

Variabilidad de la Potencia de una Central Fotovoltaica

Energía Solar Fotovoltaica

Oscar Perpiñán Lamigueiro

Universidad Politécnica de Madrid

① **Introducción**

② Incertidumbre y Predicción

③ Variabilidad de la Potencia

④ Sistemas de Acumulación

① Introducción

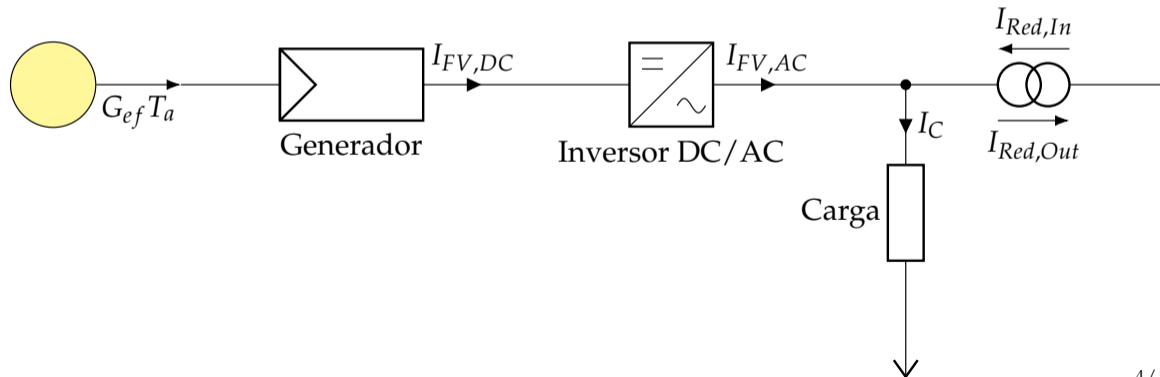
Los Sistemas Fotovoltaicos y la Red Eléctrica

Variabilidad de la Radiación

Alteración de las condiciones de funcionamiento de la red

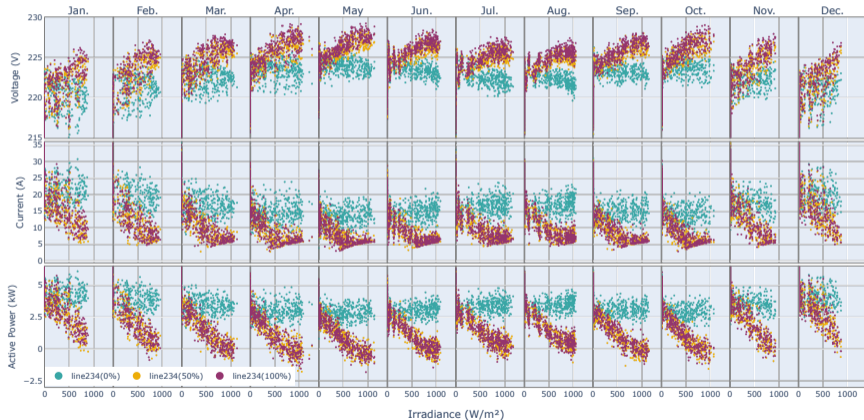
Los sistemas fotovoltaicos conectados a red alteran las condiciones de funcionamiento habitual de la red.

- ▶ Bidireccionalidad del flujo de potencia
- ▶ Rampas de potencia
- ▶ Servicios de apoyo



Bidireccionalidad del flujo de potencia

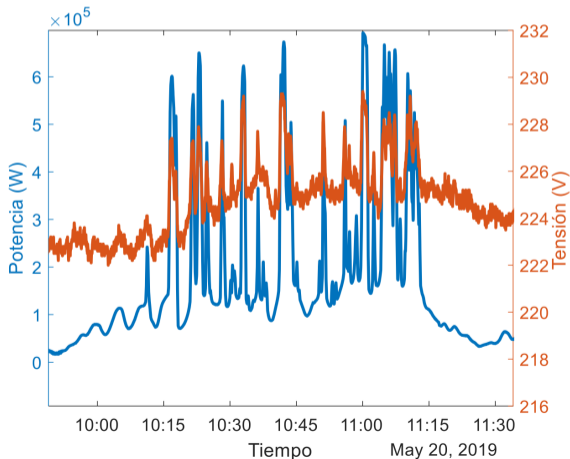
Posibilitan la **bidireccionalidad del flujo de potencia**, con los consiguientes **cambios en la tensión de los nodos**, y **en la corriente** conducida por las líneas y transformadores*.



