensaban que la energía del Sol era gravitatoria, similar a cómo una piedra al caer transforma energía potencial en cinética. Kelvin y Helmholtz apoyaban esta teoría, pero su funcionamiento sería de solo unos 30 millones de años, inconsistente con la edad del Sol. La teoría química, como la combustión de hidrógeno, también fallaba, ya que solo daría una vida útil de 1500 años y requeriría grandes cantidades de oxígeno, que no se observan en el Sol. Con lo que la posible reacción química, Ec.(xx.1), como responsable de la generación de energía en el sol, queda descartada.



En 1905, Einstein propuso la relación  $E=mc^2$ , mostrando que pequeñas masas pueden convertirse en grandes cantidades de energía. Formar helio a partir de hidrógeno libera mucha energía debido a la pérdida de masa. Sir Arthur Eddington, en los años 1920, propuso un origen nuclear para la generación de energía en el Sol, pero modelos detallados no surgieron hasta los años 50. Estos modelos sugieren que, en el interior del Sol, una serie de reacciones nucleares fusionan núcleos de hidrógeno para formar helio, liberando energía y neutrinos. Así, se llegó a la hipótesis que las reacciones nucleares, mucho más energéticas que las químicas, serían las responsables de la energía solar. [13]

La reacción principal de generación de energía es la cadena  $p-p$ , ( $p$ = protón, núcleo de H) y se representa como:



Esta reacción de fusión nuclear, no debe de confundirse con el de la fisión nuclear, por ejemplo, la del  ${}^{235}\text{U}$ :



Como se ve, las reacciones nucleares (fusión y fisión) generan grandes cantidades de energía, de orden de los Mev, ( $1 \text{ Mev} = 10^6 \text{ ev}$ ). Si comparamos estas reacciones nucleares con una química, Ec.(xx.1), vemos que las reacciones nucleares son del orden de un millón de veces más energéticas que cualquier reacción química.

Este proceso de fusión no solo produce energía en forma de calor y luz, sino también un número definido de neutrinos electrónicos ( $\nu_e$ ), positrones ( $e^+$ ), y núcleos de He (partículas alfa). Así que para poner a prueba la hipótesis de la fusión nuclear en el Sol, Ec(xx.2), tendríamos que detectar estos neutrinos producidos en el Sol en la Tierra, para así validar este modelo solar. Los experimentos necesarios para detectar neutrinos solares, comenzaron en los años 60. Pero los resultados experimentales preliminares de los flujos de neutrinos sólo daban cuenta de 1/3 de lo esperado. Es así, que la hipótesis de Arthur Eddington, que era la fusión nuclear la que generaba la energía del Sol y las estrellas, enfrentó serias dificultades. La cantidad de neutrinos detectados era mucho menor que la predicha por el modelo, lo que planteaba dudas sobre su validez.

Durante más de treinta años, los científicos intentaron resolver el enigma de los neutrinos solares. Finalmente, el misterio se resolvió y los pioneros en estas investigaciones recibieron el premio Nobel de Física en 2002, [14] confirmando que es la *fusión nuclear* la que genera la energía tanto del Sol, como el de las estrellas. Al mismo tiempo que se genera en su centro He o partículas  $\alpha$ . Esta es la razón, porque en el Sol, se observan los espectros de H y He. De hecho, el He fue descubierto primero en el Sol (de ahí su nombre) y luego en la Tierra. [14], [13]

### **Evolución de las celdas solares fotovoltaicas (FV)**

La historia de la energía fotovoltaica se remonta al siglo XIX, cuando en 1839, Alexandre Becquerel observó el efecto fotovoltaico (EFV). [8] La primera celda solar con una eficiencia menor del 1% se probó en 1883. En las dos primeras décadas del siglo XX, Albert Einstein publicó su artículo sobre el efecto fotoeléctrico, que le valió el Premio Nobel en 1921. En 1931 se desarrolló el primer semiconductor puro y, en la década de 1950, se usaron celdas solares para aplicaciones espaciales. En 1957 se desarrollaron celdas solares con alrededor del 8% de eficiencia, récord que fue superado por Hoffman Electronics con un 14% en 1960. La primera celda fotovoltaica de silicio amorfo se desarrolló poco después y la capacidad instalada fotovoltaica global alcanzó los 21,3 MW en 1983. En 2002, se instaló una planta fotovoltaica de alta concentración de 175 kW en Arizona, EE.UU. En 2006, la tecnología fotovoltaica alcanzó un 40% de eficiencia en celdas especiales, ver **Figura 11**. En 2012, la capacidad fotovoltaica global llegó a 100 GW, reduciendo significativamente los costos de fabricación.

La mayoría de los paneles solares actuales están hechos de silicio, que se usa de diversos modos con diferentes eficiencias y costos: desde formas amorfas (no cristalinas) hasta policristalinas y monocristalinas. Si bien se lograron eficiencias tan altas como el 48%, la mayoría de las celdas de Si que se usan en la industria tiene eficiencias del orden del 20% al 25%, ver **Figura 11**. A diferencia de las baterías o pilas de combustible, las celdas solares no usan reacciones químicas ni requieren combustible, y a diferencia de los generadores eléctricos, no tienen partes móviles.

El silicio es el octavo elemento más común en el universo y el segundo más abundante en la corteza terrestre (28% en masa), aunque raramente se encuentra en su forma pura. Se presenta principalmente como dióxido de silicio o silicatos, que constituyen más del 90% de la corteza terrestre. De hecho, la arena común, conocida también como arena de construcción, contiene principalmente dióxido de silicio ( $\text{SiO}_2$ ), aunque también puede incluir pequeñas partículas de silicatos y otros minerales.

**Eficiencia y costos de paneles solares:** Las celdas FV de más alta eficiencia, alcanzan valores de alrededor del 45%, pero estos paneles son muy costosos y adecuados solo para áreas limitadas como satélites. En general, los paneles de Si con eficiencias menores, alrededor del 20% a 22%, son más asequibles y están disponibles en *Hardware Stores* de todo el mundo. Si bien una alta eficiencia es una ventaja, los más económicos suplen la menor eficiencia con mayor área.

Los tejados son lugares ideales para instalar paneles solares porque aprovechan el espacio no utilizado y están en altura, lejos de obstrucciones como árboles. Los paneles en tejados pueden satisfacer gran parte de la demanda de electricidad doméstica, aunque se requiere almacenamiento de energía para uso nocturno o bien estar integrados a la red, como sistema de generación distribuida.

Asimismo, los paneles solares se están integrando cada vez más en áreas urbanas, incluyendo ventanas, balcones, playas de estacionamiento, paradas de autobuses, depósito e instalaciones industriales, etc. Una nueva tecnología prometedora es el concentrador fotovoltaico, que utiliza lentes o espejos para enfocar la luz solar en pequeñas áreas de células fotovoltaicas altamente eficientes. Estas células funcionan mejor a altas temperaturas, pero requieren sistemas de seguimiento y enfriamiento para mantener su eficiencia. Otras alternativas son los sistemas fotovoltaicos híbridos térmicos, que son los más eficientes en términos de energía total, ya que generan electricidad y capturan el calor residual del enfriamiento de las células solares, el agua que refrigera, se calienta y puede ser usada para otro fin, por ejemplo, ACS.

Las celdas solares se clasifican en cuatro tipos principales:

- ✓ **Monocristalinas:** Hechas de silicio puro, son las más eficientes y se reconocen por su color negro oscuro.
- ✓ **Policristalinas:** Desarrolladas en la industria desde los años 1980, son menos eficientes que las monocristalinas. Tienen un color azul celeste característico.
- ✓ **Amorfas:** No tienen estructura cristalina y se usan para aplicaciones a pequeña escala.
- ✓ **De película delgada:** Consisten en varias capas delgadas de material fotovoltaico superpuestas.
- ✓ **Muchas otras variantes modernas.**

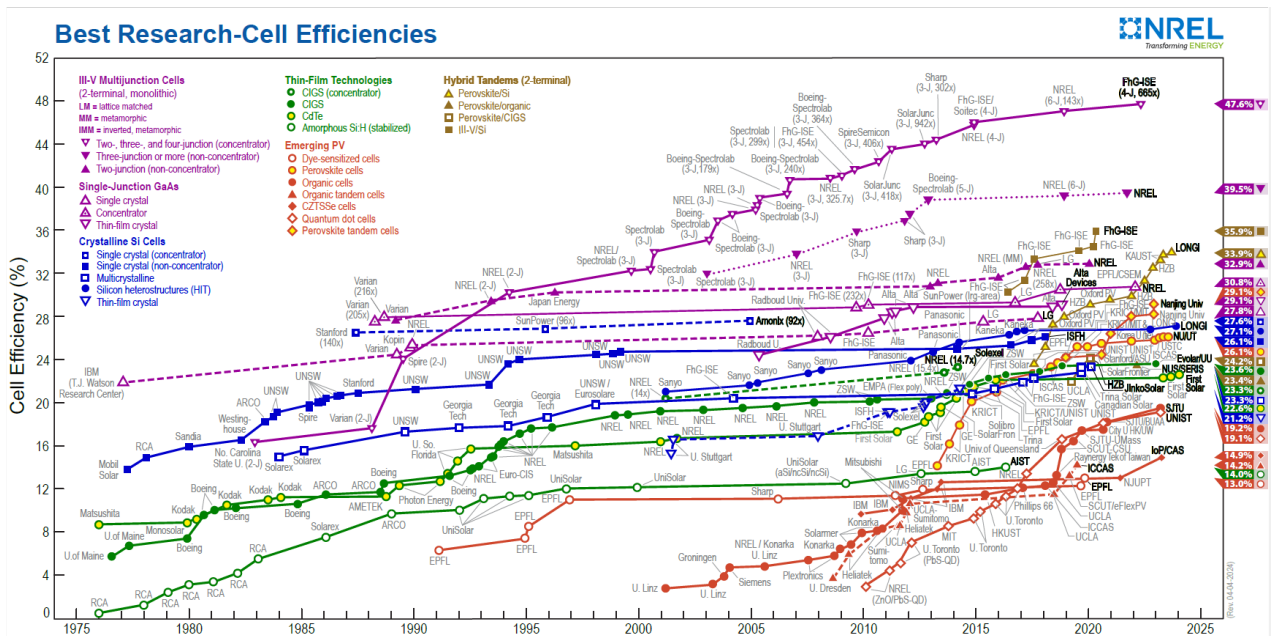


Figura 11. Evolución de las eficiencias de las celdas solares a lo largo del tiempo. [15] Celdas de Si en azul.

La *eficiencia* es el parámetro clave para comparar celdas solares y se define como la relación entre la energía eléctrica producida por la celda y la energía de recibida del sol. Esta eficiencia depende del espectro, la intensidad de la luz solar y la temperatura de la celda, y se mide en condiciones controladas para asegurar comparaciones precisas. Las celdas solares terrestres se miden bajo condiciones STC (AM1.5 a 25°C), mientras que las Celdas para uso espacial se miden bajo condiciones AM0. [15] En la **Figura 11**, se muestra la evolución temporal de la eficacia de las celdas solares en el tiempo y con los cambios tecnológicos.

La eficiencia de una celda FV se define como la proporción de la energía (o potencia (W)) de la luz solar que incide sobre la celda y que se convierte en electricidad (potencia eléctrica) utilizable en determinadas condiciones, por ejemplo: STC o NOCT .

$$\varepsilon_{FV} = \text{Eficiencia} = \frac{P_{electr}}{I_{sol}} , \quad (XX.4)$$

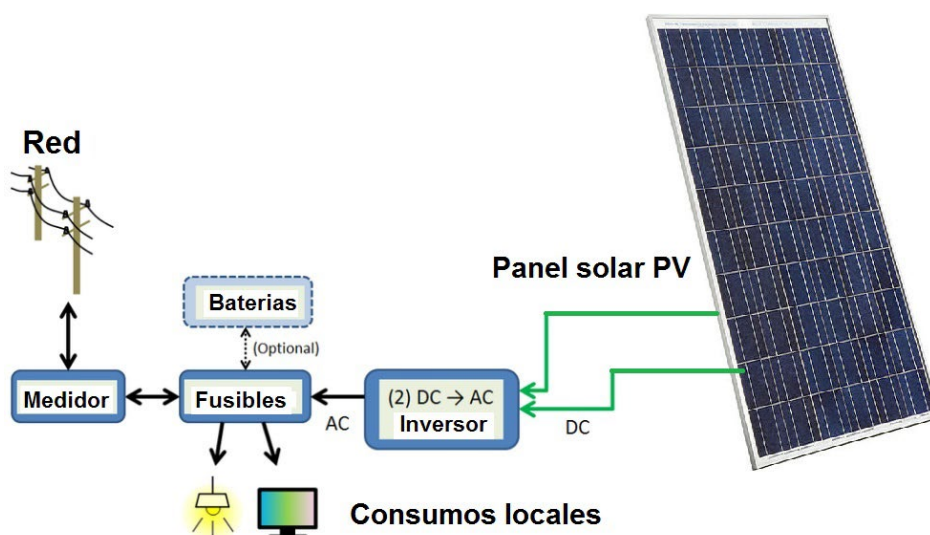
donde  $I_{sol}$  es la *irradiancia solar* expresada en (W).

