

Generación Eléctrica con Energías Renovables

Tema 4: Integración de GE de origen renovable

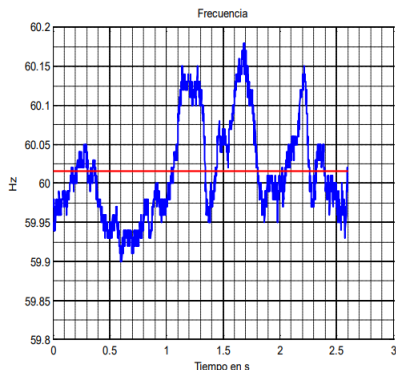
Sistema eléctrico

Cada segundo, la generación eléctrica tiene que ser igual a la demanda eléctrica para mantener la frecuencia del sistema.



Sistema eléctrico

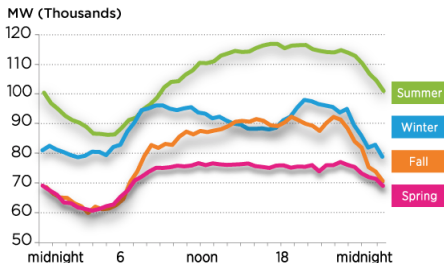
- En una red eléctrica, la frecuencia es un indicador crítico de su estabilidad y equilibrio.
- La frecuencia está relacionada con la diferencia entre la generación y la demanda de electricidad.
- Cuando la generación y la demanda no son exactamente iguales, la frecuencia de la red puede experimentar cambios.



Sistema eléctrico

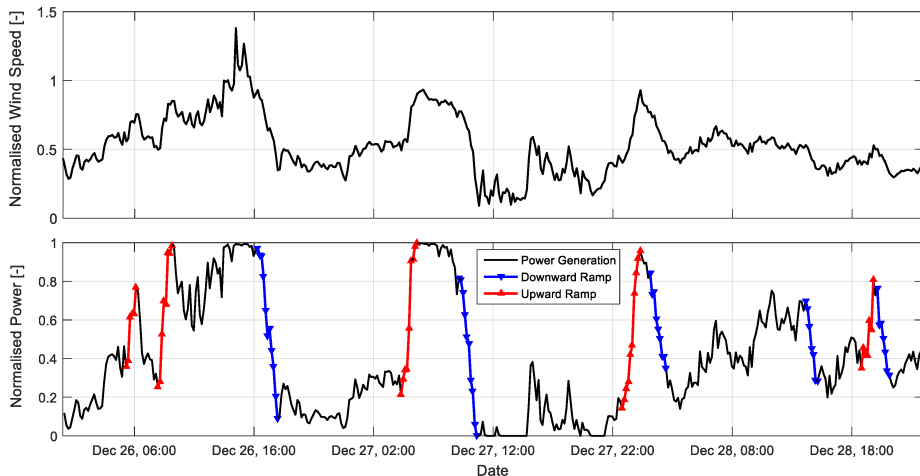
La variabilidad de la demanda eléctrica se refiere a los cambios en la electricidad requerida por los consumidores a lo largo del tiempo.

- Diaria y Estacional: La demanda eléctrica tiende a variar a lo largo del día y en diferentes estaciones del año.
- Días de la Semana: La demanda eléctrica puede variar significativamente entre días laborables y fines de semana.
- Eventos Especiales: festividades, eventos deportivos importantes o condiciones meteorológicas extremas pueden influir en la demanda.



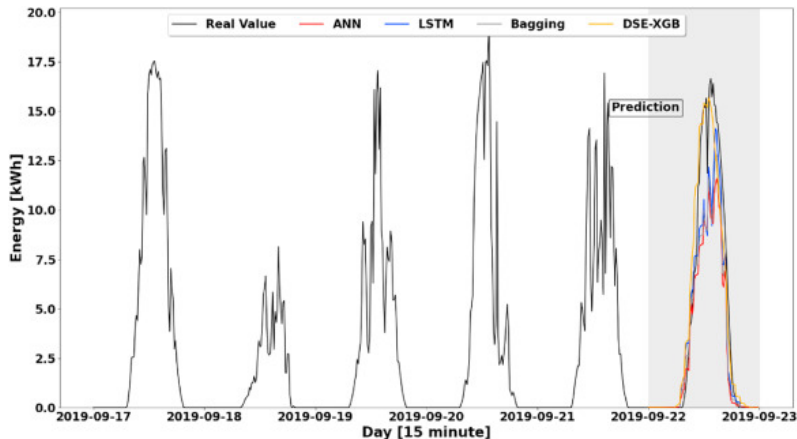
Sistema eléctrico

La generación eléctrica a partir de fuentes eólicas, o energía eólica, puede experimentar variabilidad debido a la naturaleza cambiante del viento.



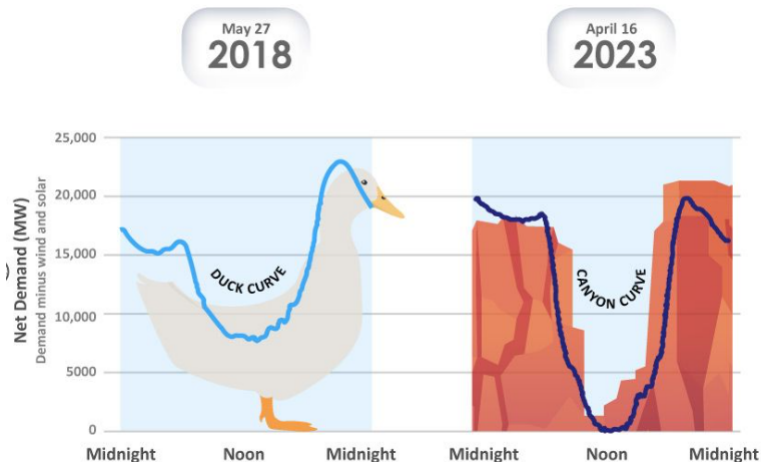
Sistema eléctrico

La generación eléctrica fotovoltaica, que utiliza paneles solares para convertir la luz solar en electricidad, también experimenta variabilidad debido a la naturaleza intermitente de la radiación solar.



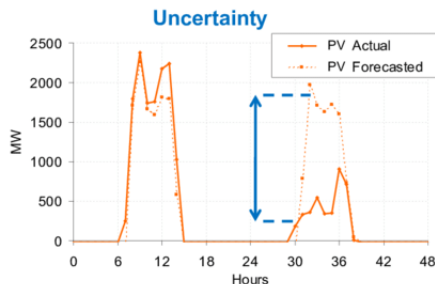
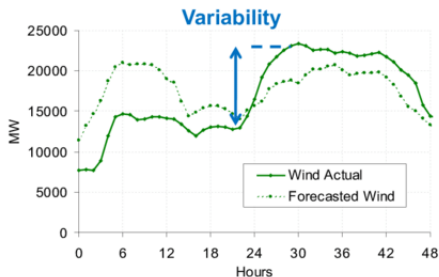
Sistema eléctrico

- Mantener el equilibrio entre generación y demanda eléctrica es cada vez más difícil...



Sistema eléctrico

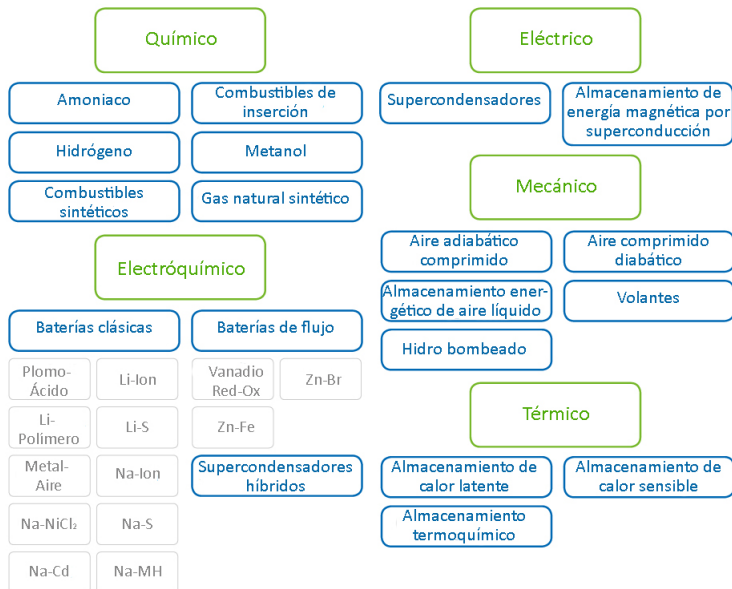
- Aparte de variable, la GE con energía renovable es también incierta.
- Variabilidad: Cambios observables y predecibles en la generación eléctrica, como patrones diarios o estacionales. Pueden anticiparse en cierta medida con análisis histórico y modelos.
- Incertidumbre: Falta de certeza o predictibilidad en la generación eléctrica, principalmente debido a eventos impredecibles, como cambios meteorológicos repentinos. Difícil de anticipar.