*<https://dx.doi.org/10.3390/solar2010003>

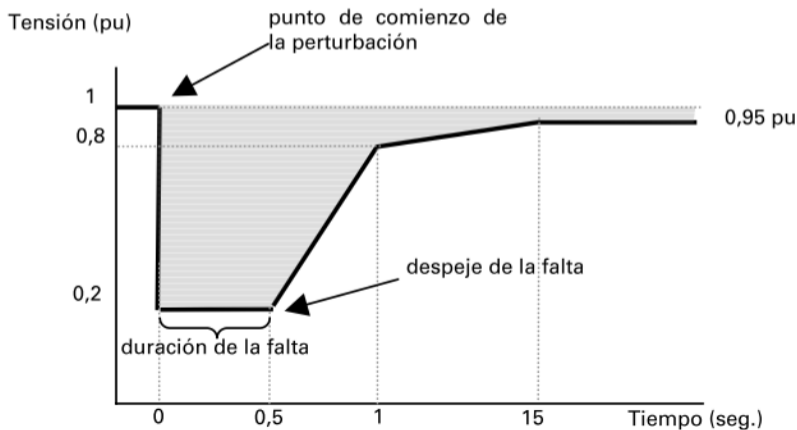
Rampas de potencia

Las **rampas de potencia** debidas a las **fluctuaciones de radiación solar** pueden entorpecer el adecuado funcionamiento de los equipos conectados a la red y los elementos de protección existentes.



Servicios de apoyo a la red

Los SFCR pueden proporcionar **servicios de apoyo** a la red gracias a las funcionalidades que incorporan los inversores de conexión a red, capaces de **controlar la potencia activa inyectada** en el punto de conexión, **y la potencia reactiva** en funcionamiento normal o para enfrentarse a **huecos de tensión**.



① Introducción

Los Sistemas Fotovoltaicos y la Red Eléctrica

Variabilidad de la Radiación

La variabilidad de la irradiancia solar

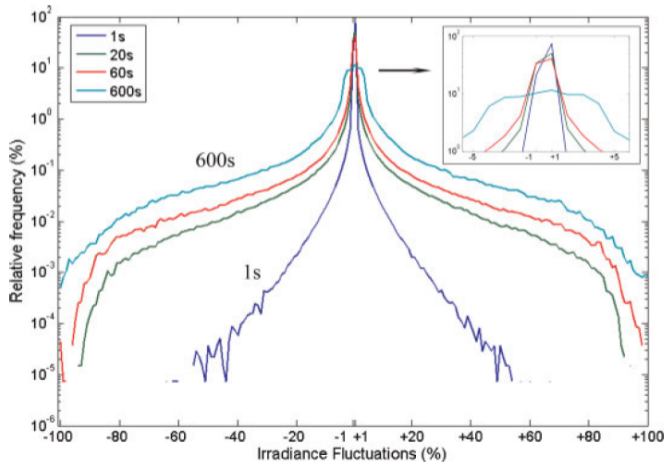
La irradiancia solar es un **proceso con inercia** que, en general, no presenta alta probabilidad para mostrar cambios abruptos.

La **probabilidad y el nivel de las fluctuaciones dependen:**

- ▶ de la **resolución temporal**,
- ▶ del **estado de la atmósfera**.

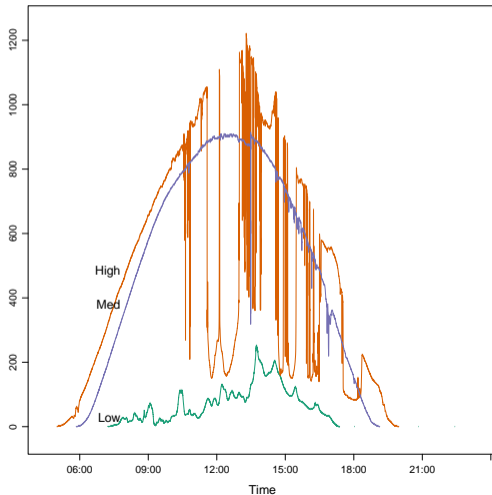
Dependencia de la resolución temporal

La probabilidad de ocurrencia de fluctuaciones elevadas es sustancialmente menor al observar con resoluciones temporales altas.



Dependencia de la atmósfera

El nivel de fluctuación depende del comportamiento de la atmósfera (mayor en días parcialmente cubiertos).



① Introducción

② Incertidumbre y Predicción

③ Variabilidad de la Potencia

④ Sistemas de Acumulación

② Incertidumbre y Predicción

Generación y Demanda

Predicción de la potencia FV

Generación y Demanda

La **casación** entre **generación** y **demanda** que se consigue en las redes eléctricas se basa en la **programación** de las diferentes unidades de **generación** disponibles para suministrar la **demanda prevista** y para constituir **reservas** que hagan frente a las posibles **variaciones** en la demanda.



Programación de la generación

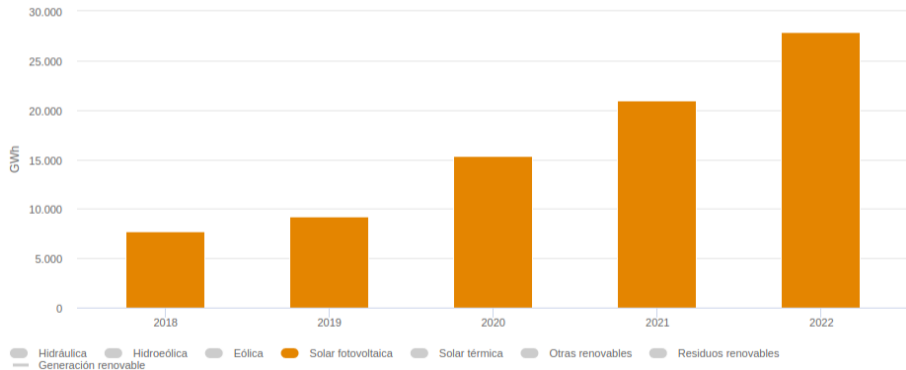
Esta programación se produce en **escalas y horizontes temporales diversos** y se **actualiza de forma sistemática** de acuerdo con las variaciones previstas en la predicción de la demanda.