### Sistemas Solares Fotovoltaicos

Las celdas solares se agrupan en paneles solares, ver **Figura 12**, que actúan como centrales eléctricas que convierten la luz solar en energía eléctrica para usos industriales, comerciales y residenciales. En menor escala, estos paneles, conocidos como módulos solares, se instalan en techos de viviendas para reemplazar el suministro eléctrico convencional y se utilizan en áreas remotas donde otras fuentes de energía son inaccesibles o muy caras. Las celdas solares también alimentan instalaciones espaciales, como satélites y estaciones espaciales, debido a su durabilidad y baja necesidad de mantenimiento.



**Figura 12.** Panel Solar 300W Monocristalino. Los tamaños típicos de estos paneles son de 1.13m x1.72m (1.94 m<sup>2</sup>) con pesos del orden de 20 kg. Su eficiencia es típicamente de unos 20% al 25%. Su precio varía constantemente, pero para un usuario residencial es del orden de unos 200USD a 300USD en 2023.



**Figura 13.** Diagrama esquemático de un sistema fotovoltaico conectado a red. Las normas internacionales y las recientemente promulgadas por IRAM poseen controles redundantes que garantizan la seguridad de la conexión y la adaptación a la red. Los componentes principales son: el panel solar fotovoltaico (PV) que genera electricidad continua (DC) (2) el *inversor* DC a AC que convierte la energía eléctrica generada a modo alterno (AC). El sistema de fusibles y derivación ya sea a consumos locales o que se entrega a través del medidor a la red.

Es importante destacar, que las celdas solares FV producen una corriente continua (DC). Un panel como el de la **Figura 12**, genera una tensión de entre 30 V a 38V con corrientes del orden de unos 13 A. Esta corriente DC se puede usar para cargar baterías. Sin embargo, para muchas aplicaciones domésticas e industriales, necesitamos corrientes alternas (AC). Es así, que los sistemas solares FV deben de combinarse con equipos que convierten la corriente DC en AC, estos dispositivos se denominan comúnmente *inversor* o *Inverters*. Ver **Figura 17**. Una vez convertida en AC, esta energía eléctrica se puede integrar a las redes de distribución urbanas.



**Figura 14.** Vista del parque solar Cauchari es una planta de energía solar fotovoltaica más grande de América, de 300 MW, ubicada en el departamento de Susques, provincia de Jujuy, Argentina. [16]

Además, las celdas solares se usan en productos de consumo como juguetes electrónicos, calculadoras y radios. Las plantas solares fotovoltaicas de gran escala convierten la energía del sol en electricidad mediante módulos fotovoltaicos, ver **Figura 12**. Los módulos o paneles solares se agrupan en grandes parques, que en conjunto actúan como centrales eléctricas para convertir la radiación solar en energía eléctrica. Ver **Figura 14**.

Entre las grandes ventajas de la energía solar FV está el hecho que es modular, siendo los módulos similares tanto para una vivienda que para una central eléctrica. Esto hace que se pueden instalar en forma escalonada, dependiendo de las necesidades y posibilidades. Se puede instalar en espacios libres, como techos, aparcamientos, desiertos, etc. El hecho que no tenga partes móviles hace que su mantenimiento sea bajo y silencioso. Además, al ser un mismo prototipo que se usa en múltiples aplicaciones, hace que la producción se haga en gran escala, reduciendo los costos para todos.

## **Cálculo aproximado de la energía producida por un panel FV**

El cálculo detallado de la energía producida por un panel solar es en general un procedimiento delicado y que requiere considerar muchos factores, además de la radiación del lugar, tipo y tamaño de los paneles solares FV; como ángulos de orientación de los paneles respecto a la trayectoria del sol. Tipo de soporte de los paneles: fijos o variables (sistemas solares con tracking); posibilidad de sombra, etc. Asimismo, existen diversos programas muy detallados que son herramientas muy útiles para poder realizar estos cálculos, como PVsyst (<https://www.pvsyst.com/>) y varios otros programas similares. Todos estos detalles se estudian en cursos avanzados de diseños de sistemas solares FV.

En objetivo de este resumen, es estimar en forma aproximada, como se puede obtener el orden de magnitud de la energía generada por paneles solares FV de una dada área  $A$  y una eficiencia de

generación FV,  $\varepsilon_{FV}$ , para un dado valor de **irradiación solar** ( $E_{sol}$ ) en kWh/m<sup>2</sup>.día. Además, en general es necesario tener en cuenta la **Eficiencia del sistema** ( $\eta_s$ ), esto incluye la eficiencia del panel, las pérdidas del sistema (como cableado, inversores, sombras, suciedad, etc.). Un valor comúnmente usado es alrededor del 75-85%. Bajo estas suposiciones, la energía eléctrica generada,  $E(kWh/día)$ , por este sistema por día, que se supone se instala horizontalmente mirando el zenit, será:

$$E \left( \frac{kWh}{día} \right) \approx A \cdot \varepsilon_{FV} \cdot \eta_s \cdot E_{sol}(kWh/m^2 \cdot día). \quad (xx.5)$$

Por otra parte, muchas veces los paneles solares FV comerciales vienen con hojas de datos que especifican su rendimiento en condiciones estándar de prueba STC, que es la **Potencia nominal** ( $W_p$ ) que el panel genera con irradiancia de  $I_{sol}$  (STC)=1000 W/m<sup>2</sup>. En este caso, es necesario conocer las horas de sol pico,  $H$ , en ese lugar. Este valor serían las horas de radiación solar con una potencia contante de 1 kW/m<sup>2</sup>, que el sol debería general en este lugar para tener la **irradiación solar** ( $E_{sol}$ ). Es decir:

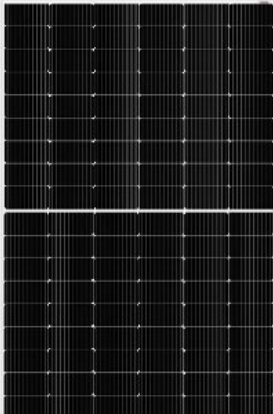
$$H \cdot 1kW/m^2 = E_{sol}(kWh/m^2 \cdot día) . \quad (xx.6)$$

Para calcular la energía eléctrica generada,  $E(kWh/día)$ , por este sistema, tenemos:

$$E \left( \frac{kWh}{día} \right) = \eta_s \cdot W_p \cdot H \approx 0.001 \cdot \eta_s \cdot W_p \cdot E_{sol}(kWh/m^2 \cdot día). \quad (xx.7)$$

Es decir, cuando se indica el valor de  $W_p$  de un panel, este valor ya incluye el área y la eficiencia de panel FV.

**Ejemplo 1.** Consideramos el caso de siguiente panel FV instalado horizontalmente, se desea calcular el valor medio de la energía generada en Buenos Aires (CABA) y en Mendoza.



ELECTRICAL CHARACTERISTICS AT STC	
Model	PW455Wp-144M
Maximum Power (P <sub>max</sub> )	455W
Power Tolerance	0 - + 5W
Open Circuit Voltage (VOC)	50.32V
Short Circuit Current (ISC)	11.32A
Voltage at Nominal Power (V <sub>mp</sub> )	42.00V
Current at Nominal Power (I <sub>mp</sub> )	10.83A
Size of Module	2108 x 1048 x 35mm
Standard Test condition	Irradiance:1000W/M2 Temp: 25°C , & AM :1.5G spectrum
Maximum system voltage	1000VDC/1500VDC
Operating temperature	40°C to +85°C
Module Efficiency	20.37%

$W_p=455 W$      $\varepsilon_{FV}=20.47\%$      $A=2.2 m^2$

**Figura 15.** Valores típicos de una hoja de datos de un panel FV. Entre los datos brindados estala las dimensiones (Área),  $\varepsilon_{FV}$  y  $W_p$ .

Los valores de las radiaciones medias mensuales y promedio anual se indican la siguiente tabla. Se supone una eficiencia del sistema ( $\eta_s=80\%$ ).

Radiación Solar	Las unidades son de kWh/m2.día												Wp=	455 W	A(m2)=	2.2	Ef_FV=	20.47%
	Enero	Febre	Marzo	Abril	Mayo	Jun	Jul	Agost	Sept	Oct	Nov.	Dic.	Prom.					
CABA	6.6	5.8	4.5	3.3	2.5	1.9	2.2	2.9	4	5.1	5.8	6.4	4.25					
Mendoza Cap.	7.5	7.2	6.5	6.3	4.7	4.3	4	4.5	6	6.5	6.7	7	5.93					

Nuestro objetivo es calcular la energía generada por uno de estos paneles en posición horizontal. Usando las Ec.(xx.5) y (xx.7) respectivamente para CABA y Mendoza. Los resultados obtenidos se muestran en la Figura 16.

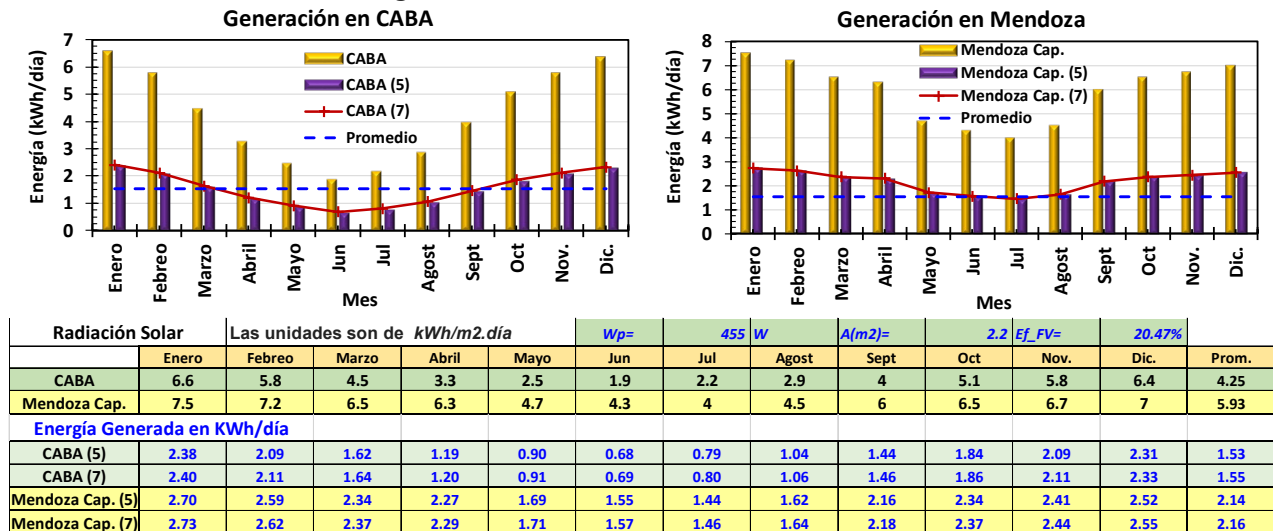
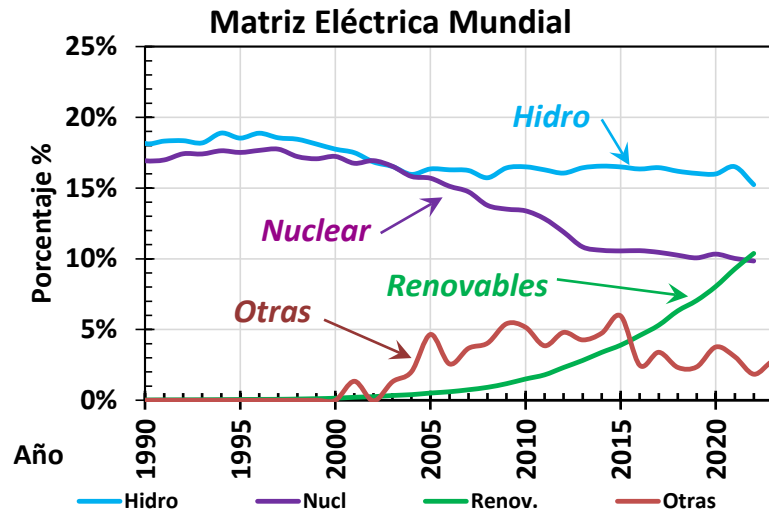


Figura 16. Resultados de la generación eléctrica producida por el panel, descrito en la Figura 15, el CABA y en Mendoza respectivamente, usando las Ec.(xx.5) (barras amarillas) y Ec.(xx7), línea continua roja.

