



GOBIERNO
DE ESPAÑA

MINISTERIO
DE CIENCIA
E INNOVACIÓN

Ciemat

Centro de Investigaciones
Energéticas, Medioambientales
y Tecnológicas



Unidad
de Formación



UNIVERSIDAD
DE LA REPÚBLICA
URUGUAY



TECNOLOGÍAS, OPERACIÓN Y APLICACIÓN DEL ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA EN SISTEMAS ELÉCTRICOS

23 MAYO – 03 JUNIO DE 2022

**Ejemplo práctico de dimensionado de almacenamiento de
energía 2 (renovables)**

MARCOS BLANCO AGUADO

02/06/2022

Contenidos

- 1 INTRODUCCIÓN
- 2 METODOLOGÍA DE DIMENSIONADO
- 3 PLANTEAMIENTO DE EJEMPLOS DE LA METODOLOGÍA
- 4 CASO DE ESTUDIO
- 5 EJERCICIO (EXPLICACIÓN DE ENUNCIADO Y RESOLUCIÓN)

1- INTRODUCCIÓN

1- Introducción

FUTURO DE LAS REDES ELÉCTRICAS

- ❑ Los objetivos de descarbonización a **2050** plantean un escenario de **alta penetración de energías renovables (ER)** del **64% al 97%** según el escenario [1].
 - Previsiones mundiales: energía solar - 25,2% | energía eólica - 24,8% [2-3].
- ❑ Este escenario de alta penetración de energía renovable no gestionable lleva a identificar 5 **grandes retos para la gestión de redes eléctricas** [4]
 - Disminución abrupta de generación al atardecer y la correspondiente necesidad de arranque de centrales gestionables
 - **Pérdida** de capacidad de **regulación de tensión**
 - **Pérdida de reserva de potencia** para puntas de consumo
 - **Aumento de las congestiones** del sistema de transmisión (rápido desarrollo e integración en red de ER).
 - **Reducción de la inercia** del sistema debido a la conexión de ER mediante “módulos de parque eléctrico” (electrónica de potencia)

1- Introducción

ALMACENAMIENTO EN SERVICIOS DE RED

- ❑ La futura situación de las redes eléctricas llevara a la implementación de **servicios de red avanzados** que aumenten la **flexibilidad** y la **rapidez de respuesta**, respecto a los actuales.

Estos servicios avanzados de red podrían ser suministrados por [5]:

- **Sistemas de electrónica de potencia avanzada** [6,7]
- **Sistemas de almacenamiento** (estos se consideran indispensables).

- ❑ Los servicios de red que deberían ser capaces de suministrar los sistemas de almacenamiento serían los siguientes [5,8]

- | | |
|---|--|
| ➤ Servicios auxiliares [9] | ➤ Suministro de energía reactiva para estabilidad de tensión [11] |
| ➤ Capacidad de restauración del sistema ante black-out. | ➤ Suministro rápido de energía activa para estabilidad de ángulo [7] |
| ➤ Respuesta rápida de frecuencia[10] | ➤ Suministro de inercia sintética |
| ➤ Reserva rápida de potencia | ➤ Suministro de potencia de cortocircuito |

1- Introducción

ALMACENAMIENTO EN INTEGRACIÓN DE RENOVABLES

- ❑ Aparte de la integración en la red eléctrica, también cabe **integrar los sistemas de almacenamiento en las plantas de ER**. El almacenamiento permitiría:
 - **Servicios de arbitraje** (tanto intradiario como estacional) para desacoplar generación y demanda y permitir aumentar la penetración de las ER integradas en la red eléctrica.
 - **Evitar los vertidos de energía** (*curtailment*) para poder cumplir con los requisitos de conexión a red [6, 11,13].
 - Suministro de **servicios avanzados de red** como los anteriormente mencionados [12].
- ❑ Además, los sistemas de almacenamiento deberían considerarse a la hora de planificar el desarrollo futuro de las redes eléctricas, al mismo nivel de importancia que el despliegue de líneas de transmisión [8], por lo que es necesario herramientas de planificación y optimización que contemplen el almacenamiento [4].