<https://demanda.ree.es/visiona/peninsula/demandaqh/total/>

Participación masiva de la fotovoltaica

La **inclusión masiva** de sistemas fotovoltaicos en la red **modifica el equilibrio** existente y puede implicar el uso de las reservas de generación previstas originalmente para asumir las variaciones de la demanda.



② Incertidumbre y Predicción

Generación y Demanda

Predicción de la potencia FV

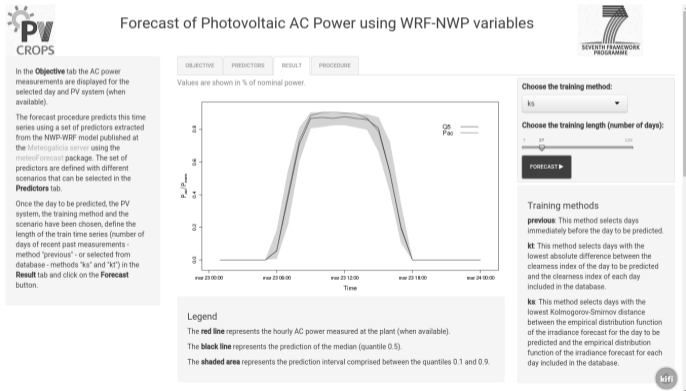
Predicción de la Potencia

En este contexto, el reto no es tanto la variabilidad como la **predicción**:

- ▶ La realización de **predicciones en horizontes horarios o diarios** de la potencia generada por un sistema fotovoltaico o por un grupo de sistemas es **crucial para facilitar la integración** de sistemas fotovoltaicos en redes eléctricas.
- ▶ La predicción de radiación solar y potencia de sistemas fotovoltaicos es un **área de investigación de plena actualidad**.

Ejemplo: proyecto europeo PVCROPS

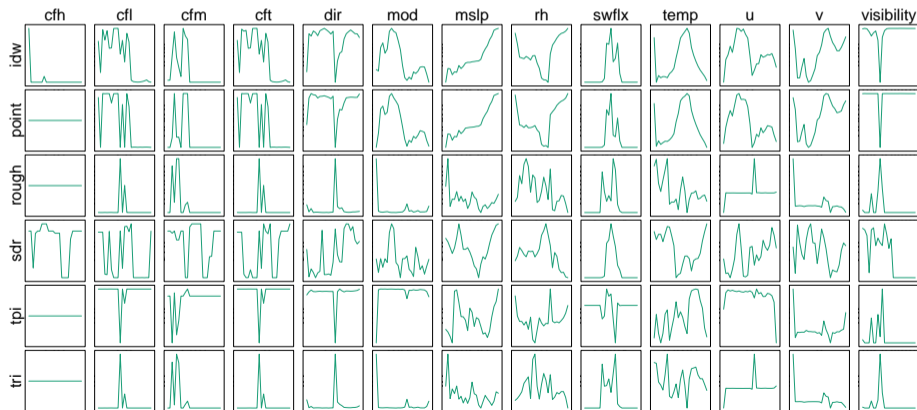
- ▶ Herramienta de **aprendizaje automático** o *machine learning* entrenada con **series históricas de predicciones NWP** y **medidas de potencia eléctrica** (30 días en la serie temporal de entrenamiento)*.
- ▶ **Predicción de potencia AC** con resolución **horaria** y un horizonte temporal de **1 día**.



*<https://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2015.03.006>

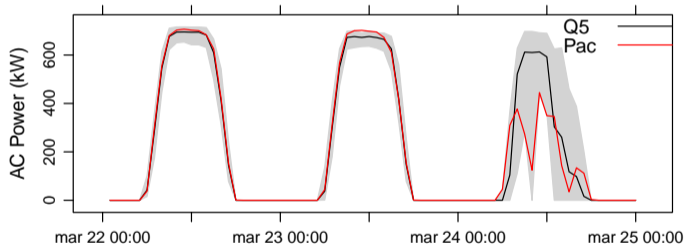
Ejemplo: proyecto europeo PVCROPS

Se emplean como entradas las predicciones de **variables meteorológicas** generadas por modelos de predicción meteorológica numérica e **índices de variación espacial y temporal** estimados con las variables meteorológicas.