**Energía solar térmica concentrada (CSP)** [17]: es un tipo de energía solar térmica que utiliza espejos o lentes para concentrar una gran cantidad de luz solar sobre una superficie pequeña, y utiliza esta energía para calentar un líquido caloportador, como agua o sal fundida. Este líquido de transferencia de calor se emplea para vaporizar agua, generando vapor que impulsa un generador de turbinas tradicional para producir electricidad. Ver Figura 9. Las centrales eléctricas que utilizan tecnología CSP incluyen sistemas de espejos móviles que concentran la radiación del sol en una torre donde se calienta la sustancia caloportadora. La energía solar concentrada, se usa para mover el generador de electricidad mediante una turbina de vapor. Prototipos desarrollados con esta tecnología se encuentran en España, EE.UU. y varios otros países. Pero su desarrollo se topó con muchas dificultades que aún no fueron superadas. Además de las dificultades, técnicas y económicas, surgieron varias preocupaciones medio ambientales, entre las que se encontraba la muerte de aves que al acercarse a la torre morían calcinadas. Pero lo que tal vez no pudo superar esta tecnología por ahora, es el éxito de las centrales solares FV.



**Figura 17.** Variación de la generación eléctrica mundial, exceptuando las fósiles. Entre 2005 y 2015, la energía eólica creció un 23% anual, la solar FV un 53%, y la hidroeléctrica un 3,2%. Hacia 2022, las ER superaron a la generación nuclear en el mundo. [18]

### Análisis de Ciclo de Vida de los paneles FV.

El análisis del ciclo de vida (ACV o LCA) se refiere al análisis completo del conjunto de etapas por las que pasa un producto, proceso o sistema desde su creación hasta su eliminación. Estas etapas incluyen la producción, el uso y el fin de vida. El análisis del ciclo de vida evalúa su impacto ambiental, energético, emisiones de carbono y económico en cada fase, de la cuna a la tumba.

En ese sentido, los sistemas fotovoltaicos son un caso de mucho interés, ya que, si bien la generación eléctrica en sí no genera emisiones, no consumo de energía, su fabricación, instalación, transporte, y mantenimiento sí lo hacen. ¿Entonces cuál es el balance de todo este proceso?

**Producción y Uso:** La fabricación de paneles fotovoltaicos utiliza materiales como silicio, vidrio y metales, y consume una cantidad significativa de energía. Las emisiones de CO<sub>2</sub> en esta etapa provienen principalmente de la electricidad utilizada en la producción.

**Generación eléctrica:** Durante su vida útil (generalmente 25-30 años), los paneles generan electricidad a partir de la luz solar sin emitir CO<sub>2</sub> adicional, proporcionando una fuente de energía limpia.

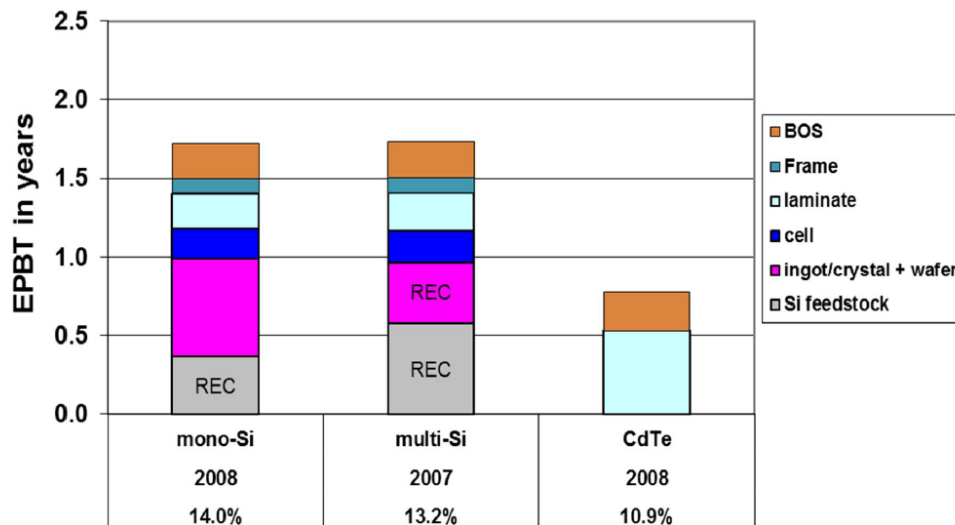
**Fin de Vida:** Al final de su vida útil, los paneles deben ser reemplazados y reciclados adecuadamente para evitar la liberación de sustancias tóxicas. El reciclaje requiere energía, pero es crucial para minimizar los impactos ambientales. El vertido en vertederos o la incineración pueden tener efectos negativos.

**Impacto Ambiental:** El análisis del ciclo de vida (ACV) considera la energía y los materiales utilizados en todas las etapas: producción, uso y fin de vida.

A pesar de los desafíos en la producción y el reciclaje, los paneles fotovoltaicos tienen una huella de carbono significativamente menor que los combustibles fósiles, emitiendo entre 20 y 40 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh.

La eficiencia energética de los paneles compensa rápidamente las emisiones iniciales, haciendo de ellos una opción más sostenible a largo plazo.

En la **Figura 18** se presentan los tiempos de amortización de energía (EPBT) estimados a partir de datos del inventario del ciclo de vida (LCA) para tres tipos de módulos fotovoltaicos comerciales (mono-Si, multi-Si y CdTe). [19], [20] Estos datos, no reflejan el estado actual de los EPBT, que varía con el tiempo, y es de esperar que actualmente sean menores a estos valores. Por otra parte, teniendo en cuenta que la mayoría de los paneles actuales tienen un vida media (VM) de 25 ( $\pm 5$ ) años, la relación entre EPBT/VM es del orden o menor al 7%. Desde luego este tipo de ACV puede hacerse para todas las tecnologías.



**Figura 18.** Tiempo de recuperación de la energía (EPBT) en años de sistemas fotovoltaicos montados en tejados para la producción de electricidad e instalados bajo irradiación del sur de Europa para distintas tecnologías de paneles PV. En este gráfico, los EPBT están discriminado en las distintas componentes de los sistemas FV: donde BOS (*Balance of System*) incluye, soportes de módulos, cableado y acondicionamiento de energía. *Frame*: son los soportes. Además, se discrimina los diversos procesos de fabricación de los modulo y celdas solares.

**Emisiones de carbono ACV de los paneles fotovoltaicos (FV):** Como se indicó previamente, las emisiones usando la metodología de ACV, para las diferentes tecnologías, incluye:

*Extracción de materia prima:* Se extraen materiales como silicio, vidrio y metales para fabricar los paneles. Esta fase incluye la minería y el transporte de materias primas.

*Procesamiento y Refinación:* Las materias primas se procesan y refinan para producir componentes como células solares y marcos.

La energía y los recursos utilizados en esta etapa afectan el impacto ambiental.

*Fabricación de Módulos Fotovoltaicos:* Se ensamblan las células solares en módulos.

La energía y los materiales empleados influyen en el ACV.

*Instalación:* Los paneles se montan en estructuras y se conectan al sistema eléctrico.

La instalación también tiene un impacto energético y ambiental.

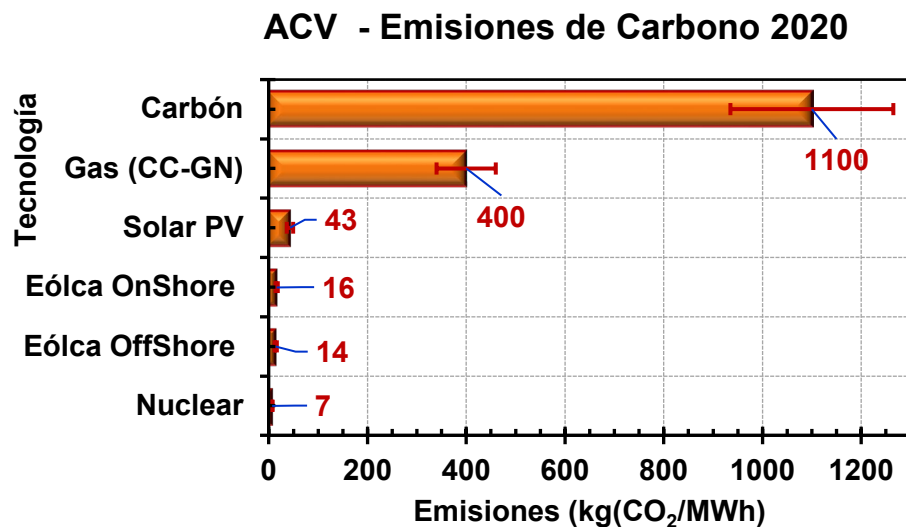
*Operación y Mantenimiento:* Durante su vida útil, los paneles generan electricidad sin emisiones directas.

*El mantenimiento regular es esencial para maximizar la eficiencia.*

*Desmantelamiento y Eliminación o Reciclaje:* Al final de la vida útil, los paneles deben retirarse.

Además, el reciclaje adecuado minimiza el impacto ambiental.

Como puede verse de esta discusión, tanto los costos de energía (EPBT) como las emisiones de carbono, dependen mucho de avance de las tecnologías y lo procedimientos usados tanto para la fabricación, instalación, como de reciclaje de los materiales; dependen del avance tecnológico alcanzado y/o usado. Por lo tanto, lo descripto aquí es solo una foto del estado actual, que puede variar significativamente en el tiempo. De hecho, la **Figura 19** muestra las emisiones de carbono según la metodología de ACV para la generación eléctrica al año 2020. [21]



**Figura 19.** Emisiones de carbono según un ACV de diferentes tecnologías usadas en la generación eléctrica hacia 2020. [21]

En resumen, el ACV considera todas estas etapas para evaluar el impacto total de los paneles fotovoltaicos en el medio ambiente, incluyendo el consumo de energía y emisiones en su fabricación, instalación, mantenimiento de deposición. Los paneles fotovoltaicos ofrecen un impacto ambiental positivo durante su vida útil, generando energía limpia. Como se ve, es crucial gestionar adecuadamente su reciclaje al final de su vida útil para maximizar los beneficios ambientales y minimizar los impactos negativos.

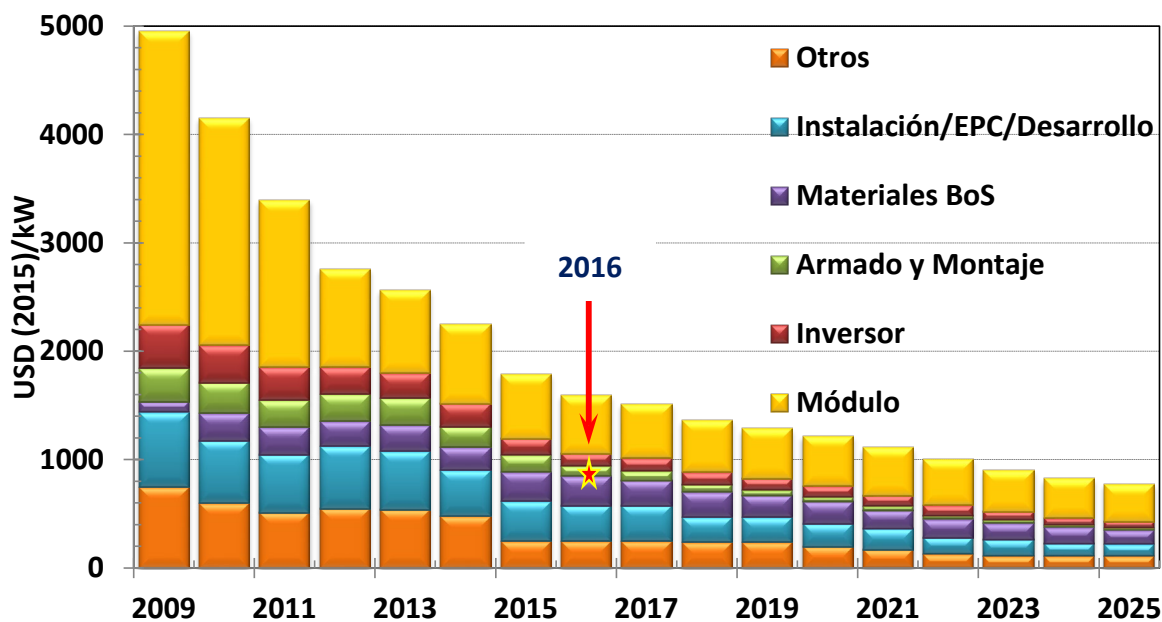
### Contexto Actual de las Energía Solar FV-Internacional

Estamos presenciando cambios significativos en el panorama energético mundial, evidenciados por un desplazamiento de las inversiones hacia fuentes renovables en detrimento de los hidrocarburos. En 2015, la capacidad renovable instalada generó suficiente energía para superar el incremento de demanda total de ese año, marcando un desplazamiento neto a favor de las renovables. La **Figura 17** muestran el notable crecimiento de las energías renovables en el mundo.