La integración GE de origen renovable requiere:

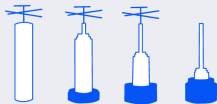
- Almacenamiento de Energía (baterías) para almacenar el exceso de energía generada.
- Redes eléctricas inteligentes (Smart Grids) que permiten una gestión más eficiente de la electricidad
- Predicción y monitoreo avanzado (inteligencia artificial, big data) para anticipar variaciones en la generación renovable.
- Respuesta a la Demanda para ajustar el consumo de electricidad en función de la disponibilidad de energía renovable.
- Flexibilidad en la Generación para adaptarse a las variaciones en la generación renovable.
- Interconexión Regional para compartir recursos renovables y equilibrar la oferta y la demanda.
- Desarrollo de Infraestructura para llevar la energía desde las zonas de generación renovable hasta los centros de demanda.

Almacenamiento de energía



Sistemas de almacenamiento energético

Almacenamiento de energía por gravedad



Centrales de bombeo reversible de agua



Baterías



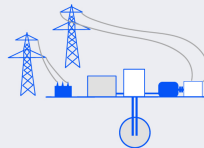
Almacenamiento de calor en masa



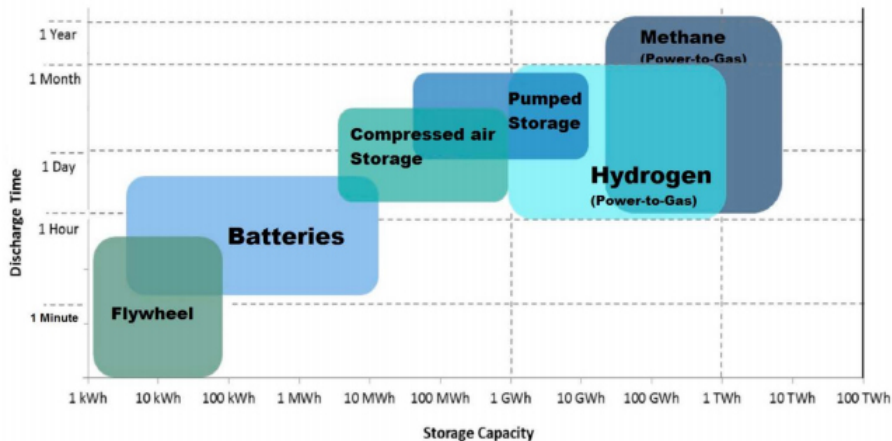
Termosolar con almacenamiento



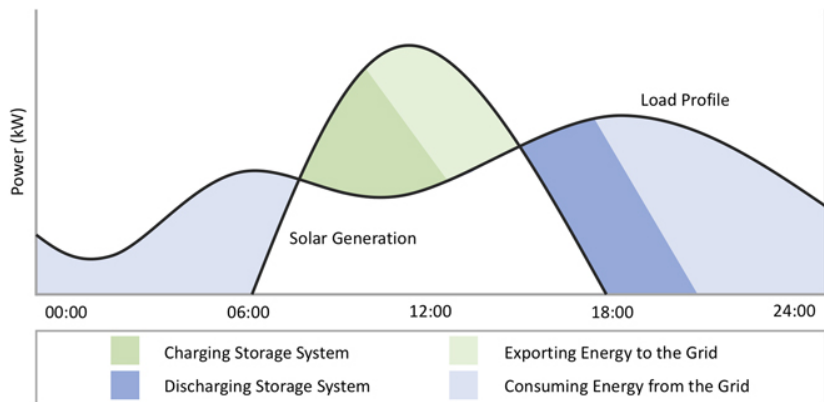
Aire comprimido



Almacenamiento de energía

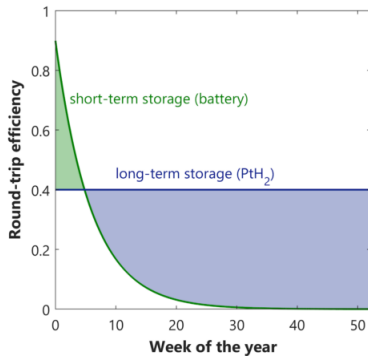
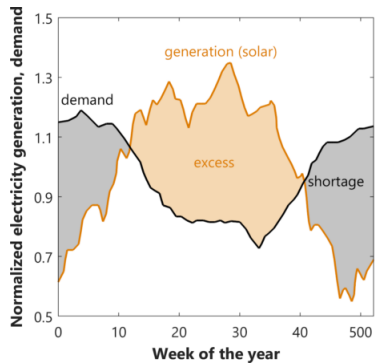


Almacenamiento de energía



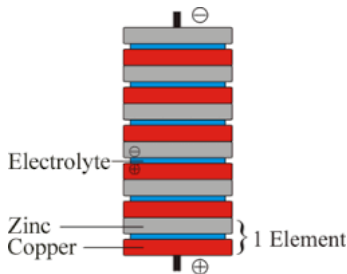
Source: Energy Transition Lab, UMN

Almacenamiento de energía



Almacenamiento de energía

- A principios del siglo XIX, Luigi Galvani observó contracciones musculares en ranas al entrar en contacto con metales. Atribuyó el fenómeno a la “electricidad animal” presente en los tejidos.
- Alessandro Volta propuso que la electricidad se generaba por la interacción entre metales diferentes, no por tejidos animales.
- En 1800, Volta desarrolló la pila voltaica, compuesta por discos de zinc y cobre separados por paños empapados en una solución salina.
- La pila generaba una corriente eléctrica continua mediante la reacción química entre los metales y la solución.

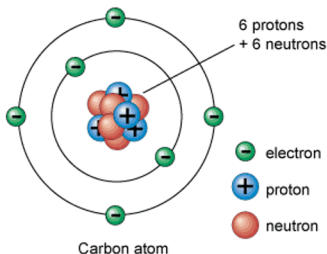


Almacenamiento de energía

Un átomo consta de varias partículas subatómicas, que incluyen:

- **Electrones:** Partículas cargadas negativamente que orbitan alrededor del núcleo del átomo.
- **Protones:** Partículas cargadas positivamente ubicadas en el núcleo del átomo.
- **Neutrones:** Partículas sin carga eléctrica ubicadas en el núcleo del átomo junto con los protones.

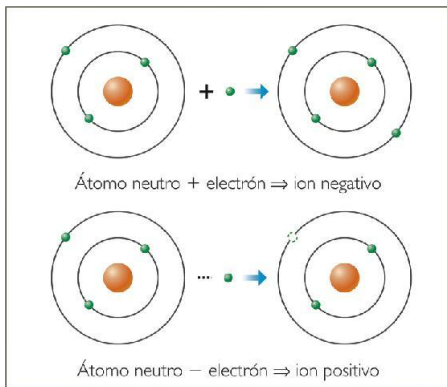
La interacción de estas partículas subatómicas dentro del átomo determina sus propiedades y comportamiento químico.



Almacenamiento de energía

Formación de Iones:

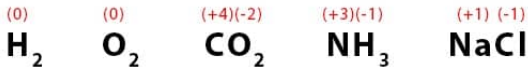
- Cuando un átomo gana o pierde electrones, se convierte en un ion.
- **Cationes:** Átomos que han perdido electrones y tienen carga positiva.
- **Aniones:** Átomos que han ganado electrones y tienen carga negativa.



Almacenamiento de energía

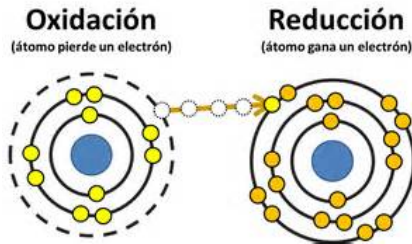
- El estado de oxidación es una medida de la pérdida o ganancia de electrones por parte de un átomo en un compuesto químico.
- El estado de oxidación de un átomo en su forma elemental es 0.
- Ejemplo: En el agua (H_2O), el estado de oxidación del oxígeno es -2, mientras que el estado de oxidación del hidrógeno es +1.
- La suma de los estados de oxidación en un compuesto debe ser igual a la carga total del compuesto.