Ejemplo: proyecto europeo PVCROPS

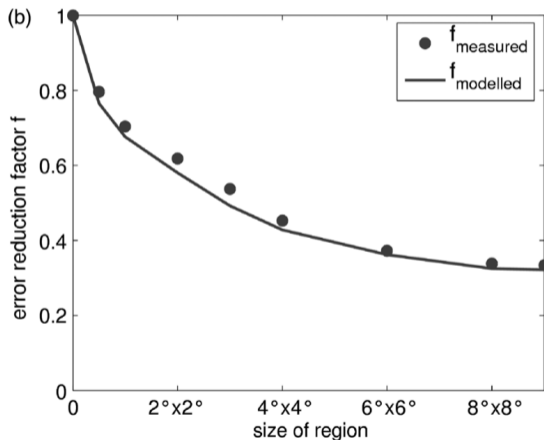
Genera **predicciones probabilísticas**, entregando tanto la mediana de la predicción como un intervalo de confianza, que permite cuantificar la fiabilidad de la predicción, y que puede servir como medida indirecta de la variabilidad futura.



<http://vps156.cesvima.upm.es:3838/predictPac/>

Predicciones agregadas

Las predicciones obtenidas mejoran cuando las predicciones se aplican a un conjunto de sistemas.*



*<https://dx.doi.org/10.1002/pip.1033>

- ① Introducción
- ② Incertidumbre y Predicción
- ③ Variabilidad de la Potencia**
- ④ Sistemas de Acumulación

Variabilidad de la potencia

La variabilidad presente en la irradiancia solar se **atenúa** en la potencia AC:

- ▶ por la **dispersión** espacial **entre diferentes centrales**.
- ▶ por la **dispersión** espacial **dentro de una central**.

③ Variabilidad de la Potencia

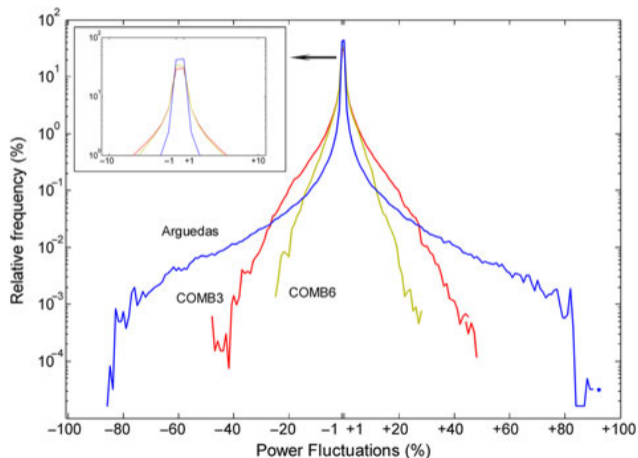
Dispersión espacial entre centrales

Dispersión espacial dentro de una central

Normativas de red

Dispersión espacial entre centrales

En términos generales, la **dispersión espacial de sistemas fotovoltaicos diferentes** conectados a la misma red **atenúa** la variabilidad conjunta*.



*<https://dx.doi.org/10.1002/pip.1127>

Dependencia de meteorología y distancia

El **nivel de atenuación depende** principalmente:

- ▶ de las **características meteorológicas** de la zona y época,
- ▶ y de la **distancia** entre los sistemas*.

*Para **distancias mayores de 5 km** las fluctuaciones de irradiancia con resolución temporal de 1 minuto están esencialmente **incorreladas**.

③ Variabilidad de la Potencia

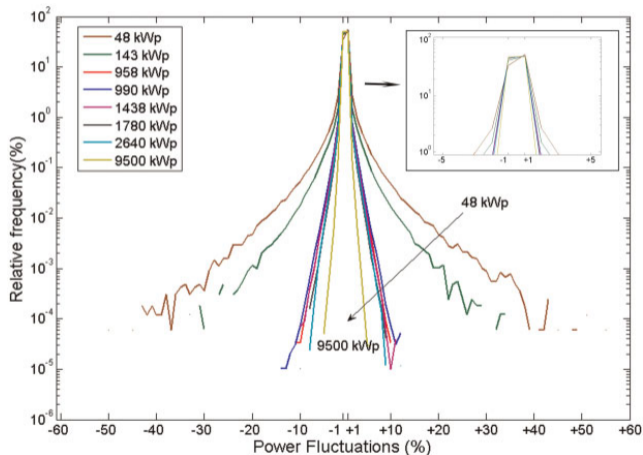
Dispersión espacial entre centrales

Dispersión espacial dentro de una central

Normativas de red

La central atenúa la potencia

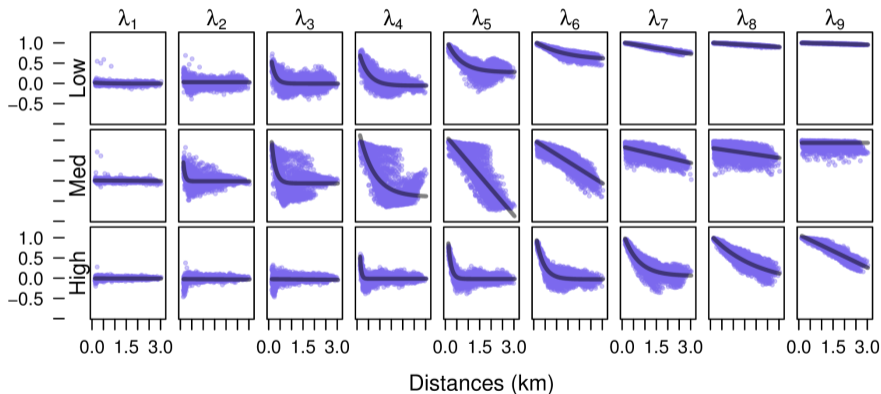
En términos generales, la **dispersión espacial** de generadores fotovoltaicos pertenecientes a **una misma central atenúa** la variabilidad conjunta*.