Aunque los recursos fósiles podrían durar uno o dos siglos más, la preocupación por el calentamiento global hace urgente la transición a una matriz energética sostenible. Las ER y UREE son alternativas consensuadas para responder a la creciente demanda, reducir emisiones de gases de efecto invernadero y lograr un desarrollo sostenible.

En 2020, la generación solar fotovoltaica alcanzó los 821 GWh en el mundo, con un crecimiento del 23%, siendo la segunda mayor en todas las tecnologías renovables. En China, EE.UU. y Vietnam, hubo un aumento récord de 134 GW en la capacidad fotovoltaica. La energía solar fotovoltaica se está convirtiendo en la opción de menor costo para la generación de electricidad y se espera que atraiga muchas inversiones en los próximos años.

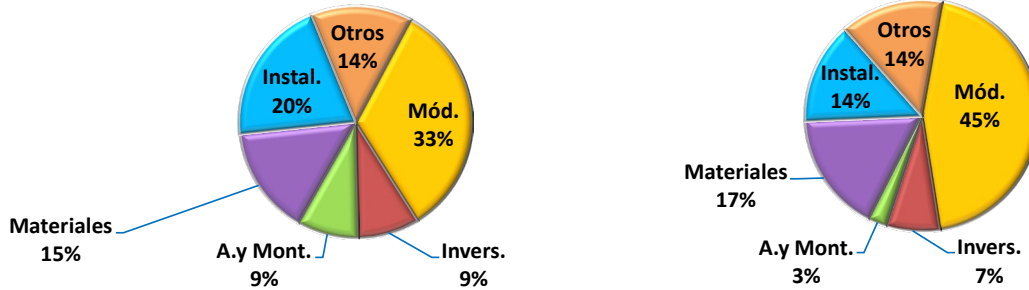
En la **Figura 20** se muestra la evolución histórica y proyección de los costos de la energía solar fotovoltaica, abierta en sus distintas componentes. En la **Figura 21** se ven como se distribuyen estos costos en 2015 y 2025. Estos gráficos muestran una caída muy significativa y sostenida de los costos totales, dominada por la reducción del costo de los módulos fotovoltaicos, como se ilustra también en la **Figura 22**.



**Figura 20.** Costo promedio de kW<sub>p</sub> instalado en centrales fotovoltaicas de potencia, apertura del costo, y proyección de reducción a partir del 2016. Fuente IRENA. [22] Es interesante notar que en el 2017 se han declarado costos de centrales por debajo de los 1000 USD/kWp, que se indica en la figura con una estrella y la flecha roja. Aquí, BoS (*Balance of System*) incluye todos los componentes necesarios para que un sistema FV funcione correctamente, excepto los paneles solares e inversers. Los costos de Engineering, Procurement and Construction (EPC), se refieren a la suma total de los gastos asociados con la entrega de un proyecto llave en mano.

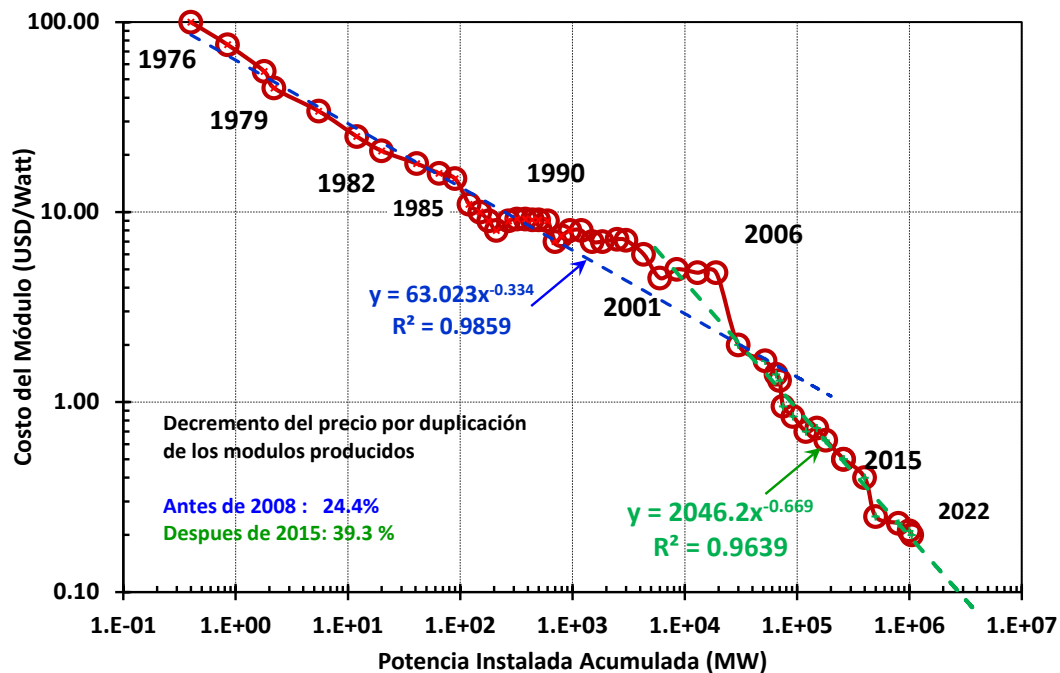
Costo de Inst. PV en 2015 = 1788 USD/kWp

Costo de Inst. PV en 2025 = 773 USD/kWp



**Figura 21.** Distribución de los costos de una instalación PV instalado en 2015 y 2025. Nótese, que aun para 2025, se espera que el costo de los paneles solares, sigan siendo una fracción importante de costo de las instalaciones FV. Fuente IRENA. [22]

La drástica reducción del costo de los módulos, se debe tanto a la innovación tecnológica en la fabricación como al aumento de la escala de la producción. Esto se aprecia de manera clara en la **Figura 22**, Ley de Swanson, donde se puede ver que después de 2015, la tendencia de decrecimiento de los precios se acentuó más. El tipo de decrecimiento exponencial en los costos de la energía solar, es similar a lo que ha ocurrido con otras industrias, como la fabricación de computadoras, pero es menos frecuente en la industria energética.



**Figura 22.** Costos de los módulos fotovoltaicos en función de la potencia instalada. La línea verde muestra la Ley de Swanson, que predice una reducción del 20% del precio por cada duplicación de la potencia instalada (o transportada). La línea azul muestra los precios promedios reales en dólares del 2011, entre los años 1976 y 2015. La línea de trazos verdes, para los datos posteriores a 2015.

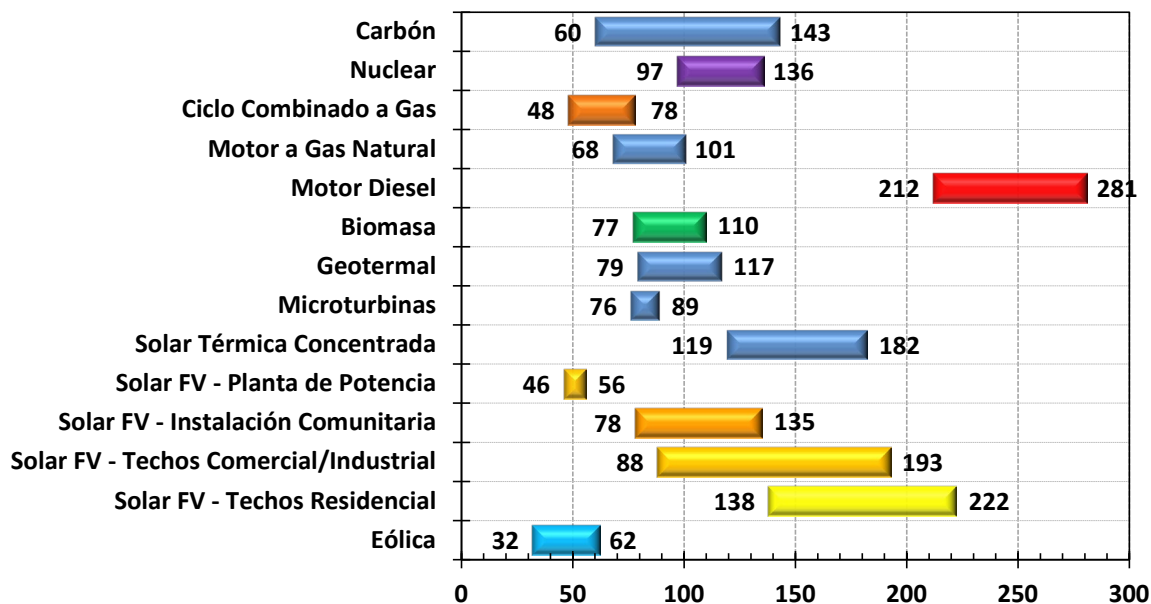
**Costo nivelado de la Electricidad (LCOE):** El LCOE (Levelized Cost of Energy) o costo nivelado de la electricidad, es una metodología estándar utilizada para calcular el costo total por kWh o MWh de distintos tipos de generación eléctrica. Este parámetro incluye todos los costos asociados a un sistema de generación a lo largo de su vida útil, tales como inversiones iniciales (upfront cost), combustible, operación y mantenimiento, y desmantelamiento, en un dado periodo, típicamente 20 o 30 años (o la vida útil de la central). Todos estos costos se reducen a *valores presentes*, usando una cierta tasa de descuento (TD) (típicamente la TD varía entre el 5% al 15%). Luego, este costo total, se divide por la producción total de energía generada en el periodo considerado, que también se actualiza al valor presente, proporcionando así una métrica del costo en USD/MWh o USD/kWh. Más específicamente:

*Suma de los Costos en la Vida Útil de la tecnología*

$$LCOE = \frac{CI + \sum_{i=1}^N (O\&M(i) + F(i)) / (1+d)^i}{\sum_{i=1}^N (Energía\ generada\ (i)) / (1+d)^i} \quad (xx.5)$$

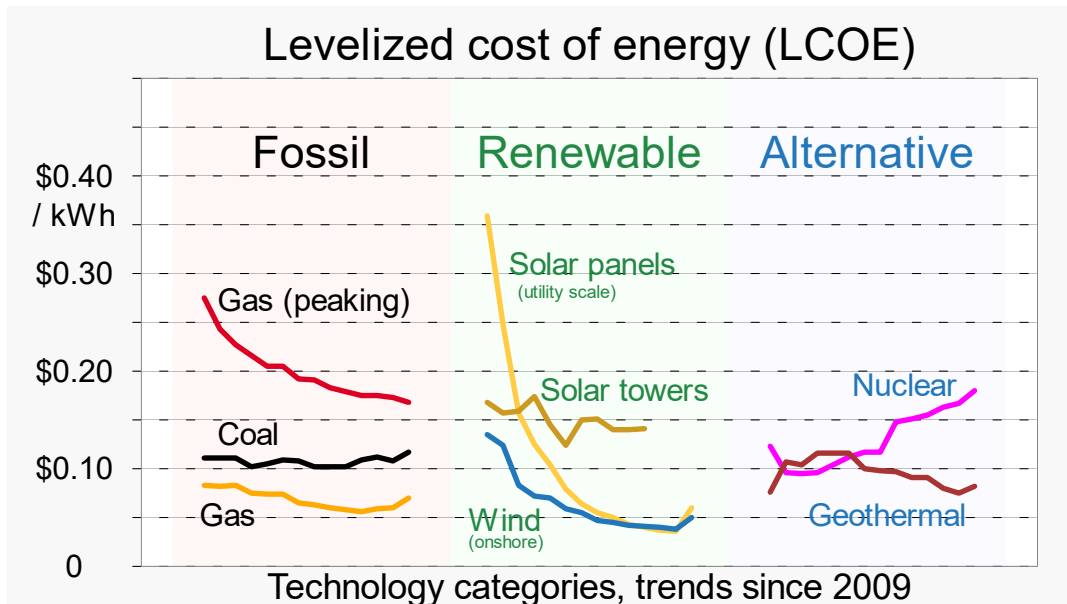
Aquí, CI= Costo inicial o *Upfront cost*. N= número de años considerados, O&M(i) costo de operación u mantenimiento al año *i*. F(i) costo del combustible al año *i*. *d*= TD = tasa de descuento. Energía generada (i) es la electricidad generada al año *i*. [23], [24]

Gracias a esta metodología, es posible comparar los costos de diferentes sistemas de generación utilizando un solo dato, lo que ayuda a identificar los sistemas más eficientes para cada aplicación. Esto es crucial, ya que los costes de cada tecnología pueden variar significativamente según la región.