NÚMERO DE OXIDACIÓN



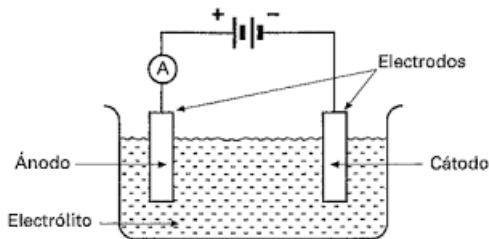
Almacenamiento de energía

- Se denomina reacción de reducción-oxidación (rédox) a toda reacción química en la que uno o más electrones se transfieren entre los reactivos, provocando un cambio en sus estados de oxidación.
- Para que exista una reacción de reducción-oxidación, en el sistema debe haber un elemento que ceda electrones, y otro que los acepte:



Almacenamiento de energía

- El **ánodo** es el electrodo donde ocurre la oxidación durante una reacción electroquímica.
- El **cátodo** es el electrodo donde ocurre la reducción durante una reacción electroquímica.
- El **electrolito** es una sustancia que permite la conducción de iones entre el ánodo y el cátodo.
- En una celda de batería, el ánodo y el cátodo están sumergidos en un **electrolito**.



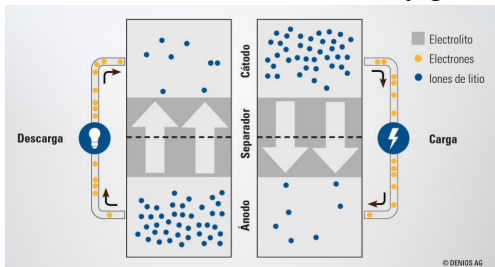
Almacenamiento de energía

Descarga de Batería:

- Durante la descarga, la batería suministra energía al circuito externo.
- En el ánodo, los iones se oxidan y liberan electrones al circuito.
- En el cátodo, los electrones fluyen desde el circuito externo y se combinan con los iones, completando el circuito.

Carga de Batería:

- Durante la carga, una corriente eléctrica externa se aplica a la batería.
- En el cátodo, los iones se oxidan y liberan electrones.
- En el ánodo, los iones se reducen y ganan electrones.



Almacenamiento de energía

- **Baterías de Ion de Litio (Li-ion):**
 - Alta densidad de energía.
 - Utilizadas en dispositivos electrónicos y vehículos eléctricos.
- **Baterías de Plomo-Ácido:**
 - Coste relativamente bajo.
 - Utilizadas en arranque de automóviles y sistemas de respaldo.
- **Baterías de Níquel-Cadmio (Ni-Cd):**
 - Ciclos duraderos, pero preocupación por la toxicidad del cadmio.
 - Aplicaciones en herramientas eléctricas y dispositivos médicos.
- **Baterías de Níquel-Metal Hidruro (Ni-MH):**
 - Mayor capacidad que las baterías de Ni-Cd.
 - Menos tóxicas.
- **Baterías de Polímero de Litio (Li-Po):**
 - Similar a las baterías de ion de litio, pero con formato flexible.
 - Utilizadas en dispositivos pequeños y vestibles.
- **Baterías de Sodio-Ión:**
 - Alternativa a las baterías de litio, más económicas.

Almacenamiento de energía



Plomo-ácido Ciclo Profundo
(electrolito líquido)



Plomo-ácido sellada
(AGM 6V o 12V)



Plomo-ácido sellada
(GEL 12V)



Plomo-ácido sellada
(OPzV 2V)



Plomo-ácido abierta
(OPzS 2V)



Litio LFP (12,8V)



Litio LFP (24V)



Redflow ZBM 48V



Solución salina concentrada
(Aquion, 48V)



Níquel-hierro
(1,2V)

Almacenamiento de energía

- La tensión nominal de una batería indica la diferencia de potencial eléctrico entre sus terminales cuando está completamente cargada.
- La capacidad de una batería se mide en Ah o Wh y representa la cantidad total de carga que puede entregar.
- La cantidad de ciclos completos de carga y descarga que puede realizar antes de que su rendimiento disminuya significativamente.
- La corriente máxima que puede suministrar sin dañarse.
- La eficiencia se refiere a la proporción de la energía que se conserva durante los procesos de carga y descarga en comparación con la energía total suministrada.
- La autodescarga es la tasa a la cual una batería pierde carga cuando no está en uso.
- La temperatura de operación para un rendimiento eficiente.

Almacenamiento de energía

Tipo de Batería	Plomo-ácido	Ni-Cd	Ni-MH	Li-ion
Densidad de Energía (Wh/kg)	30-50	45-80	60-120	110-160
Densidad de Potencia	180	150	250-1000	1800
Voltaje Nominal (V)	2	1,25	1,25	3,6
Temperatura de funcionamiento (°C)	60	(-20) -60	(-20)-60	(-20)-60
Ciclo de Vida	200-300	1500	300-500	500-1000
Eficiencia de Carga (%)	79	-	-	100
Eficiencia Energética (%)	70	60-90	75	80
Tolerancia de Sobrecarga	Alta	Moderado	Baja	Muy Baja
Autodescarga	Baja	Moderado	Alta	Muy Baja
Estabilidad Térmica	Menos estable	Menos estable	Menos estable	Más estable

Modelo Matemático Almacenamiento Energía

Para modelar matemáticamente la operación de una batería necesitamos los siguientes parámetros y variables.

Parámetros:

$\overline{P}_c$	Potencia máxima de carga (kW)
$\overline{P}_d$	Potencia máxima de descarga (kW)
$\overline{E}$	Energía máxima almacenada (kWh)
$\underline{E}$	Energía mínima almacenada (kWh)
η_c	Eficiencia de carga (%)
η_d	Eficiencia de descarga (%)

Variables de Decisión:

$p_c(t)$	Potencia de carga (kW)
$p_d(t)$	Potencia de descarga (kW)
$e(t)$	Energía almacenada en la batería (kWh)

Las restricciones técnicas de la baterías se modelan con las siguientes igualdades y desigualdades.

Restricciones:

$$0 \leq p_c(t) \leq \overline{P}_c$$

$$0 \leq p_d(t) \leq \overline{P}_d$$

$$\underline{E} \leq e(t) \leq \overline{E}$$

$$e(t + \Delta t) = e(t) + (\eta_c p_c(t) - \frac{1}{\eta_d} p_d(t)) \cdot \Delta t$$

Modelo Matemático Almacenamiento Energía

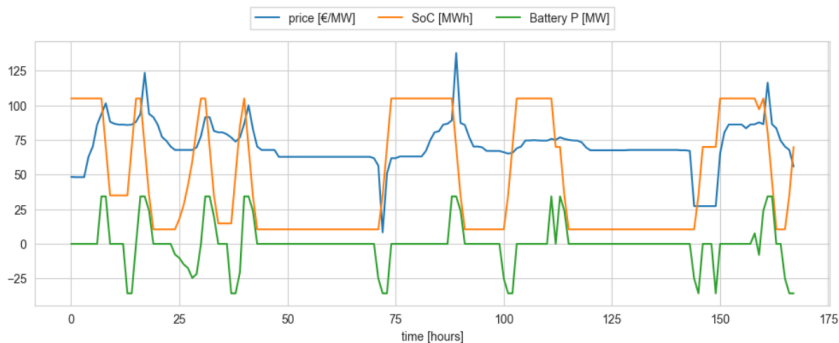
- Suponemos que tenemos una batería con una capacidad de 40MWh y una potencia de carga y descarga de 20MW.
- La eficiencia de carga y descarga es 0.9 y la energía inicial es 10MWh.
- Los precios de la electricidad en €/MWh para un horizonte de 10 horas son:

$\lambda(t)$	10	15	35	25	10	5	45	50	15	60
--------------	----	----	----	----	----	---	----	----	----	----

- Usa la hoja Excel disponible en el CV para determinar la carga y descarga de la batería para maximizar el beneficio. Teniendo en cuenta que si cargas la batería tienes que pagar por la electricidad consumida, y si descargas la batería recibes un pago por la inyección de potencia en la red.

Modelo Matemático Almacenamiento Energía

Y el problema se complica cuando se aumenta el horizonte temporal a una semana, un mes o un año.



Modelo Matemático Almacenamiento Energía

Para encontrar la mejor solución hay que resolver un problema de optimización:

$$\begin{array}{ll} \text{máx} & \text{Beneficio} \\ \text{s.t.} & \text{Restricciones técnicas de la batería} \end{array}$$

Usando los parámetros y variables definidos anteriormente y teniendo en cuenta periodos horarios:

$$\begin{array}{ll} \text{máx}_{p_c(t), p_d(t), e(t)} & \sum_{t=1}^{10} \lambda(t)(p_d(t) - p_c(t)) \\ \text{s.t.} & 0 \leq p_c(t) \leq \overline{P}_c \\ & 0 \leq p_d(t) \leq \overline{P}_d \\ & \underline{E} \leq e(t) \leq \overline{E} \\ & e(t+1) = e(t) + \eta_c p_c(t) - \frac{1}{\eta_d} p_d(t) \end{array}$$

El método de carga CC-CV (Corriente Constante - Voltaje Constante) es una estrategia comúnmente utilizada para cargar baterías de ion de litio.