*<https://dx.doi.org/10.1002/pip.1016>

Dependencia de la resolución temporal, distancia y tipo de día

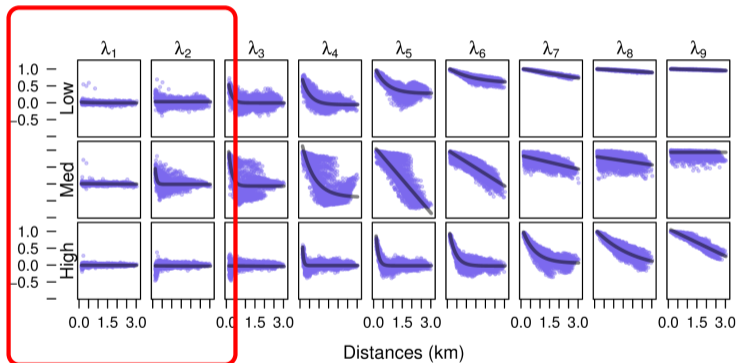
La correlación entre la potencia de cada inversor **depende** de la **resolución temporal**, la **distancia** entre los inversores, y el **nivel de fluctuación del día** en cuestión*.



*<https://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2012.12.004>

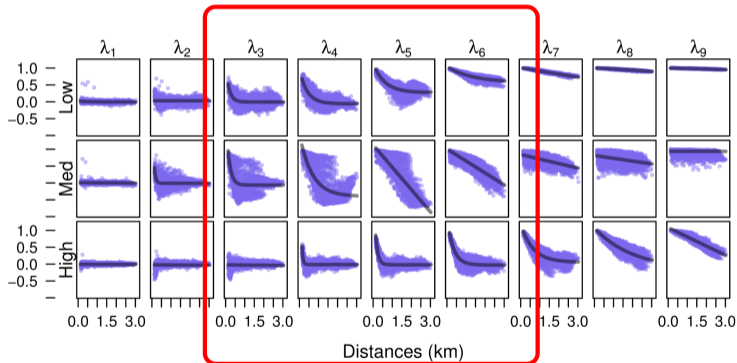
Escalas temporales bajas

Escalas temporales bajas ($\tau < 1$ min): correlaciones bajas.



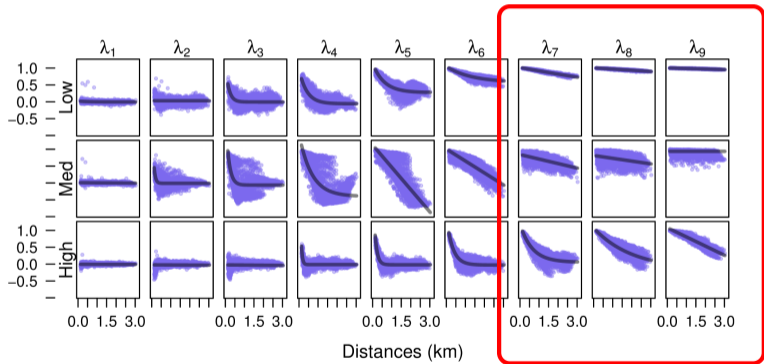
Escalas temporales intermedias

Escalas temporales intermedias: la correlación depende fuertemente del nivel de fluctuación diario.



Escalas temporales altas

Escalas temporales altas, $\tau > 20$ min: correlaciones altas y positivas que decrecen de forma exponencial con la distancia; clara dependencia con el nivel de fluctuación diaria.



③ Variabilidad de la Potencia

Dispersión espacial entre centrales

Dispersión espacial dentro de una central

Normativas de red

Normativas de red

- ▶ La **variabilidad** en escalas de tiempo bajas **puede influir** en mayor o menor medida en el **funcionamiento de la red eléctrica**.
- ▶ Existencia de **normativas y recomendaciones** para la integración de sistemas fotovoltaicos en la red.
- ▶ **Ejemplo clásico:** Autoridad Eléctrica de Puerto Rico incluye en su normativa el concepto de rampa para cuantificar las fluctuaciones admisibles:

A 10% per minute rate (based on AC contracted capacity) limitation shall be enforced. This ramp rate limit applies both to the increase and decrease of power output and is independent of meteorological conditions.