**Figura 23.** Costos nivelados de la energía para Estados Unidos (sin subsidios) calculado con datos de precios del año 2016 [25]. Es importante resaltar que los precios de los combustibles son menores que en Argentina, por lo que la generación convencional en nuestro país debiera ser aún más cara (teniendo en cuenta que los combustibles representan aproximadamente el 80% del costo de generación convencional).

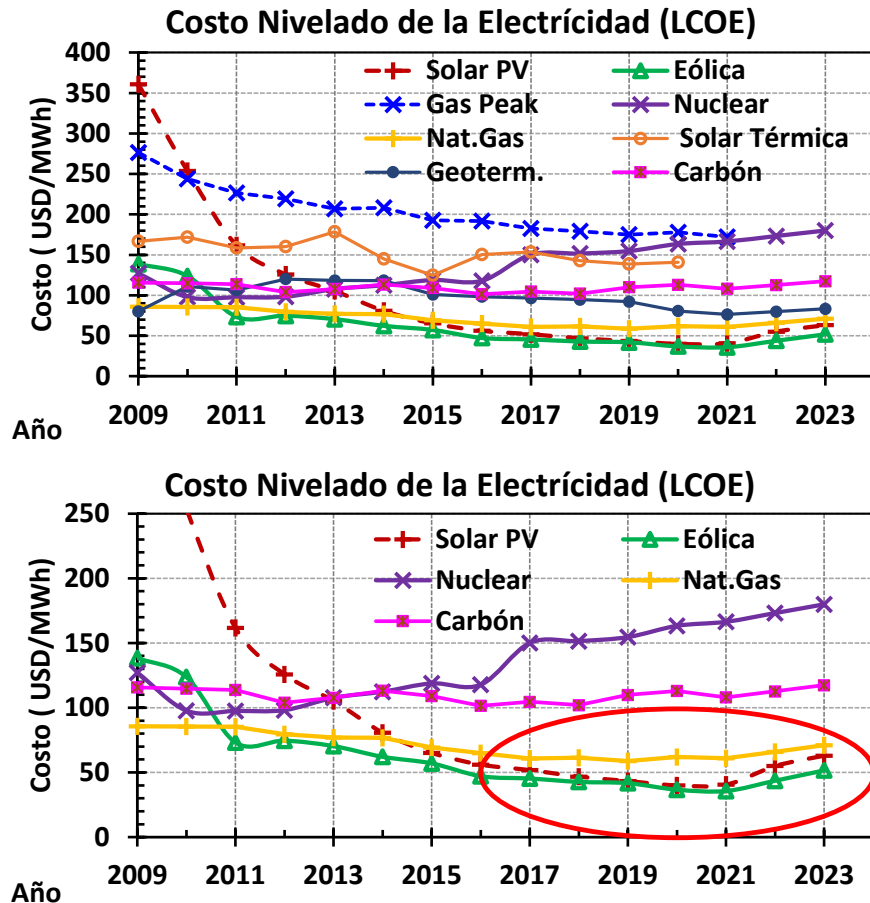
En la **Figura 23**, se muestra los rangos de variación de los LCOE de las principales tecnologías hacia el año 2016. Mientras que en la **Figura 25**, se muestra su evolución desde los años 2019 a 2019. Similarmente, **Figura 26**, desde la muestra su variación continua desde 2009 a 2023.



**Figura 24.** Costo nivelado de la electricidad, (LCOE) es un indicador del costo actual de la generación de la energía durante el ciclo de vida del sistema de generación eléctrica de 2009 a 2020. [23] Se observa claramente la reducción de los costos totales de la energía solar PV y de la eólica, que superaron la generación térmica con gas natural. Los valores están expresados den USD/MWh. Gas Peaking (son las centrales a gas para abastecer picos) y las de gas, se refieren en general a las de gas con ciclo combinados.

Los valores están expresados den USD/MWh. Desde 2015, las formas más económicas de generación eléctrica son la eólica, solar FV y la térmica a gas natural (en particular en centrales de ciclo combinado). Además, estas formas de generación se complementan muy bien entra ellas, ya que el gas puede suplir la intermitencia de las energías renovables. Además, las centrales a gas natural de ciclo combinado son de todas las tecnologías térmica a combustibles fósiles, las que menos contaminaciones ambientales y emisiones de carbono posee. Además, estos gráficos, muestran la razón de porque las centrales solar térmicas concentradas (CSP), las centrales a carbón y las nucleares muestran un decremento en su crecimiento y tasa de construcción.

La metodología de análisis del LCOE puede generalizarse para estudiar y comparar los costos asociados a la prestación de cualquier otro servicio energético usando un solo indicador de costo: el Costo Nivelado del Servicio Energético (CNdSE). El CNdSE es un indicador económico, que permite evaluar el costo por año (por mes día) de obtener un determinado servicio energético. Por Ejemplo, iluminación con una lampara, servicio de refrigeración de alimentos con una heladera o nevera, agua caliente sanitaria con un dado un determinado consumo de agua, etc. De manera análoga, el CNdSE permite establecer el costo medio en USD para obtener un dado servicio por un determinado periodo de tiempo, en nuestro caso 1un año, pero está claro que este tiempo puede ser diferente, según la necesidad o preferencia.



**Figura 25.** Costo nivelado de la electricidad, (LCOE) es un indicador del costo actual de la generación de la energía durante el ciclo de vida del sistema de generación eléctrica de 2009 a 2020. [23] Arriba las principales tecnologías, abajo, una selección de las que van superando los desafíos del ultima década. En particular, las que están en el abalo rojo, las más accesibles con costos inferiores a 100USD/MWh: solar FV, Eólica y gas natural (ciclos combinados).

El CNdSE se define como [26]:

*Suma de los Costos en la Vida Útil del Equipo*

$$CNdSE = \frac{CI + \sum_{i=1}^N (O\&M(i) + E(i)) / (1+d)^i}{N \text{ (años)}} \quad (xx.5)$$

En esta suma de los costos en la vida útil del equipo ( $N$  en años), se incluyen los costos iniciales del mismo ( $CI=up\ front\ cost$ ), como así también los otros gastos incurridos a lo largo de su vida útil. En esto gastos incluyen, gastos de energía ( $E$ ), mantenimiento, seguro, etc. ( $O\&M$ ). Dado que estos dos últimos gastos ( $E$  y  $O\&M$ ) se realizan en tiempos distintos que la compra del equipo ( $CI$ ), los mismos se reducen a valores presentes con una tasa de descuento ( $d$ ). Mayores detalles de estos cálculos se pueden encontrar en la referencia. [27].

De este modo, el valor del CNdSE permite comparar en forma simple y directa los principales costos asociados a la provisión de un dado servicio. Este es justamente en costo que el usuario

debería tener en cuenta para tomar la decisión de que equipo en el más conveniente, y el estado y las empresas a la hora de licitar sus insumos, no el costo inicial, como habitualmente se hace. [28]

## Ventajas y Desventajas de la Energía Solar

Alguna de las ventajas de la Energía solar, en particular la FV.

- ✓ **Bajo impacto ambiental:** No produce contaminación.
- ✓ Ideal para lugares alejados de la Red Eléctrica Comercial
- ✓ No hay ruido ni partes móviles: Operación silenciosa y no hay desgaste mecánico.
- ✓ No hay emisiones: no hay emisiones de GEI durante la operación.
- ✓ No hay uso de combustibles y agua u otros insumos externos para generar energía.
- ✓ Requisitos de mantenimiento mínimos.
- ✓ Larga vida útil: Hasta 30 años de funcionamiento eficiente.
- ✓ Generación de electricidad con luz: Funciona tanto con luz solar como artificial.
- ✓ Operación en condiciones nubladas: Genera energía incluso en días nublados.
- ✓ Modularidad: Puede adaptarse a cualquier aplicación, desde pequeños dispositivos hasta plantas de energía de varios megavatios.
- ✓ Son **fáciles de instalar** y desmantelar. No producen residuos peligrosos.
- ✓ Democratizan el **acceso a la energía**, ya que todas las regiones del mundo tienen acceso al sol y el viento. Ayuda a que las regiones sean más autónomas.
- ✓ Promueven un **desarrollo local**.
- ✓ Generan **nuevos puestos de trabajo**, y en mayor proporción que otras energías. Ver Figura 26.
- ✓ Son **inagotables**, como el sol, el viento y el agua.
- ✓ Permiten una **construcción modular**, posibilitando la entrada en producción en menores tiempos y escalar a medida que las posibilidades económicas y la demanda lo requieran
- ✓ Tienen una **distribución geográfica más equitativa** que los recursos fósiles o nucleares.
- ✓ En el caso de la solar fotovoltaica, su máximo de **generación coincide con los picos de consumo** generado por las altas temperaturas.
- ✓ Se **complementan muy bien** con centrales hidroeléctricas, que pueden servir para compensar en parte la intermitencia de las ER.
- ✓ Se **complementan bien con las centrales térmicas** (y bajo ciertas condiciones, con las nucleares).
- ✓ Fácil Transporte e Instalación

Entre las desventajas:

- ✓ **Intermitencia.** No garantizan la disponibilidad en todo momento.
- ✓ Algunas necesitan de un **gran espacio** para poder desarrollarse.

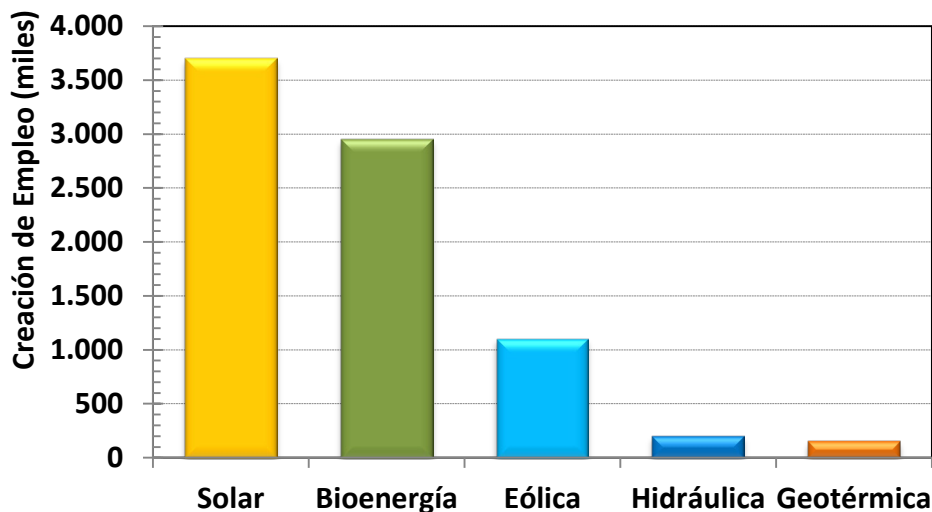
- ✓ La **acumulación de energía** a gran escala, que podría sortear estas limitaciones, por ahora no está disponible a precios competitivos.
- ✓ **Alto costo inicial del sistema FV.** Aunque se compensa con bajos costos de mantenimiento y sin costos de combustible.
- ✓ Dependencia de la luz: No puede generar electricidad sin luz.
- ✓ **Necesidad de espacio:** Requiere grandes áreas para aplicaciones a gran escala.
- ✓ **Corriente continua (CC):** La electricidad generada es CC, por lo que se necesitan electrodomésticos especiales o inversores para convertirla a corriente alterna (CA).