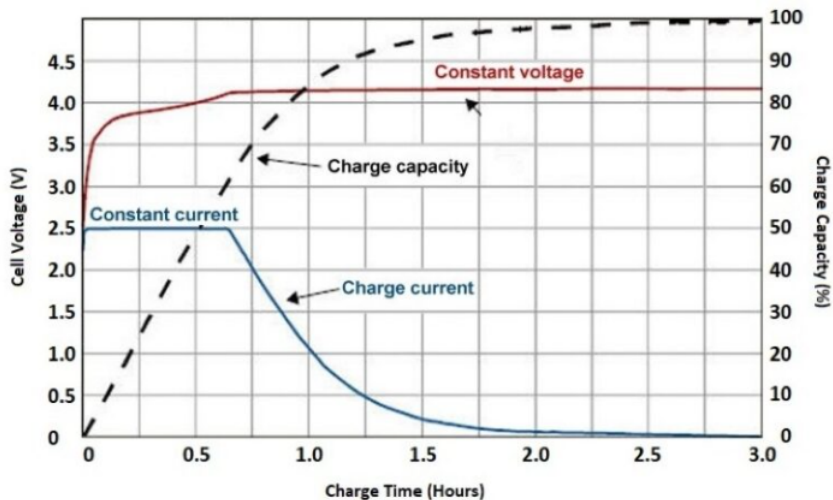
■ Corriente Constante (CC):

- Se suministra una corriente constante a la batería.
- La batería se carga hasta alcanzar un voltaje específico por celda (aproximadamente 4.2 voltios para baterías de ion de litio).

■ Voltaje Constante (CV):

- Después de alcanzar el voltaje máximo, se cambia a una fase de voltaje constante.
- Se mantiene el voltaje constante mientras la corriente disminuye gradualmente.
- La batería se carga completamente hasta que la corriente alcanza un valor muy bajo o cero.

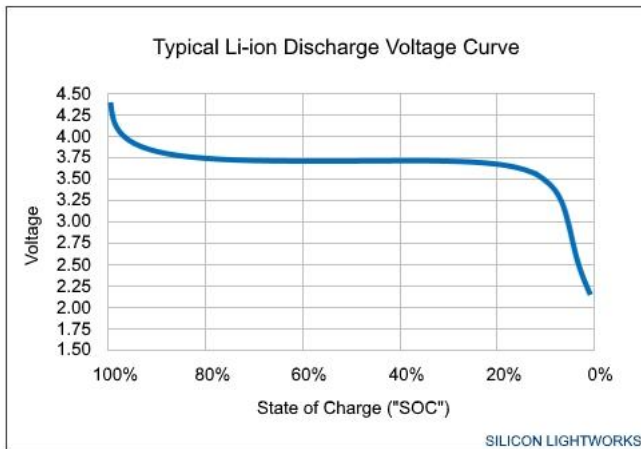
Almacenamiento de energía



La descarga de una batería tiene también diferentes fases:

- **Inicio de la Descarga:** La batería está completamente cargada, máxima tensión.
- **Fase Plana (Descarga Constante):** Tensión relativamente constante durante la descarga inicial.
- **Declinación Gradual:** Gradual disminución de la tensión a medida que se suministra más energía.
- **Caída Rápida al Final de la Descarga:** Tensión cae rápidamente cerca del final de la descarga.
- **Fin de la Descarga:** Batería considerada descargada cuando alcanza el nivel mínimo de tensión.

Almacenamiento de energía



La tasa de descarga es la velocidad a la cual la electricidad se extrae de una batería. Esta tasa de descarga puede tener un impacto notable en la curva de descarga de la batería.

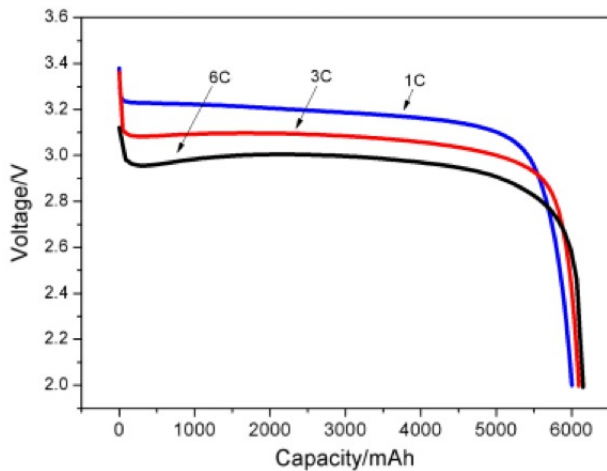
■ Tasa de Descarga Baja:

- Corriente suave extraída de la batería.
- Curva de descarga con caída gradual de la tensión.
- Tensión más estable a tasas de descarga más bajas.

■ Tasa de Descarga Alta:

- Corriente intensa extraída de la batería.
- Curva de descarga con caída más pronunciada de la tensión.
- Resistencia interna puede causar mayor pérdida de voltaje.

Almacenamiento de energía



La temperatura tiene un impacto significativo en la curva de descarga.

■ Temperatura Baja:

- Actividad química disminuye.
- Velocidad de reacción química más lenta.
- Reducción de la capacidad utilizable y caída pronunciada de la tensión.

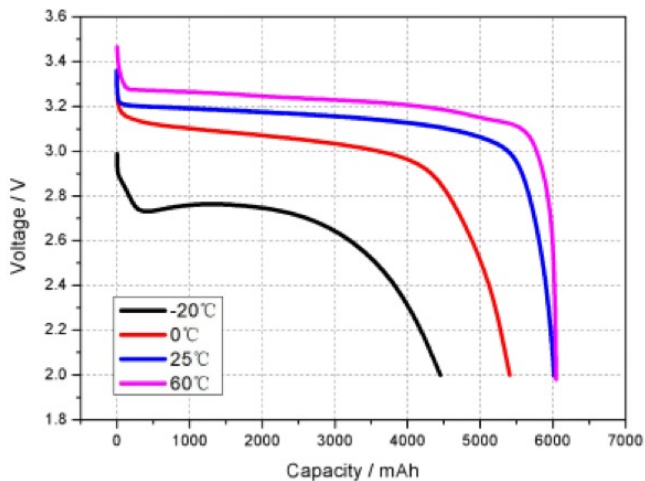
■ Temperatura Óptima:

- Existe una temperatura óptima para el rendimiento máximo.
- Mejor rendimiento con una curva de descarga suave y mayor eficiencia.

■ Temperatura Alta:

- Actividad química aumenta.
- Riesgo de degradación más rápida de los materiales.
- Puede conducir a una reducción de la vida útil de la batería.

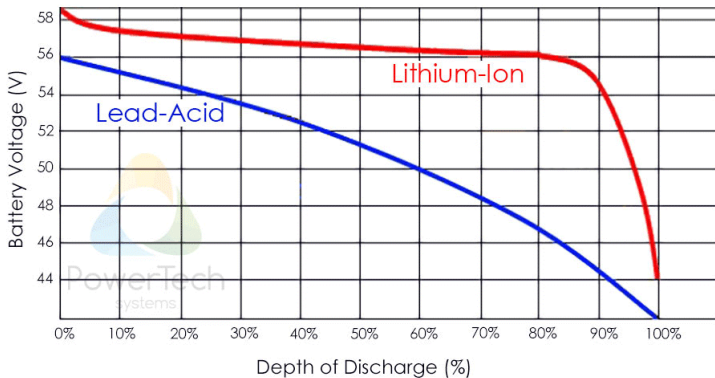
Almacenamiento de energía



Almacenamiento de energía

Baterías diferentes pueden tener diferentes características de descarga en función de su química y diseño.

Discharge curve : Lithium-Ion vs Lead Acid

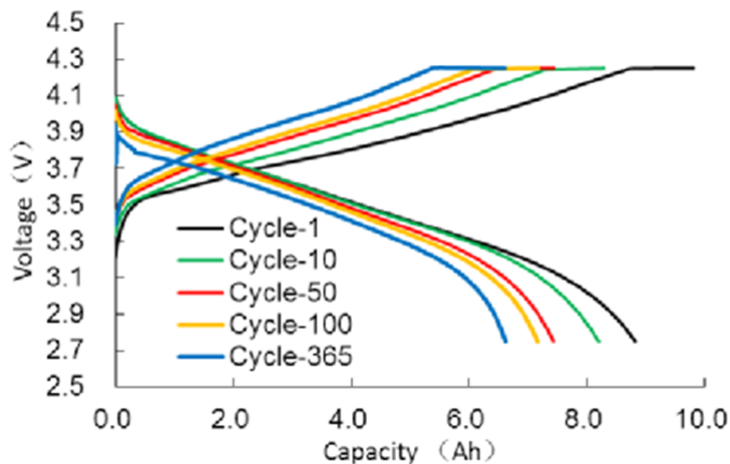


Almacenamiento de energía

El número de ciclos de carga y descarga tiene un impacto significativo en el rendimiento y la vida útil de una batería.