Definiciones de rampas

Uno de los problemas principales en este requerimiento (y otros similares) es que, aunque **es fácil identificar visualmente una rampa** en una serie temporal de potencia, **no existe consenso en una definición formal** que permita identificarla y cuantificarla.

Ejemplos de definiciones de rampas

- ▶ Existe una rampa al inicio de un intervalo temporal si la magnitud del cambio en un instante temporal posterior es mayor que un umbral predeterminado.

$$|P(t + \Delta_t) - P(t)| > \psi$$

- ▶ Existe una rampa en un intervalo temporal si la diferencia entre los valores máximo y mínimo supera un determinado umbral.

$$\max(\{P_t : t = t_0, \dots, t_0 + \Delta_t\}) - \min(\{P_t : t = t_0, \dots, t_0 + \Delta_t\}) > \psi$$

- ▶ Existe una rampa dentro de un intervalo si el ratio entre el valor absoluto de la diferencia entre las medidas de potencia en dos instantes temporales, y la longitud del intervalo supera un determinado umbral.

$$\frac{|P(t + \Delta_t) - P(t)|}{\Delta_t} > \psi$$

- ▶ Existe una rampa en un intervalo si el valor absoluto de la señal de diferencias filtrada (por ejemplo, mediante una media móvil) supera un determinado umbral.

- ① Introducción
- ② Incertidumbre y Predicción
- ③ Variabilidad de la Potencia
- ④ **Sistemas de Acumulación**

④ Sistemas de Acumulación

Fundamentos

Cálculo del sistema de acumulación

Tecnologías de acumulación

Limitación de rampas

La limitación de las rampas de los sistemas fotovoltaicos es un requerimiento que se debe afrontar, principalmente en el caso de las centrales fotovoltaicas de gran tamaño.

Existen **tres estrategias** principales:

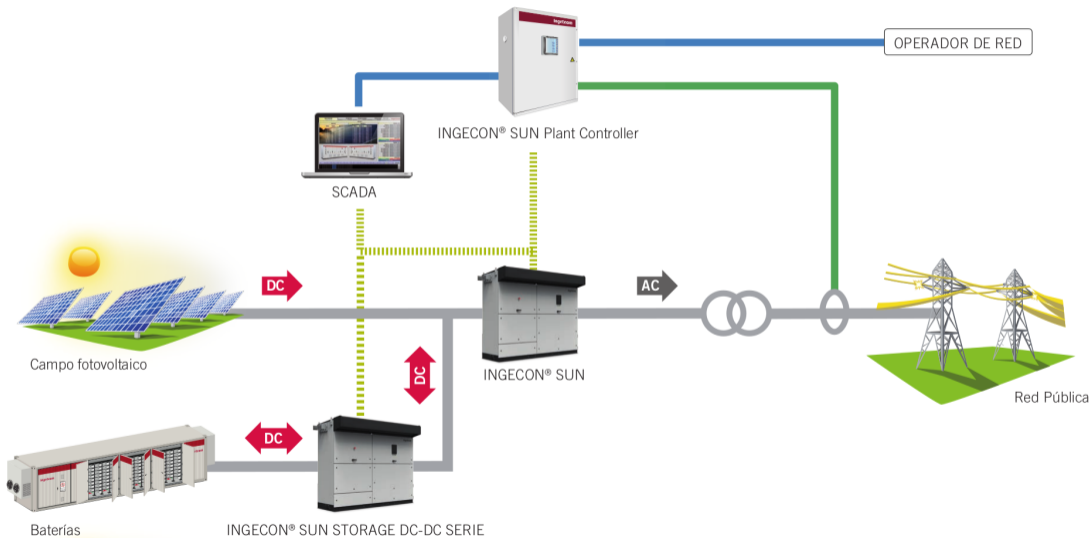
- ▶ el uso de **sistemas de acumulación** energética;
- ▶ **acumulación** energética combinada **con predicción** de rampas;
- ▶ **predicción** de rampas **sin acumulación**.

Acumulación o predicción

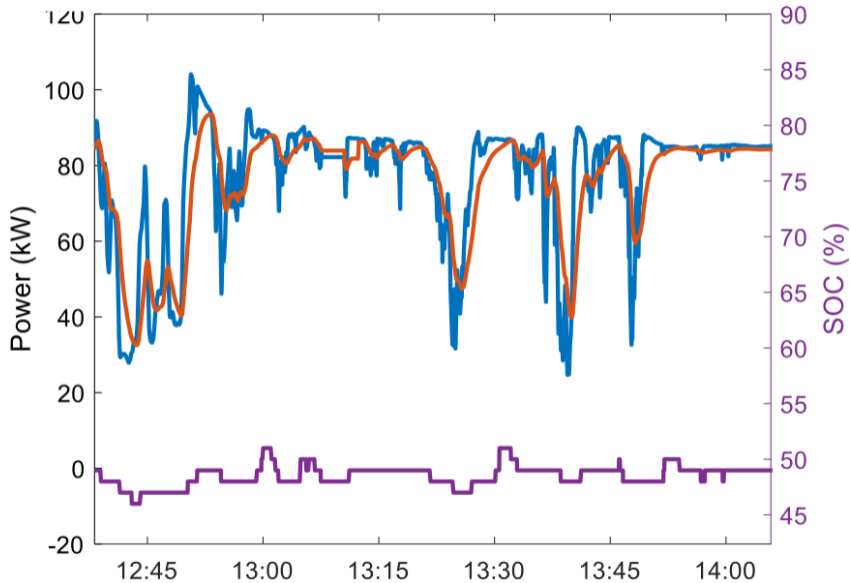
La inclusión de sistemas de acumulación conlleva **aumentos en los costes** de instalación y en la **complejidad y mantenimiento** del sistema.