En caso de generación PV no asociada a una red

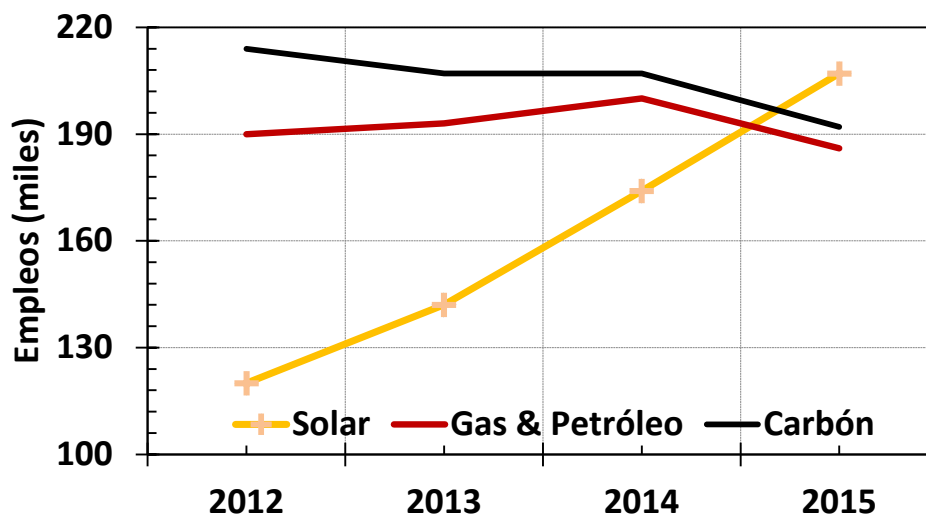
- ✓ Alto costo de las **baterías** y dificultades de sus manejo y gestión.
- ✓ Requiere de un programa de recuperación y manejo de las **baterías** usadas (en caso de generación PV no asociada a una red).

### Empleos generados por las Energías Renovables

Las energías renovables, especialmente la solar, son grandes creadoras de empleo. Ver **Figura 26** y **Figura 27**. Según IRENA, en 2015 el empleo en renovables aumentó un 5%, alcanzando 8,1 millones de personas. La energía solar fotovoltaica lidera con 2,8 millones de empleos en el mundo, seguida por los biocombustibles líquidos con 1,7 millones, la biomasa con 0,82 millones y el biogás con 0,38 millones. La energía solar fotovoltaica genera el doble de empleos por unidad de energía comparada con fuentes convencionales. En Estados Unidos, la energía solar ya emplea a más personas que la industria del gas, petróleo o carbón, sectores que se encuentran estabilizados o en declive. [29]



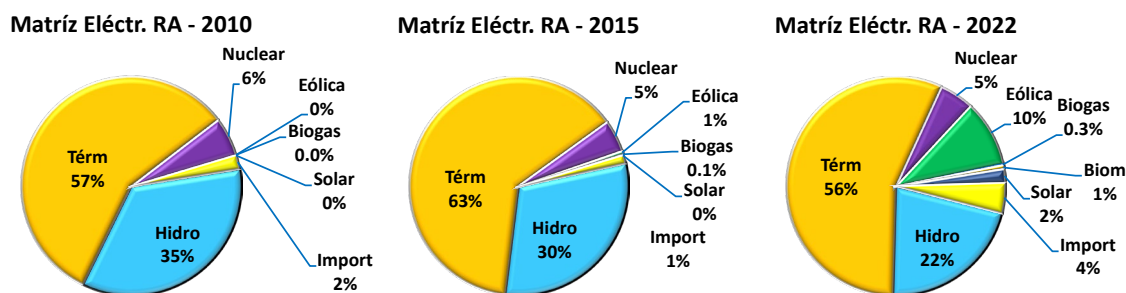
**Figura 26.** Creación de nuevos empleos en energías renovables en el mundo, discriminados por tipo de energía. Dentro de solar se contabiliza solar fotovoltaica (es la mayoritaria, con 2,8 millones de empleos), solar térmica y solar concentrada, bioenergía agrupa biomasa, biogás y biocombustibles. La hidráulica se refiere sólo a pequeños aprovechamientos (las grandes hidráulicas contabilizan 1,3 millones de trabajadores en el mundo), y geotermal [30].



**Figura 27.** Empleos en la industria energética de EE.UU. Comparativamente, ya hay más trabajos creados en solar fotovoltaica en EE. UU. que, en la industria del petróleo y gas, o la del carbón [31].

### La Energía Solar Fotovoltaica en América latina y Argentina

En los últimos años, Latinoamérica ha incrementado significativamente su participación en el mercado fotovoltaico global, a través, esencialmente, de la instalación de centrales de potencia en suelo. Se espera que la región en su conjunto represente más de los 6% de la demanda mundial de energías renovables en 2017. Hay un fuerte crecimiento de varios mercados importantes como México y Chile. [32].



**Figura 28.** Contribución de las distintas tecnologías en la generación de electricidad en Argentina para los años 2010, 2015 y 2022. Las contribuciones mayores provienen de la generación térmica, seguida de la hidroeléctrica y más recientemente de las ER. [33]

### Desarrollo de la Energía Solar FV en Argentina

El sector eléctrico argentino es el tercero más grande de América Latina, dependiendo principalmente de la generación térmica y la hidroeléctrica. La generación térmica se basa mayormente en la combustión de gas natural. Aunque el país actualmente sigue importando gas, se espera recuperar el autoabastecimiento a mediano plazo gracias a las grandes reservas de *tight-gas*

y los recursos masivos de *shale-gas* en la Cuenca Neuquina. La expansión de la capacidad nuclear y de nuevas centrales hidroeléctricas es limitada. La evolución de la matriz eléctrica nacional puede apreciarse en la Figura 20.

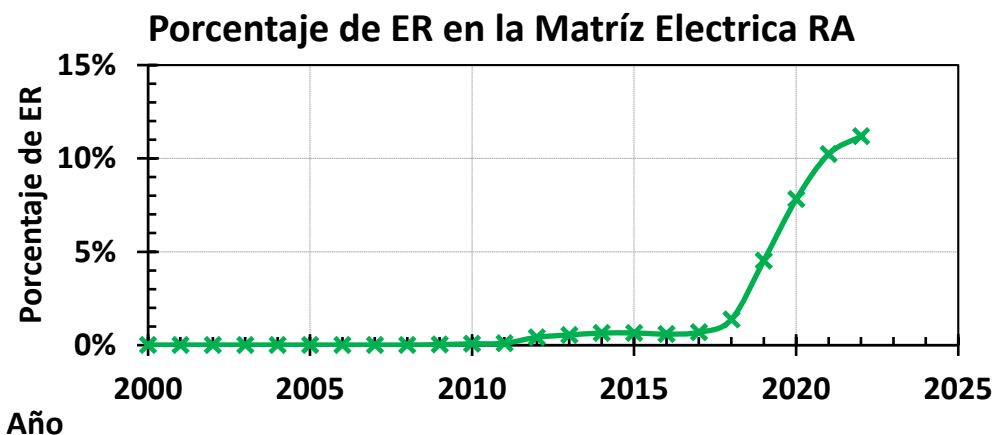
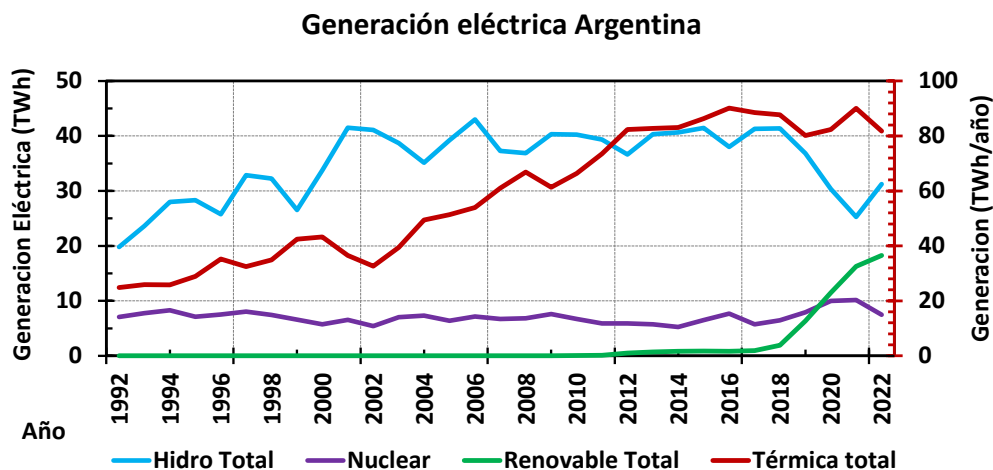


Figura 29. Arriba, variación de la composición de la matriz eléctrica argentina de 1992 a 2022. Abajo, porcentaje de las ER (fundamentalmente eólica y solar PV) en la matriz eléctrica.

La producción eléctrica mediante energías renovables es más económica que la generada con combustibles fósiles líquidos, sean nacionales o importados. Ver Figura 23. Esto presenta una oportunidad para diversificar y robustecer la matriz eléctrica, generar empleo local, reducir emisiones y disminuir costos de transporte y distribución. Por ello, es necesario que el Estado Nacional establezca un marco legal para el desarrollo de estas energías, que para algunas provincias ya está implementado. Esto es particularmente cierto para la generación eléctrica FV distribuida. Aunque las distorsiones de precios y subsidios dificultan la estimación de costos nivelados de las diferentes tecnologías. Actualmente, en Argentina la energía eólica y solar fotovoltaica ya son competitivas con los ciclos combinados a gas y gran medida se complementan. [25]

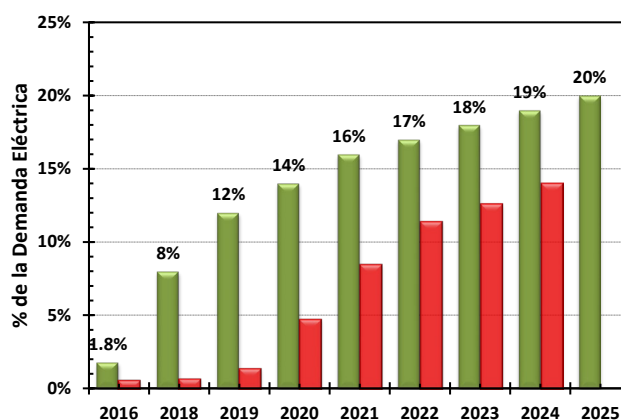
En nuestro país, hasta el año 2009, la capacidad fotovoltaica instalada estaba mayormente ubicada en áreas rurales dispersas y alejadas de las redes eléctricas. A partir del año 2010, se

promovió la instalación de centrales de potencia basadas en fuentes renovables, y como consecuencia, la capacidad FV instalada en la Argentina comenzó un camino ascendente.

La entrada en operación de la planta FV de 1,2 MW en Ullúm (San Juan, 2011), marcó el primer hito [34]. En el marco del GENREN [35], entre 2012 y 2013, se instalaron 7 MW en Cañada Honda, (San Juan). En el año 2014, se inauguró una planta de 1 MW en la provincia de San Luis [36]. Sin embargo, el primer salto cualitativo se dará con la entrada en funcionamiento de las centrales fotovoltaicas ganadoras de las primeras rondas licitatorias de RENOVAR de 2016.

Las centrales fotovoltaicas cuentan desde hace años con un marco regulatorio que habilita su conexión al Sistema Interconectado Nacional y también con políticas de promoción basadas en el pago de una tarifa diferencial (Ley 26.190, Programa GENREN, Res. Secretaría de Energía N° 108/11).

Nuestro país se está sumando al auge de las energías renovables (ER) en el mundo y la región, especialmente la energía eólica y la solar fotovoltaica, como repuesta a las diversas crisis energéticas que han venido afectando la generación, transporte y distribución de electricidad. Estas fuentes de energía son limpias, seguras, rápidas de instalar y generadoras de empleo, con costos de generación competitivos, incluso más bajos que muchas fuentes tradicionales, como los combustibles líquidos.



**Figura 30.** Costos nivelados de la energía Metas fijadas en la Ley 27191 de Fomento de las Energías Renovables (barras verdes). Barras rojas, porcentajes efectivamente alcanzado para esos años, hasta 2023. [33]

La Ley 27191 obliga a los Grandes Usuarios (GU), con potencias contratadas mayores a 300 kW, a incorporar una fracción creciente de electricidad de fuentes renovables, desde el 8% en 2018 hasta el 20% en 2026. La **Figura 30** muestra los objetivos propuestos y el nivel de cumplimiento de los mismos. Los GU pueden adquirir energía renovable directamente de generadores, a través de distribuidores o generarla ellos mismos, convirtiéndose en "prosumidores" mediante Generación Distribuida Mediante Energías Renovables (GDER).