- Con cada ciclo, la batería se degrada debido a la formación de películas sólidas y cambios internos contribuyen a la degradación.
- La capacidad utilizable disminuye con el número de ciclos.
- La cantidad de carga que puede almacenar se reduce con el tiempo.
- La resistencia interna tiende a aumentar con los ciclos.
- Caída más pronunciada de la tensión durante la descarga.
- Ciclos a temperaturas extremas aceleran la degradación.

Almacenamiento de energía



- La eficiencia de una batería se define como la proporción entre la energía eléctrica liberada durante la descarga y la energía eléctrica total suministrada durante la carga.
- Hay varias fuentes de pérdida de energía durante el ciclo de carga y descarga debido a la resistencia interna de la batería, reacciones químicas no reversibles, calor generado, etc.
- La eficiencia nominal representa la eficiencia ideal bajo condiciones óptimas. La eficiencia real puede ser inferior.
- La eficiencia puede variar con el ritmo de carga y descarga.
- Sistemas de gestión de baterías (BMS) pueden optimizar la carga y descarga para mejorar la eficiencia.

Almacenamiento de energía

La eficiencia también depende del tipo de batería.

Battery Round Trip Efficiency Chart			
100Ah Batteries	Amp hours Removed	Amp hours needed to Recharge	Efficiency
Salt Water	100	120-130	70-80%
Nickle Iron	100	120-130	70-80 %
Flooded	100	115-118	82-85%
AGM	100	108-112	88-92%
Lead Carbon	100	105-110	90-95%
Lithium	100	104-108	92-96%

Almacenamiento de energía

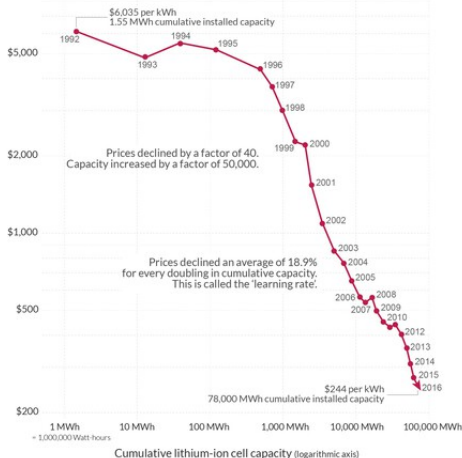
El gráfico que muestra cómo se ha desplomado el precio de las baterías de iones de litio en las últimas décadas

Price and market size of lithium-ion batteries since 1992

Our World
in Data

Price per kilowatt-hour; kWh (logarithmic axis)

\$10,000



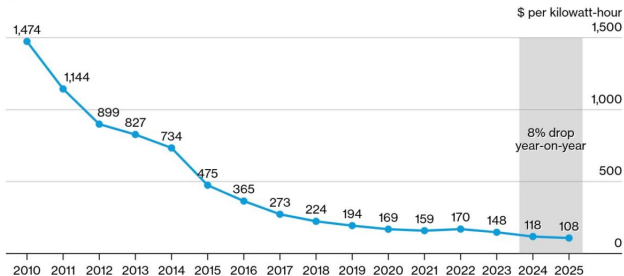
Prices are adjusted for inflation and given in 2018 US \$ per kilowatt-hour (kWh).
Source: Micah Ziegler and Jessica Franck (2021). Re-examining rates of lithium-ion battery technology improvement and cost decline.

Almacenamiento de energía

El gráfico que muestra cómo se ha desplomado el precio de las baterías de iones de litio en los años más recientes

Lithium-ion battery pack prices

Volume-weighted average in real 2025 dollars

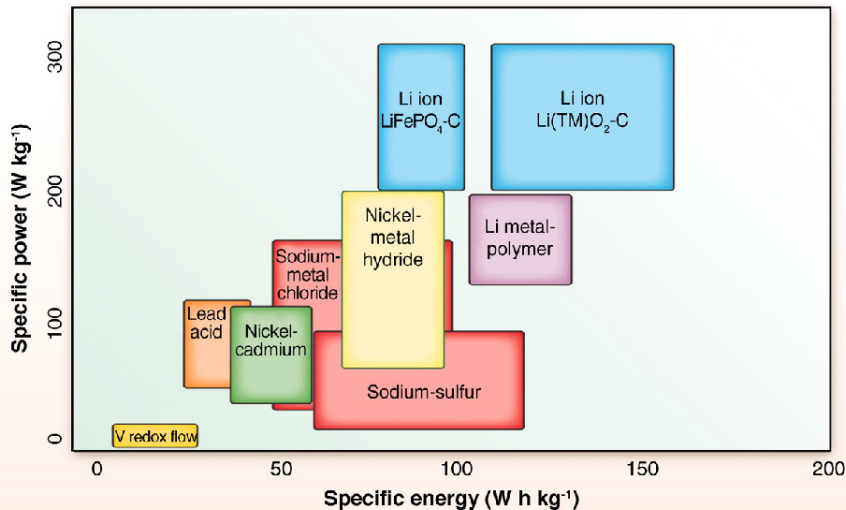


Source: BloombergNEF

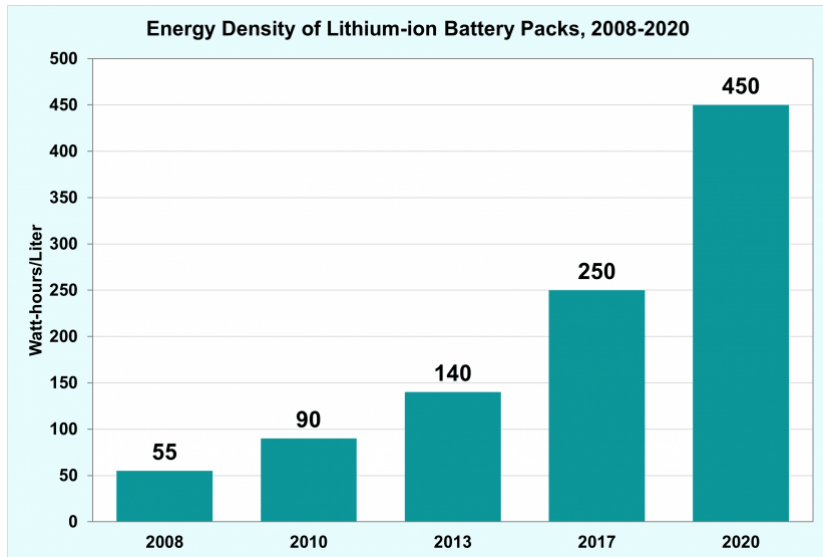
Note: Historical data has been adjusted to real 2025 dollars. Sectors include passenger cars, buses, commercial vehicles, two- and three-wheelers and stationary storage.

BloombergNEF

Almacenamiento de energía

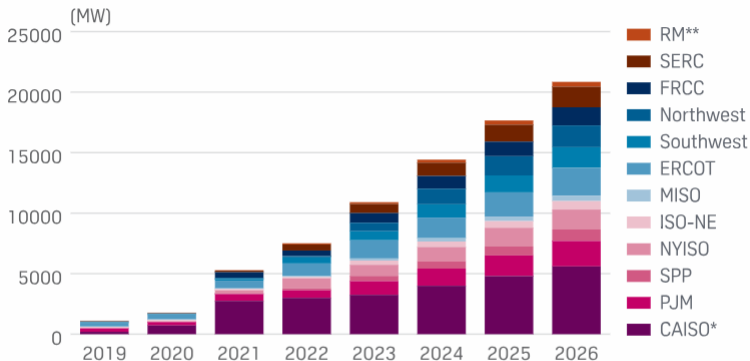


Almacenamiento de energía



Almacenamiento de energía

Grid-level battery storage projected to rise



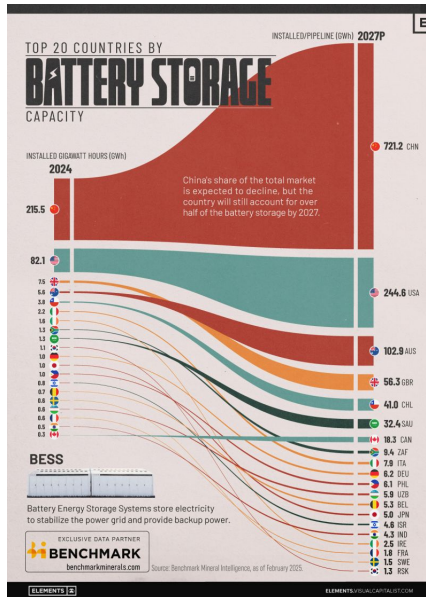
As of April 2021.