Las herramientas de **predicción** de rampas combinadas con **mecanismos de control en el inversor** fotovoltaico permiten **reducir** el tamaño de la acumulación necesaria.

SFCR con acumulación



Suavizado de rampas con acumulación



④ Sistemas de Acumulación

Fundamentos

Cálculo del sistema de acumulación

Tecnologías de acumulación

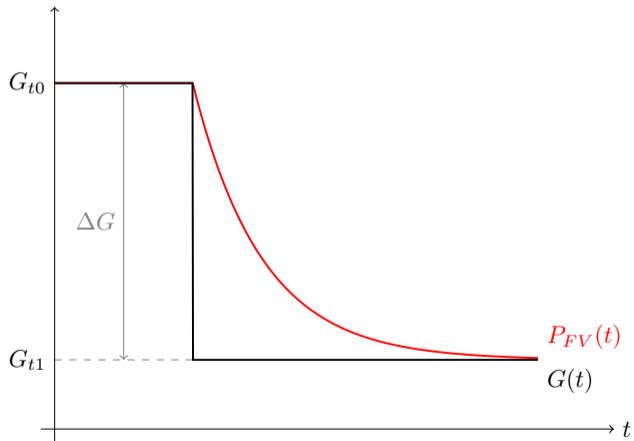
Objetivos

Objetivos

- ▶ Dimensionar, en **potencia y energía**, la batería mínima necesaria.
- ▶ **Desarrollar estrategias de gestión** que permitan, cumpliendo con la rampa máxima, minimizar el coste de la energía:
 - ▶ Minimizar Batería
 - ▶ Minimizar Degradación
 - ▶ Minimizar Pérdidas

Modelo de la peor fluctuación*

Un pulso de irradiancia se transforma en una exponencial decreciente (la central actúa como filtro paso bajo).

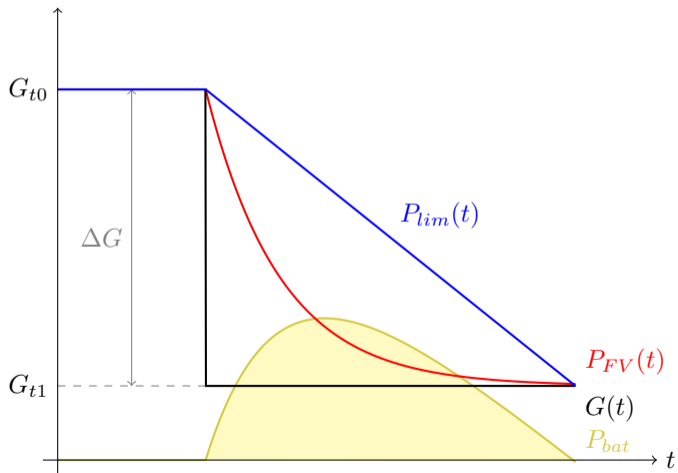


*<https://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2013.10.037>

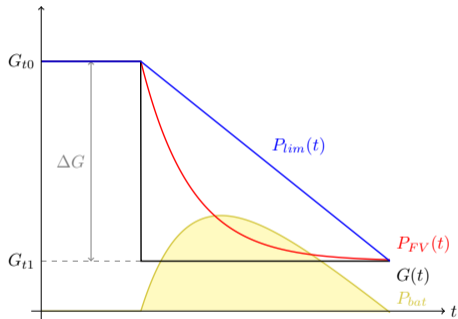
Modelo de la peor fluctuación (2)

El sistema de acumulación regula la potencia de salida para limitar la rampa.

$$P_{bat} = P_{lim} - P_{FV}$$



Modelo de la peor fluctuación (3)

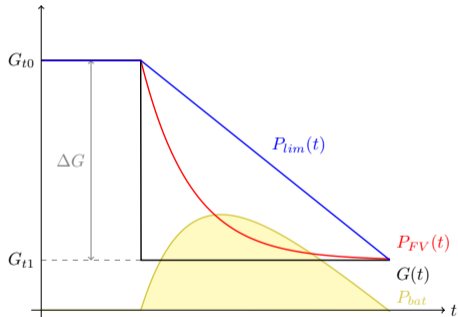


$$P_{FV}(t) = 90 \cdot \exp(-t/\tau) + 10$$

$$\tau = a \cdot L_{min} - b$$

- ▶ τ [s]: constante de tiempo de la fluctuación
- ▶ L_{min} [km]: dimensión menor de la central