La mayoría de los GU operan en áreas urbanas y suburbanas, donde la generación de energía fotovoltaica es viable y atractiva debido a la alta disponibilidad de recursos solares, reducción de costos y pérdidas de transporte, adaptabilidad a construcciones existentes y bajo mantenimiento. La energía solar fotovoltaica se adapta bien al paradigma GDER, especialmente en ambientes urbanos donde coincide con los picos de consumo eléctrico. Además, hay muchos espacios urbanos que pueden incrementar su valor, con paneles solares, por ejemplo, playas de estacionamiento de

shoppings o estacionamiento de escuelas o universidades, techos de galpones de empresas, etc. En los estacionamientos los mismos paneles generan sombra y electricidad, que puede servir para abastecer sus propios consumos o véndelos a la red.

## **Generación Fotovoltaica Distribuida – Legislación y Regulación**

Se denomina generación distribuida (GD) de la energía eléctrica a toda aquella que es generada cerca de los lugares de consumo; también se la conoce como generación energética in situ, generación embebida, descentralizada o dispersa. De nuevo, los subsidios generalizados a la energía en Argentina han inhibido la posibilidad de estos desarrollos. A comienzos de 2023, Brasil superó el millón de instalaciones de generación distribuida solar PV, acumulando una capacidad instalada de poco más de 12 GW. En contraste, Argentina para entonces contaba con alrededor de mil usuarios-generadores (prosumidores), que sumaban aproximadamente 15 MW instalados y conectados a la red. Esta diferencia se debe en gran medida a los subsidios a la energía. En Brasil, las tarifas eléctricas residenciales rondan los 0.20 USD/kWh, mientras que, en Argentina, hasta 2023 eran de 0.04 USD/kWh, o sea cerca de 5 veces menores.

Otro desafío importante en Argentina y el mundo está asociado a la creciente electrificación de la economía. Este fenómeno se relaciona con el gran desarrollo de nuevas tecnologías como Internet, inteligencia artificial, transporte eléctrico, bombas de calor, entre otros. Es previsible que las demandas de electricidad continúen creciendo en las próximas décadas. Además, la insuficiencia de infraestructura de transporte y distribución eléctrica es un problema común en Argentina como en muchas partes del mundo. Las redes eléctricas actuales no están diseñadas para manejar la variabilidad de la energía generada por fuentes renovables; muchas de ellas son antiguas, con más de 40 años de uso, y no pueden satisfacer la creciente demanda ni transportar la energía de las nuevas plantas de energías renovables que se puedan instalar.

Por último, en muchos países, como Argentina, aún se utilizan tarifas residenciales planas, es decir, su valor no varía a lo largo del día. La demanda de energía tiene picos bien conocidos entre las 19 y las 21 horas (la llamada “*curva del pato*”). Con tarifas horarias, sería posible generar incentivos para que los usuarios pospongan ciertos consumos a la noche, cuando la demanda es menor, como el lavado de ropa, el calentamiento de agua sanitaria y la carga de baterías de coches eléctricos, etc. Una medida así podría aplanar la curva de consumo, optimizar el uso de la infraestructura de generación, transporte y distribución, y reducir los picos de consumo que aumentan la vulnerabilidad del suministro energético.

Aunque los costos de la energía solar continúan disminuyendo, las inversiones iniciales para instalar estas tecnologías siguen siendo altas. Conseguir financiamiento y hacer que los proyectos sean económicamente viables sigue siendo un desafío. Todos estos aspectos relacionados con el desarrollo de las energías renovables dependen de *políticas y regulaciones energéticas adecuadas*.

## Conclusiones

El mundo está haciendo la transición de combustibles fósiles a energías renovables. Esta transición no solo ayuda a preservar el medio ambiente, sino que también aporta beneficios adicionales en el marco de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) establecidos por la comunidad internacional. La tecnología fotovoltaica ha tenido un gran desarrollo en los últimos años. Varios países como China, Estados Unidos e India han prestado especial atención a la tecnología fotovoltaica para satisfacer sus necesidades eléctricas, pero su desarrollo fue muy grande en el resto del mundo.

Hacia 2020, la capacidad acumulada de energía solar instalada en China alcanzó el podio mundial con casi 253 GW. Con el continuo progreso en la industria fotovoltaica y la reducción de sus precios, es previsible que los recursos solares alcancen escala de Terawatt en los próximos años. Además, las aplicaciones fotovoltaicas están avanzando hacia áreas más innovadoras, como pavimentos fotovoltaicos, sistemas integrados en edificios, industrias, parques comunitarios, y sistemas de iluminación de carreteras, etc. Debido a los crecientes avances en la tecnología fotovoltaica, es que se vislumbra un futuro venturoso para esta tecnología.

En Argentina, aunque el desarrollo de las energías renovables es incipiente, existe un acuerdo amplio para avanzar en esta dirección. Los escenarios energéticos del Ministerio de Energía y Minería proyectan un incremento de la potencia renovable entre 9,4 y 11,3 GW para 2025. Este crecimiento diversificará la matriz energética y reducirá la dependencia de la importación de gas y gasoil, ayudando a cumplir las metas de reducción de emisiones.

En cuanto a la *Generación Distribuida Mediante Energías Renovables*, aunque ha habido avances, aún falta legislación, regulación técnica en varias provincias. Pero, sobre todo, se requieren condiciones de mercado para su aplicación masiva, ya que, en muy pocos lugares de Argentina, la inversión se amortiza en tiempos razonables, menores a 20 años. Sin una política de fomento a la generación fotovoltaica distribuida, solo el nicho de reemplazo de generadores a gasoil o quizás GLP podría avanzar por las fuerzas del mercado.

Otro aspecto importante a tener en cuenta es que quizás la mayor barrera para el desarrollo de la energía solar fotovoltaica (FV) y eólica en el mundo actualmente es la *intermitencia* intrínseca de estas fuentes y la *limitada capacidad de almacenamiento* de energía actual. Como se discutió en esta capítulo, tanto la energía solar como la eólica dependen de las condiciones meteorológicas. La energía solar solo se produce cuando hay sol, y la eólica depende de la velocidad del viento. Esta intermitencia crea desafíos para satisfacer una oferta constante y creciente de electricidad.

En cuanto al almacenamiento de energía, la tecnología actual de almacenamiento de energía, como las baterías, no ha avanzado lo suficiente para almacenar grandes cantidades de energía de manera eficiente y económica. La capacidad de almacenamiento es crucial para compensar la intermitencia de las fuentes de energía renovable. Otro desafío no menor, es la *infraestructura de red insuficientes*, que esta presenta en casi todo el mundo. Las redes eléctricas actuales en muchos lugares no están diseñadas para manejar la variabilidad de la energía generada por fuentes renovables. La modernización y adaptación de las redes para incorporar grandes cantidades de energía solar y eólica son necesarias. Además, con la creciente electrificación de la economía, y la incorporación del transporte eléctrico, las demandas de electricidad seguirán creciendo en el futuro próximo. Otro desafío de la ER se relaciona con los altos costos iniciales y financiamiento. Aunque los costos de la energía solar y eólica siguen disminuyendo significativamente, las inversiones iniciales para instalar estas tecnologías siguen siendo alta. Conseguir financiamiento y hacer que los

proyectos sean económicamente viables aún son un desafío. Otro desafío para el desarrollo de las ER se relaciona con las *políticas y regulaciones*. La falta de políticas y regulaciones favorables en algunos países puede inhibir el desarrollo de la energía renovable. La incertidumbre regulatoria y la falta de incentivos pueden desalentar la inversión en estas tecnologías. Por último, la cuestión de la *aceptación social y cuestiones ambientales* son asimismo importantes. En algunas áreas, hay resistencia a la instalación de parques eólicos y solares debido a preocupaciones estéticas, impacto en la vida silvestre, y otros factores ambientales y sociales. Desarrollo tecnológico, aunque la tecnología ha avanzado, sigue habiendo margen para mejorar la eficiencia y reducir los costos de producción y mantenimiento de los sistemas solares y eólicos.

## Referencias

- [1] M. Aghaei y et al., «Introductory Chapter: Solar Photovoltaic Energy,» de *Solar Radiation - Measurements, Modeling and Forecasting for Photovoltaic Solar Energy Applications*, 2024.
- [2] Wikipedia, «Constante Solar,» 2024.
- [3] S. Gil, *Experimentos de Física de bajo costo usando TIC*, Buenos Aires: Alfaomega, 2016.
- [4] Wikipedia, «Irradiación solar,» 2024. [En línea]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Solar\\_irradiance](https://en.wikipedia.org/wiki/Solar_irradiance).
- [5] Wikipedia, «Masa de aire (astronomía),» 2024. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Masa\\_de\\_aire\\_\(astronom%C3%ADa\)](https://es.wikipedia.org/wiki/Masa_de_aire_(astronom%C3%ADa)).
- [6] World Bank, «Solar Global Atlas Information,» 2024. [En línea]. Available: <https://globalsolaratlas.info/map>.
- [7] H. Grossi Gallegos y R. Righini., «Atlas de energía solar de la República Argentina,» *Publicado por la Universidad Nacional de Luján y la Secretaría de Ciencia y Tecnología*, Mayo 2007.
- [8] Wikipedia, «Energía Solar Fotovoltaica,» 2024. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa\\_solar\\_fotovoltaica](https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_solar_fotovoltaica).
- [9] Wikipedia, «Swanson's law,» 2024. [En línea]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Swanson%27s\\_law](https://en.wikipedia.org/wiki/Swanson%27s_law).
- [10] C. Placco, . L. Saravia y C. Cadena, «Colectores Solares Para Agua Caliente,» *INENCO, UNSa –CONICET*, 2007.
- [11] Wikipedia, «Arquitectura bioclimática,» 2024. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Arquitectura\\_bioclim%C3%A1tica](https://es.wikipedia.org/wiki/Arquitectura_bioclim%C3%A1tica).
- [12] Wikipedia, «Muros Trombe,» 2024. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Muro\\_Trombe](https://es.wikipedia.org/wiki/Muro_Trombe).
- [13] S. Gil, «Neutrinos solares ¿Por qué brillan las estrellas?,» *Ciencia Hoy*, vol. 14, nº 79, pp. 52-58, 2004.
- [14] J. Bahcall, «Solving the mystery of the missing neutrinos,» 2004.
- [15] NREL, «Best Research-Cell Efficiency Chart,» 2024. [En línea]. Available: <https://www.nrel.gov/pv/cell-efficiency.html>.
- [16] Wikipedia, «Parque Solar Cauchari,» [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Parque\\_Solar\\_Cauchari](https://es.wikipedia.org/wiki/Parque_Solar_Cauchari).