* Includes behind-the-meter systems

** Rocky Mountain Reserve Sharing Group

Source: S&P Global Platts, S&P Global Market Intelligence, S&P Global Platts Analytics
Future Energy Outlooks, U.S. Power Storage Outlook

Almacenamiento de energía



Almacenamiento de energía

En 2020 la batería de litio más grande del mundo en 2020 es de Tesla, se encuentra en Hornsdale Power Reserve (Australia Occidental) y tiene una capacidad de 150 MW (o 193,5 MWh).



Almacenamiento de energía

Noticia 01/12/2025: RWE construirá en Pembroke (Gales) su mayor sistema de almacenamiento en baterías del Reino Unido: una instalación de 350 MW de potencia y 700 MWh de capacidad, basada en 212 contenedores de baterías de ion-litio y situada en un área de 5,1 ha junto a la central de Pembroke.



Almacenamiento de energía

Noticia 08/12/2025: China pone en marcha el mayor sistema de almacenamiento en baterías independiente del país. Se trata de una instalación de 500 MW de potencia y 2.000 MWh de capacidad, basada en baterías de litio-ferrofosfato. El proyecto, ubicado en Tongliao (Mongolia Interior), ha entrado en operación comercial tras cinco meses de construcción, con una inversión total de 1,5 mil millones de CNY (212,2 millones USD). Está diseñado para servicios de *peak shaving* y para facilitar la integración de energías renovables.



Almacenamiento de energía

Noticia 07/12/2025: Se inaugura oficialmente el *Melbourne Renewable Energy Hub*, el mayor proyecto de baterías actualmente operativo en la red principal de Australia (National Electricity Market). El sistema cuenta con 600 MW de potencia y 1.600 MWh de capacidad, y está ubicado en un punto estratégico donde confluyen varias líneas de transmisión críticas en el estado de Victoria. El proyecto, propiedad de SEC y Equis Australia, consta de tres baterías de 200 MW cada una (dos con 2 horas y una con 4 horas de almacenamiento) y permitirá absorber excedentes solares y eólicos durante el día para desplazar energía a las horas punta vespertinas. La inversión total asciende a 1.200 millones de dólares australianos.



Un problema de optimización se formula como:

$$\begin{array}{ll} \min_{x \in \mathbb{R}^n} & f_0(x) \\ \text{s.t.} & f_i(x) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m \\ & h_i(x) = 0, \quad i = 1, \dots, p \end{array}$$

where

$f_0(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ (función objetivo)

$f_i(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ (restricción de desigualdad)

$h_i(x) : \mathbb{R}^n \rightarrow \mathbb{R}$ (restricción de igualdad)

Ejemplo 1

$$\begin{array}{ll} \underset{x}{\text{mín}} & 2x^2 - 8x + 3 \\ \text{s.t.} & x \in \mathbb{R} \end{array}$$

Ejemplo 2

$$\begin{array}{ll} \underset{x}{\text{mín}} & 2x^2 - 8x + 3 \\ \text{s.t.} & 3 \leq x \leq 5 \end{array}$$

Ejemplo 3

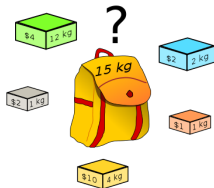
$$\begin{array}{ll} \underset{x}{\text{mín}} & 5x + 8 \\ \text{s.t.} & x \in \mathbb{R} \end{array}$$

Ejemplo 4

$$\begin{array}{ll} \underset{x}{\text{mín}} & 5x + 8 \\ \text{s.t.} & 3 \leq x \leq 5 \end{array}$$

Optimización

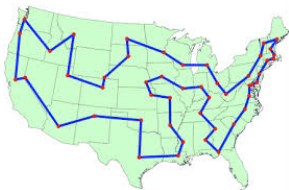
Knapsack (1897)



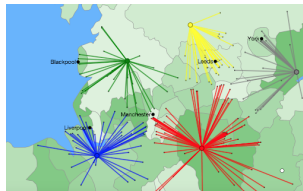
Newsvendor (1888)



Travelling salesman (1832)

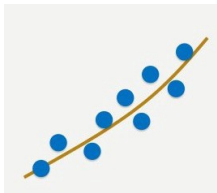


Facility location



Optimización

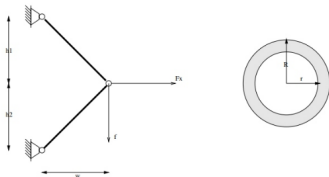
Regression



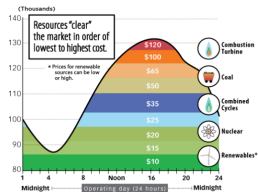
Spam emails



Structure optimization



Economic dispatch

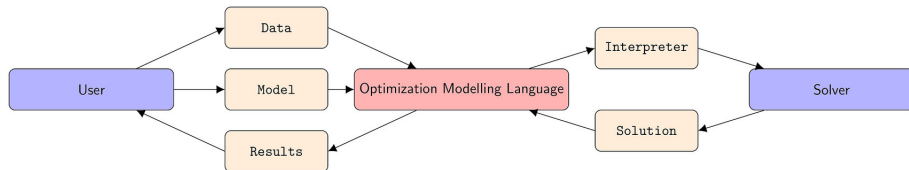


Problema de la Dieta

- En el problema de la dieta, consideramos tres tipos de alimentos. Cada alimento tiene un coste por unidad y proporciona ciertas cantidades de calorías, proteínas y grasas.

Alimento	Coste (€)	Calorías	Proteínas (g)	Grasas (g)
Pan	0.5	70	6	2
Leche	0.7	121	3	9
Queso	1.2	50	8	12

- El objetivo es minimizar el coste total de la dieta, eligiendo las cantidades óptimas de cada alimento.
- La dieta debe cumplir con los siguientes requisitos mínimos:
 - Calorías: Al menos 2000 calorías.
 - Proteínas: Al menos 55 gramos.
 - Grasas: Al menos 30 gramos.
- Formula el problema de optimización indicando claramente parámetros, variables de decisión, función objetivo y restricciones.



- **Lenguaje de Programación:** Herramienta general para escribir código que implemente modelos o algoritmos.
- **Optimization Modeling Language (OML):** Lenguaje para describir problemas de optimización que permite separar **modelo** (reglas, restricciones) y **datos** (información específica de la instancia).
- **Solver:** Software especializado en resolver problemas matemáticos de optimización.

■ MATLAB

- Toolboxes relevantes: Optimization Toolbox, Global Optimization Toolbox.
- Ideal para problemas lineales, no lineales, y simulaciones avanzadas.

■ Python

- Librerías: SciPy, PuLP, Pyomo, CVXPY.
- Integración con solvers avanzados: Gurobi, CPLEX, IPOPT.

■ Excel

- Herramienta: Solver.
- Extensión: OpenSolver para problemas más complejos.

■ **GAMS (General Algebraic Modeling System)**

- Ideal para problemas en economía, energía y optimización industrial.
- Compatible con Gurobi, CPLEX, IPOPT, entre otros.

■ **AMPL (A Mathematical Programming Language)**

- Sintaxis orientada a problemas de optimización matemática.
- Compatible con múltiples solvers.

■ **Pyomo**

- Sistema open source integrado con Python.
- Soporta solvers externos: Gurobi, CPLEX, IPOPT.

■ Gurobi

- Problemas lineales (LP), enteros (MILP), y cuadráticos (QP).
- Soporte académico gratuito.

■ CPLEX (IBM)

- Competidor directo de Gurobi, eficiente en modelos grandes.

■ IPOPT (Interior Point OPTimizer)

- Especializado en optimización no lineal (NLP).
- Open source y compatible con AMPL, Pyomo.

■ Otros: KNITRO, CBC (COIN-OR), MOSEK.

PuLP: Librería de Optimización en Python

¿Qué es PuLP?

- Una librería en Python para formular y resolver problemas de **programación lineal** (LP) y **entera mixta** (MILP).
- Compatible con solvers como CBC, Gurobi, y CPLEX.

Ventajas:

- **Fácil de usar:** Sintaxis clara e intuitiva.
- **Open source:** Gratuita y compatible con Python.
- **Ideal para enseñanza:** Perfecta para resolver problemas básicos en energía renovable.
- Integración sencilla con **Google Colab**.

Ejemplo de uso:

- Definición de variables, restricciones y función objetivo.
- Ejecución rápida en pocos pasos.

Instalación: En Google Colab, simplemente ejecuta: `!pip install pulp`

Problema de la Dieta

Usa Pulp para resolver el problema de la dieta. Indica las cantidades óptimas de cada alimento y el coste total de la dieta.