Modelo de la peor fluctuación (y 4)



$$P_{bat,max} = \frac{P_g^*}{100} \cdot \left(90 - \tau \cdot RR_{max} \cdot \left(1 + \ln \frac{90}{\tau \cdot RR_{max}} \right) \right)$$

$$E_{bat} = \frac{0.9 \cdot P_g^*}{3600} \cdot \left(\frac{90}{2 \cdot RR_{max}} - \tau \right)$$

- ▶ P_g^* [kW]: potencia del generador fotovoltaico
- ▶ RR_{max} [%/sec]: límite de rampa en potencia
- ▶ $P_{bat,max}$ [kW]: potencia máxima del sistema de acumulación
- ▶ E_{bat} [kWh]: capacidad del sistema de acumulación.

Ejemplo: cálculo de potencia

Datos:

$$P_g^* = 38,5 \text{ MW}$$

$$L_{min} = 1,786 \text{ km}$$

$$a = 42$$

$$b = 0,55$$

$$RR_{max} = 10 \%/min$$

Resultados:

$$\tau = 42 \cdot 1,786 - 0,55 = 74,46 \text{ s}$$

$$P_{bat,max} = \frac{38500}{100} \cdot \left(90 - 74,46 \cdot (10/60) \cdot \left(1 + \ln \frac{90}{74,46 \cdot (10/60)} \right) \right) = 20,4 \text{ MW}$$

$$\frac{P_{bat,max}}{P_g^*} = 0,53$$

Ejemplo: cálculo de capacidad

Datos:

$$P_g^* = 38,5 \text{ MW}$$

$$L_{min} = 1,786 \text{ km}$$

$$RR_{max} = 10 \text{ \% / min}$$

Resultados:

$$E_{bat} = \frac{0,9 \cdot 38\,500}{3600} \cdot \left(\frac{90}{2 \cdot (10/60)} - 74,46 \right) = 1882,05 \text{ kWh}$$

$$\frac{E_{bat}}{P_g^*} = 0,049 \text{ h}$$

④ Sistemas de Acumulación

Fundamentos

Cálculo del sistema de acumulación

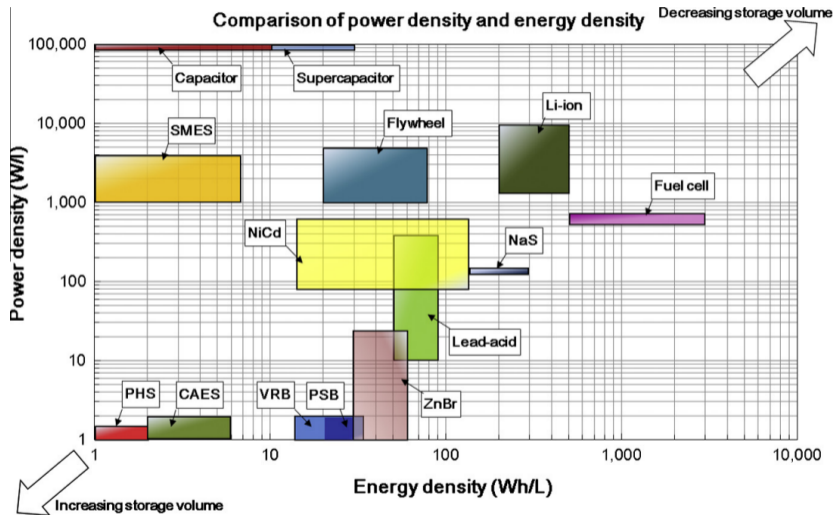
Tecnologías de acumulación

Tecnologías de acumulación*

Storage Segment	Storage Type	Storage Duration ¹	Lead-acid	Ni-Cd	Li-ion	NaS	NaNiCl ₂	Flow
Fast-acting storage	Power quality	<1 min	😊	😞	😊	😞	😞	😊
	Power system stability	1 – 15 min	😊	😊	😊	😊	😊	😊
Power storage		15 – 60 min	😊	😊	😊	😊	😊	😊
Energy storage	Daily	6 h	😊	😞	😊	😊	😊	😊
	Weekly	30 – 40 h	😞	😞	😞	😊	😊	😊
	Monthly	168-720 h	😞	😞	😞	😞	😞	😞

*EASE-EERA Energy Storage Technology Development Roadmap

Tecnologías de acumulación*



*<https://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.09.081>

Otros usos del sistema de acumulación

Los sistemas de acumulación pueden proporcionar servicios adicionales*:

- ▶ **Regulación de frecuencia:** mantener la frecuencia de la red dentro de unos límites.
- ▶ **Emulación de inercia:** evitar cambios rápidos tras una descompensación de potencia.
- ▶ **Black start:** recuperar el sistema eléctrico después de un apagón.
- ▶ **Capacity Firming:** mantener el nivel de generación durante un período de tiempo.
- ▶ **Arbitrage** o *time-shift*: comprar energía cuando es barata, vender cuando es cara.

*<https://dx.doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115213>