- [17] Wikipedia, «Energía termosolar de concentración (CPS),» 2024. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa\\_termosolar\\_de\\_concentraci%C3%B3n](https://es.wikipedia.org/wiki/Energ%C3%ADa_termosolar_de_concentraci%C3%B3n).
- [18] Our World in Data, «Electricity Mix,» 2024. [En línea]. Available: <https://ourworldindata.org/electricity-mix>.
- [19] IEA PVPS Task 12, Subtask 20, LCA, «Life Cycle Inventories and Life Cycle Assessments of Photovoltaic Systems,» Report IEA-PVPS T12-02:2011, October 2011, 2011.
- [20] V. Muteri y et al., «Review on Life Cycle Assessment of Solar Photovoltaic Panels,» *Energies*, vol. 13, p. 252, 2020.
- [21] RatedPower, «Lifecycle analysis of a PV plant: Carbon footprints and recycling modules,» RatedPower - Enverus 2022- Spain, 2022.
- [22] International Renewable Energy Agency IRENA Report 2016, « Reporte 2016,» 2016. [En línea]. Available: <http://www.irena.org>.
- [23] Wikipedia, «Costo Nivelado de la Energía,» 2024. [En línea]. Available: [https://es.wikipedia.org/wiki/Coste\\_nivelado\\_de\\_la\\_energ%C3%ADa](https://es.wikipedia.org/wiki/Coste_nivelado_de_la_energ%C3%ADa).
- [24] Wikipedia, «Cost of electricity by source,» 2021. [En línea]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Cost\\_of\\_electricity\\_by\\_source](https://en.wikipedia.org/wiki/Cost_of_electricity_by_source).
- [25] Lazard, Levelized Cost of Energy Analysis 10.0, <https://www.lazard.com/media/438038/levelized-cost-of-energy-v100.pdf>, Dec. 2016.
- [26] R. Prieto y S. Gil, «Hacia un Transporte Sustentable,» *Petrotecnia*, vol. LX, n° 4, pp. 92-101, Dic. 2020.
- [27] R. Prieto, J. Vassallo y S. Gil, *Transporte Sostenible en Argentina*, Buenos Aires: Cámara Argentina de la Construcción (APE), 2021.
- [28] B. Julier, R. Prieto y S. Gil, «Costo nivelado de los servicios energéticos Reflexiones sobre un sistema inteligente de etiquetado en Eficiencia,» *Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente*, vol. 26, n° 1, pp. 147-156, 2022.
- [29] Bloomberg News, Clean-Energy Jobs Surpass Oil Drilling for First Time in U.S., 2016. [En línea]. Available: <https://www.bloomberg.com/news/articles/2016-05-25/clean-energy-jobs-surpass-oil-drilling-for-first-time-in-u-s>.
- [30] IRENA, «Renewable Energy and Jobs - Annual Review 2016,» 2016.
- [31] U. B. o. L. Statistics, 2024. [En línea]. Available: <https://www.bls.gov/>.
- [32] Latin America PV Playbook Q4 2016 Market Update, «Executive Summary,» MananParikh, GTM Research, February 2017. [En línea].
- [33] Informe Anual Cammesa 2023, «Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico S.A.,» 2024. [En línea]. Available: [www.cammesa.com.ar](http://www.cammesa.com.ar).
- [34] INTI, «INTI Energías Renovables,» [En línea]. Available: <http://www.inti.gob.ar/enerova/erSO/er25.php>.
- [35] ENARSA, 2024. [En línea]. Available: <http://www.enarsa.com.ar/index.php/es/energiasrenovables>.
- [36] Agencia de Noticias de San Luis, «ANSL,» 2017. [En línea]. Available: <http://agenciasanluis.com/notas/2014/10/06/san-luis-inaugura-su-primer-parque-solar-fotovoltaico/>.

- [37] ENERGÍA PROVINCIAL SOCIEDAD DEL ESTADO (EPSE), «ENERGEPSE,» 2017. [En línea]. Available: <http://epsesanjuan.com.ar/web/energia/solar/2>.
- [38] A. e. E. R. y. M. Ambiente, <http://www.cricyt.edu.ar/asades/averma.php>.
- [39] Wikipedia, «Photovoltaic effect,» 2024. [En línea]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic\\_effect](https://en.wikipedia.org/wiki/Photovoltaic_effect).

## Preguntas

1. Explique es la matriz energética primaria de un país y el mundo. ¿Qué es la matriz energética secundaria? ¿Qué es la matriz Eléctrica? ¿Qué es la matriz de uso final de la energía? Muestre cuatro ejemplos de ellas, 1) Para el mundo, 2) para Argentina 3) para un país de la región, 4) EE.UU. o la U.E.
2. ¿Qué es la intensidad de carbono de un combustible o un insumo energético? Ver (Wikipedia Intensidad de Emisiones: [https://es.wikipedia.org/wiki/Intensidad\\_de\\_emisi%C3%B3n](https://es.wikipedia.org/wiki/Intensidad_de_emisi%C3%B3n) )
3. Para los países: Argentina, Bolivia, Brasil, Chile, Paraguay y Uruguay (cada grupo elija dos países). A) Construya un gráfico de distribución de la **matriz energética primaria** para cada país. B) Construya un gráfico de distribución de la **matriz eléctrica** para cada país. C) Construya un gráfico de la **matriz energética primaria mundial y de la matriz energética eléctrica global**. Como se compara con la de los países de América Latina elegidos. D) Para esos mismo países grafique los Intensidades de Carbono de sus respectivas matrices eléctricas (IC) en kg(CO<sub>2</sub>)/MWh. E) Cuales son las emisiones de CO<sub>2</sub>, por habitante de cada país analizado y como se compara con la global.
4. (Ver: <https://ourworldindata.org/electricity-mix>, <https://www.iea.org/reports/world-energy-balances-overview>, <https://www.eia.gov/outlooks/ieo/> )
5. Para todo el conjunto de viviendas estudiadas (compartidas en el archivo Auditorias\_UNSAM\_2023.xlsx) y para la suya propia, A) construya sendos gráficos de torta de los consumo totales y como se distribuyen estos consumos entre los distintos artefactos o servicios. Identifique los 4 de mayores consumos. ¿Qué fracción de la energía representan en el grupo y en su hogar? B) construya sendos gráficos de torta de los consumos totales y como se distribuyen estos consumos entre los distintos servicios (Acondonamiento térmico, ACS, Total Cocina, Heladera, Artefactos eléctricos, Otros). Identifique los 3 servicios de mayores consumos. ¿Qué fracción de la energía representan en el grupo y en su hogar? C) construya sendos gráficos de torta de las emisiones de carbono totales y como se distribuyen estos consumos entre los distintos servicios. Identifique los 3de mayores consumos. ¿Qué fracción de las emisiones representan en el grupo y en su hogar?
6. \* Tomando como base los Balances Energéticos (BE) de Argentina para el Año 2022: (<https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/hidrocarburos/balances-energeticos>) A) construya un gráfico (torta) de la matriz energética primaria y secundaria nacional para este año. B) Realice un gráfico de torta de la matriz eléctrica nacional, e indique que fracción de toda la energía usada en el país es Electricidad. ¿Qué fracción de la energía secundaria de Argentina es electricidad? Para saber cómo es la generación eléctrica nacional, consulta el informe anual de CAMMESA 2021 (de Mayo 2021 p.40) C) Compare la distribución de energía total, de gas (Gas Natural y GPL) y electricidad entre los distintos usos finales (Residencial, Comercial, oficial, Industrial, Tranp. Etc.) D) ¿cuál es el principal insumo energético en el sector residencial argentino? E) Compare el consumo medio de gas y electricidad por persona en Argentina. En 2022 habían unos 8.5 millones de usuarios de gas Natural y unos 14 millones de usuarios de electricidad. Se estima que en Argentina hay unos 17,5 millones de viviendas existentes

actualmente, con unos 2.6 personas por hogar. F) Compare estos valores medios con los consumos medidos en su casa según la auditoría realizada y la de todo el grupo de las auditorías compartidas. G) los mismos para los consumos de transporte. H) Estime las emisiones promedio por hogar en Argentina de CO<sub>2</sub>, asociado con el gas y la electricidad usada en el sector residencial.

7. En un campo se dese bombear agua para el ganado a un tanque, consumo de agua 2000 litro/diarios. Se bombea agua desde unos 100 metros. A) Calcular la potencia mecánica necesaria para llenar el tanque en 5 horas con un rendimiento del 90%. B) si tiene un molino de viento de 8 pies (2,4m de diámetro) y el viento sopla a unos 20 km/h al menos 6 horas por día. ¿Se podrá bombear esta agua? C) Si desea hacer lo mismo con una bomba eléctrica conectada a paneles solares, que área de paneles necesitaría, si la eficiencia de su bomba eléctrica es del 90%. D) discuta las ventajas y desventajas de cada una de estas alternativas, incluyendo conectarse directamente a la red eléctrica.
8. A) Calcule el tamaño de los paneles solares fotovoltaicos, si quisiese obtener toda la electricidad que consume una casa, de paneles solares PV. Suponga un consumo eléctrico de 3 MWh/año. ¿Qué superficie necesita? Suponga eficiencia de los paneles del 21%. B) Estime su costo. En Argentina un kit completo para generar 1000 kWh/año, sale aproximadamente 700 U\$. C) Tomando como base que el costo de la electricidad en el AMBA es en promedio de uno 0.12 USD/kWh, ¿en cuántos años se amortiza la inversión. D) ¿Realmente cree que podrá autoabastecerse si no dispone de baterías? E) Discuta cuál sería el mejor manejo de la electricidad producida, Suponga que la electricidad inyectada a la red se paga a razón de 0.06 USD kWh. Realice sus cálculos en USD. F) realice este caculo para CABA y Mendoza.

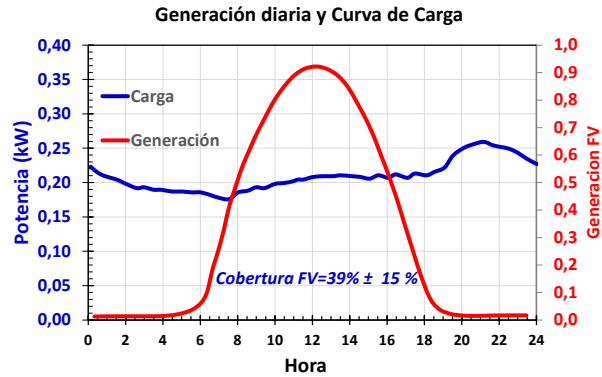
Radiación Solar	Las unidades son de kWh/m <sup>2</sup> .día												
	Enero	Febreo	Marzo	Abril	Mayo	Jun	Jul	Agost	Sept	Oct	Nov.	Dic.	Prom.
CABA	6.6	5.8	4.5	3.3	2.5	1.9	2.2	2.9	4	5.1	5.8	6.4	4.25
Mendoza Cap.	7.5	7.2	6.5	6.3	4.7	4.3	4	4.5	6	6.5	6.7	7	5.93

**Tabla 1:** Las unidades son de kWh/m<sup>2</sup>.día (*promedio mensual*)

**Nota:** Tener en cuenta que el consumo de energía no es constante a lo largo del día, ver Figura 1. En función de las áreas superpuestas, es posible estimar un porcentaje de auto-consumo y un porcentaje de inyección a la red, los cuales influyen directamente en el repago de la instalación. Según la **Figura 31**, la fraccion auto-consumida, es decir la abastecida por la generacion FV es del orden del 40% (±15%).

La energía auto-consumida se da cuando el usuario consume directamente la energía generada del panel, reduciendo la demanda de la red eléctrica. Se puede decir entonces que el área de superposición de ambos gráficos se “valoriza” a una tarifa minorista, digamos 0.12 USD/kWh.

La energía excedente, en cambio, es energía generada que no fue demandada por el usuario, la cual debe ser vendida a la red eléctrica a la tarifa de inyección vigente de la región, más relacionada con el precio mayorista, del orden de 0.06 USD /kWh. Se puede decir entonces que el area de la curva de generacion que se encuentra por encima de la curva de carga se “valoriza” a la tarifa de inyección local.



**Figura 31.** Ejemplo de curva de generación y de carga de una vivienda tipo.

Otro punto de importancia en las instalaciones solares fotovoltaicas se da por su economía de escala, es decir que el precio de la instalación por Watt instalado depende del tamaño de la instalación, típicamente el precio de 2000-2500 USD/kWp para instalaciones pequeñas, mientras que una instalación más grande (50-100kWp) puede tener un precio de 1700-1900 USD/kWp.

9. Un árbol "típico", de unos 40 cm de diámetro de tronco a la altura del pecho de una persona y altura de 10 m, tiene una biomasa (masa seca) de aproximadamente 2 Tn. Ver referencia indicada al pie. ¿Qué superficie necesitaría utilizar para absorber el carbono emitido por una persona promedio en Argentina, a lo largo de su vida, suponiendo que tiene los siguientes consumos: 1000 m<sup>3</sup>(GN)/año y unos 4 MWh/año de electricidad, en una familia de 3 persona. La composición media de la masa de un árbol se compone de un 50% de carbono (C), un 42% de oxígeno (O), un 6% de hidrógeno (H) y el 2% restante de nitrógeno (N) y otros elementos.(Ver: [https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/msiedel/materiales-2/#:~:text=Composici%C3%B3n%20de%20la%20madera,\(N\)%20y%20otros%20elementos](https://www3.gobiernodecanarias.org/medusa/ecoblog/msiedel/materiales-2/#:~:text=Composici%C3%B3n%20de%20la%20madera,(N)%20y%20otros%20elementos))  
 Calcule con las que se reporta en las referencias Internacionales. <https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.CO2E.PC> . Explique las posibles diferencias.  
 A) Compare la superficie anual a utilizar si obtiene toda su energía de paneles fotovoltaicos (eficiencia 21%). [https://ecometrica.com/assets/one\\_tonne\\_carbon\\_tree\\_discussion\\_paper\\_3.pdf](https://ecometrica.com/assets/one_tonne_carbon_tree_discussion_paper_3.pdf)
- 10.