Pan	
Leche	
Queso	

Coste dieta (€)

Proyecto integración renovables

En relación con el problema de la batería del Excel, formula un problema de optimización que maximice el beneficio teniendo en cuenta las restricciones técnicas, resuélvelo con algún software de optimización, y determina la operación óptima de la batería y el beneficio obtenido.

	$t1$	$t2$	$t3$	$t4$	$t5$	$t6$	$t7$	$t8$	$t9$	$t10$
$p_c(t)$										
$p_d(t)$										
$e(t)$										

Beneficio (€)

Proyecto integración renovables

Descarga los precios de la electricidad en España para el año 2022.
Determina la operación óptima de la batería de Tesla en Australia con una capacidad de energía de 193.5 MWh, una potencia de 150 MW y una eficiencia de ciclo de 86 % ($\eta_c \cdot \eta_d$). Dibuja la operación óptima para la primera semana del año, y determina el beneficio anual obtenido.

Beneficio anual (€)

Si la vida útil de una batería de litio son 10 años, y el coste de inversión es 200€/kWh, determina el coste anual de la inversión.

Coste anual (€)

Proyecto integración renovables

Para la provincia que has seleccionado, haz una tabla en Excel para todas las horas del año de 2022 con la siguiente información:

Hora	Demanda (MW)	Viento (MW)	Solar (MW)
1			
2			
...			
8760			

Ten en cuenta lo siguiente:

- Utiliza la demanda eléctrica en España para el año 2022 disponible en el CV y redúcela proporcionalmente a la población de tu provincia.
- Los valores de generación eólica son cada media hora, para obtener la potencia horaria haz la media de los dos valores consecutivos.
- La generación eólica obtenida en el tema 2 corresponde a un único mes. Repite la serie 12 veces para obtener valores durante todo el año.
- La generación solar corresponde a la de una sola placa.

Proyecto integración renovables

- Por simplicidad, vamos a asumir que tu provincia está aislada del resto de España y, por lo tanto, no puede ni exportar ni importar potencia eléctrica. Es decir, la demanda eléctrica tiene que ser satisfecha únicamente con centrales construidas en la misma provincia.
- Vamos a suponer que la demanda va a ser cubierta por centrales de ciclo combinado con un coste de inversión de 1.5 M€/MW, una vida útil de 40 años y un coste de producción de 80 €/MWh.
- Formula el problema de optimización para minimizar costes y determina la capacidad de generación necesaria, el coste total, y el precio de la electricidad medio en todo el año.

Demanda anual (MWh)	
Capacidad c. combinado (MW)	
Coste anual (€)	
Precio electricidad (c€/kWh)	

Proyecto integración renovables

- A continuación vamos a incluir también la generación eléctrica con renovable eólica y solar. Para ello vamos a asumir que la eólica tiene un coste de inversión de 1.5 M€/MW y una vida útil de 25 años, y la solar un coste de 1 M€/MW y una vida útil de 30 años.
- Formula el problema de optimización para minimizar costes y determina la capacidad de generación fósil, eólica y solar, así como el nuevo coste y precio de la electricidad. Determina también el porcentaje de la demanda cubierta con generación eléctrica renovable.

Capacidad c. combinado (MW)	
Capacidad eólica (MW)	
Capacidad solar (MW)	
Coste anual (€)	
Precio electricidad (c€/kWh)	
Integración renovables (%)	

Proyecto integración renovables

- Sabiendo la potencia de cada aerogenerador y placa, determina el número de aerogeneradores y placas necesarias.
- Con la separación recomendada entre aerogeneradores y placas, determina la superficie de terreno necesario para la instalación de las mismas y compáralas con la superficie total de tu provincia.

Cantidad aerogeneradores	
Cantidad placas	
Superficie provincia (km ²)	
Superficie aerogeneradores (km ²)	
Superficie placas (km ²)	
Porcentaje superficie aerogeneradores (%)	
Porcentaje superficie placas (%)	

Proyecto integración renovables

- En el problema de optimización anterior se minimizaba el coste total de inversión y operación. Formula un problema en el que se maximice el porcentaje de la demanda cubierta por energías renovables.
- Determina la capacidad de generación fósil, eólica y solar, así como el nuevo coste y precio de la electricidad. Determina también el porcentaje de la demanda cubierta con generación eléctrica renovable.

Capacidad c. combinado (MW)	
Capacidad eólica (MW)	
Capacidad solar (MW)	
Coste anual (€)	
Precio electricidad (c€/kWh)	
Integración renovables (%)	

Proyecto integración renovables

- A continuación incluimos el almacenamiento de energía con baterías, con un coste de inversión de 0.8 M€/MW, una vida útil de 10 años, un tiempo de descarga de 4 horas, y una round-trip efficiency de 86 %.
- Formula un problema de optimización para minimizar costes y determina la capacidad de generación (fósil, eólica y solar) así como la capacidad de almacenamiento de energía.

Capacidad c. combinado (MW)	
Capacidad eólica (MW)	
Capacidad solar (MW)	
Capacidad batería (MW)	
Coste anual (€)	
Precio electricidad (c€/kWh)	
Integración renovables (%)	

Proyecto integración renovables

- Compara las soluciones de las situaciones anteriores y comenta los resultados.

Renovables	No	Sí	Sí
Almacenamiento	No	No	Sí
Ciclo (MW)			
Eólica (MW)			
Solar (MW)			
Batería (MW)			
Precio (c€/kWh)			
Integración (%)			

Proyecto integración renovables

- A continuación vamos a considerar dos ciudades (A y B) conectadas a través de una línea de alta tensión con un coste de 1000€/MW·km y una vida útil de 50 años.
- Formula un problema de optimización que determine la capacidad de generación (fósil, eólica y solar) en cada ciudad, la capacidad de almacenamiento, y la capacidad de transporte entre las ciudades.

	Ciudad A	Ciudad B
Capacidad c. combinado (MW)		
Capacidad eólica (MW)		
Capacidad solar (MW)		
Capacidad batería (MW)		
Capacidad línea (MW)		
Coste anual (€)		
Precio electricidad (c€/kWh)		

¿Qué son los sistemas eléctricos?

- Un sistema eléctrico es el conjunto de instalaciones y equipos necesarios para producir y transportar la energía eléctrica a los usuarios. Los elementos principales son:



Generadores



Líneas



Demanda

- Los sistemas eléctricos son **infraestructuras críticas** ya que la mayoría de actividades económicas dependen de su buen funcionamiento.
- Los sistemas eléctricos son **infraestructuras extremadamente complejas** desde el punto de vista de la ingeniería.

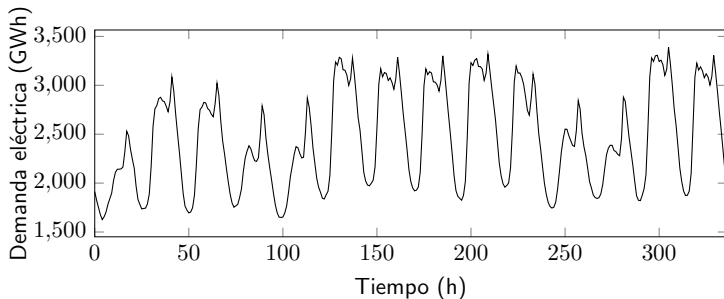
¿Por qué son tan complejos los problemas de planificación?

- Un mismo problema de optimización tiene que incluir las condiciones del sistema eléctrico durante varios años.
- Incluso considerando variables horarias, el elevado número de ecuaciones y variables hace que la carga computacional crezca significativamente.



¿Cómo se ha resuelto la planificación hasta ahora?

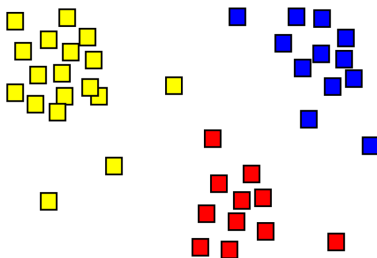
- Aprovechando el hecho de que la demanda eléctrica muestra marcados patrones diarios, semanales y anuales.



- Usando técnicas de aprendizaje estadístico como el *clustering* para agrupar periodos de tiempo y reducir el coste computacional del problema de planificación

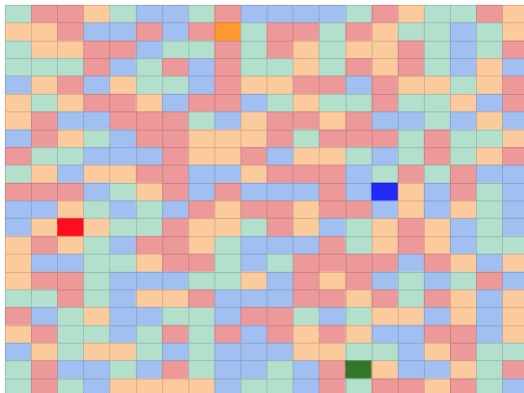
¿Y qué es eso del *clustering*?

- El *clustering* consiste en la tarea de agrupar un conjunto de objetos de tal manera que los miembros del mismo grupo (llamado *clúster*) sean más similares, en algún sentido u otro.



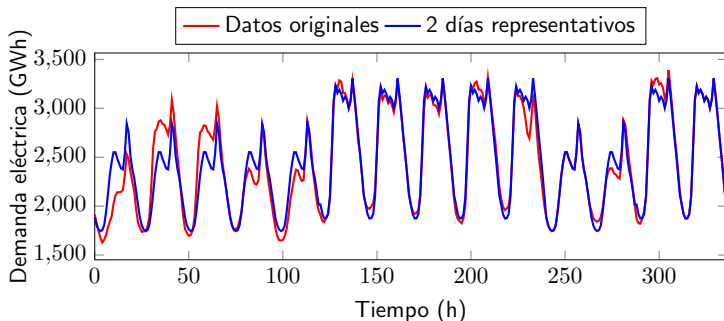
¿Cómo se usa el *clustering* en problemas de planificación?

- El enfoque más común es agrupar los días del horizonte temporal en un número reducido de *clústers* y resolver el problema de optimización considerando únicamente los días representativos.



¿Y cómo funcionan los días representativos?

- Usar días representativos funciona bastante bien como se demuestra en la siguiente figura



- Hemos pasado de 14 días (336 horas) a 2 días representativos (48 horas), reduciendo la carga computacional.

¿Y los sistemas eléctricos actuales?

- Los sistemas eléctricos actuales tienen nuevos actores



Generadores



Líneas



Demanda



Renovables

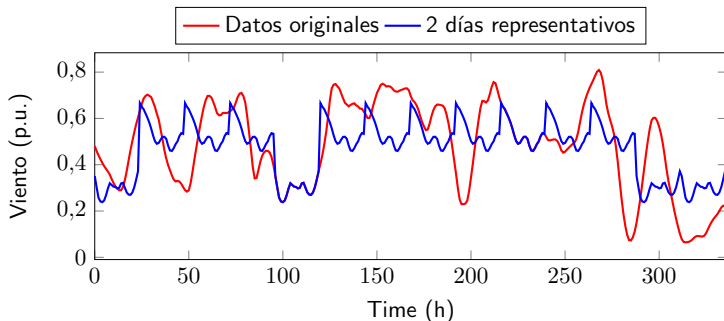


Baterías

- Las energías renovables son gratis y no contaminan
- Las energías renovables no suelen estar cuándo se les necesita
- Las baterías son el compañero perfecto para las renovables:
 - Si el viento sopla y la demanda es baja, la batería almacena energía
 - Si el viento no sopla y la demanda es alta, usamos la energía de la batería

¿Por qué no podemos seguir usando días representativos?

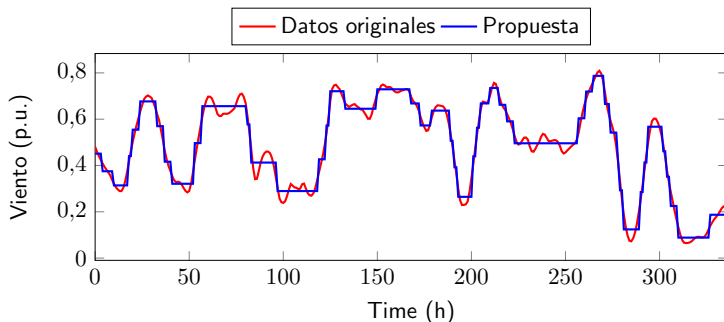
- Algunas renovables no tienen un marcado patrón diario



- La energía almacenada por algunas baterías puede ser usada varios días después

¿Qué es lo que proponéis?

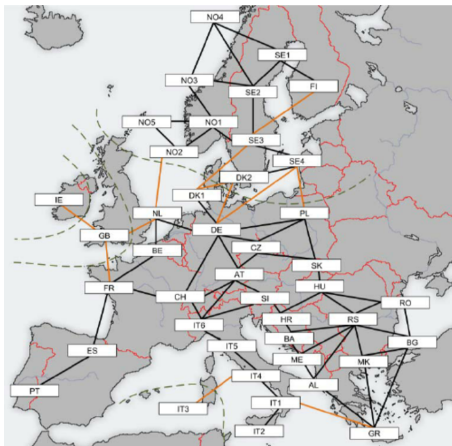
- En vez de usar días representativos, nosotros proponemos agrupar horas que sean **consecutivas**
- Si una hora y la siguiente son “parecidas”, estas dos horas son agrupadas en un único periodo de dos horas de duración



- Con solo 48 periodos conseguimos representar el viento mucho mejor
- Además, podemos modelar de manera más exacta la operación de las baterías ya que mantenemos la **cronología** de los datos

¿Lo habéis probado en un caso realista?

- Sistema eléctrico Europeo (28 países) para 2030
- Inversiones en generación convencional, generación renovable, líneas y distintas tecnologías de almacenamiento



¿Y cuáles han sido los resultados?

- En la tabla mostramos los incrementos de coste de cada metodología con respecto al caso en el que las inversiones se han decidido teniendo en cuenta las 8760 horas del año 2030.

Método	Número periodos	Incremento coste	Tiempo
Referencia	8760	0 %	~ 10 h
28 días	$28 \times 24 = 672$	13.1 %	~ 100 s
4 semanas	$4 \times 168 = 672$	48.1 %	~ 100 s
Propuesto	672	6.1 %	~ 100 s

- Con el mismo coste computacional conseguimos reducir el error de la aproximación del horizonte temporal

Chronological Time-Period Clustering for Optimal Capacity Expansion Planning With Storage

Salvador Pineda , *Member, IEEE*, and Juan M. Morales , *Senior Member, IEEE*

Abstract—To reduce the computational burden of capacity expansion models, power system operations are commonly accounted for in these models using representative time periods of the planning horizon such as hours, days, or weeks. However, the validity of these time-period aggregation approaches to determine the capacity expansion plan of future power systems is arguable, as they fail to capture properly the mid-terms dynamics of renewable power generation and to model accurately the operation of electricity storage. In this paper, we propose a new time-period clustering method that overcomes the aforementioned drawbacks by maintaining the chronology of the input time series throughout the whole planning horizon. Thus, the proposed method can correctly assess the economic value of combining renewable power generation with interday storage devices. Numerical results from a test case based on the European electricity network show that our method provides more efficient capacity expansion plans than existing methods while requiring similar computational needs.

$\bar{b}_{sn}^0$ Initial capacity of storage s at bus n (MW).
 c_g Linear cost parameter of technology g (€/MWh).
 d_{nt}^t Demand level at bus n and time period t (MW).
 $\bar{f}_{nm}^0$ Initial capacity of transmission line nm (MW).
 $f_{nm}^{\max}$ Maximum capacity of transmission line nm (MW).
 $\bar{h}_{nt}^0$ Initial hydro capacity at bus n (MW).
 $\hat{h}_n$ Maximum hydro power capacity at bus n (MW).
 i^F Investment cost of transmission lines (€/MW·Km).
 i_g^G Investment cost of technology g (€/MW).
 i^H Investment cost of hydro power capacity (€/MW).
 i_s^S Investment cost of storage s (€/MW).
 l_{nm} Length of transmission line nm (Km).
 $\bar{p}_{gn}^0$ Initial capacity of technology g at bus n (MW).
 $\bar{p}_{gn}^{\max}$ Maximum capacity of technology g at bus n (MW).

Dos profesores de la Escuela de Ingenierías Industriales de la UMA obtienen un premio Seio-Fundación BBVA

- Desarrollan un método que reduce a la mitad la carga computacional para la planificación de sistemas complejos de energía



Los profesores Juan Miguel Morales y Salvador Pineda. / M. H.

← Anuncios Google

Enviar comentarios

¿Por qué este anuncio? ▸



The OASYS Research Group started in January 2018 at the University of Málaga. OASYS addresses one of the major and most important challenges of our modern society: the development of mathematical methods and solutions to achieve more efficient, secure and sustainable energy systems. OASYS' main lines of research are:

- Design, development and implementation of mathematical algorithms and models for decision-making under uncertainty.
- Development of mathematical procedures for the use of large amounts of data in the operation and planning of Smart Energy Grids.
- Design of mathematical methods for forecasting and optimization, with a special focus on their application to sustainable energy systems.
- Development of algorithms for the efficient solution of large-scale optimization problems.
- Applications of game theory to the analysis of energy markets and the interactions among market players.