1- Introducción

REFERENCIAS

- [1] “El Pacto Verde Europeo|COM(2019) 640 f,” 2018, Accessed: May 26, 2020. [Online]. Available: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/ES/TXT/?uri=COM:2019:640:FIN>.
- [2] W. Nijs, P. Ruiz Castello, D. Tarvydas, I. Tsiropoulos, and A. Zucker, *Deployment Scenarios for Low Carbon Energy Technologies*, EUR 29496 EN, Publications Office of the European Union. 2018.
- [3] D. Vazquez and V. Dingenen, “Global Energy and Climate Outlook 2019 : Electrification for the low-carbon transition,” European Commision JRC, 2020. doi: 10.2760/58255.
- [4] **ENTSOE, “NETWORK DEVELOPMENT ENFORCEMENT AND INCENTIVES - Advocacy Paper,” 2019.**
- [5] “ENERGY STORAGE AND STORAGE SERVICES - ENTSO-E Position,” 2016. [Online]. Available: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/Publications/Position papers and reports/entsoe_pp_storage_web.pdf.
- [6] J. McLaren, “ADVANCED INVERTER FUNCTIONS TO SUPPORT HIGH LEVELS OF DISTRIBUTED SOLAR - POLICY AND REGULATORY CONSIDERATIONS,” 2014.
- [7] M. Ndreko, S. Rüberg, and W. Winter, “Grid Forming Control for Stable Power Systems with up to 100 % Inverter Based Generation: A Paradigm Scenario Using the IEEE 118-Bus System,” 2018.
- [8] ENTSOE, “PowerFacts Europe 2019,” 2019.
- [9] “A1-Appendix 1: Load-Frequency Control and Performance [E].” Accessed: Nov. 24, 2020. [Online]. Available: https://eepublicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/pre2015/publications/entsoe/Operation_Handbook/Policy_1_Appendix_final.pdf.
- [10] J. I. Sarasúa, G. Martínez-Lucas, and M. Lafoz, “Analysis of alternative frequency control schemes for increasing renewable energy penetration in El Hierro Island power system,” *Int. J. Electr. Power Energy Syst.*, vol. 113, pp. 807–823, Dec. 2019, doi: 10.1016/j.ijepes.2019.06.008.
- [11] Comisión Europea, “Reglamento (UE) 2016/631 de la Comisión de 14 de abril de 2016 que establece un código de red sobre requisitos de conexión de generadores a la red,” *D. Of. la Unión Eur.*, no. 112, 27 de abril, pp. 1–68, 2016.
- [12] J.-M. Durand, M. J. Duarte, and P. Clerens, “European Energy Storage technology Development Roadmap towards 2030,” 2013.
- [13] V. Gevorgian and S. Booth, “Review of PREPA Technical Requirements for Interconnecting Wind and Solar Generation,” 2013. Accessed: Nov. 24, 2020. [Online]. Available: www.nrel.gov/publications.

2 - METODOLOGÍA

2 - Metodología: Diseño basado en modelos

Se plantea una **metodología** de dimensionado de sistemas de almacenamiento basado en un “**Diseño basado en Modelos**” (*Model-Based Design*).

- ☐ La metodología tiene como **elemento central el modelo de un sistema** donde se integra el elemento a diseñar.
- ☐ Se definen unos **criterios de diseño** que el modelo puede evaluar si se cumplen o no.
- ☐ Se debe poder incluir **un modelo de dispositivo de almacenamiento** en el modelo del sistema
- ☐ Es común que la necesidad de un sistema de almacenamiento nazca de una modificación reciente o prevista a futuro que ha provocado una **perturbación** en el sistema.

Para más información sobre “**Diseño basado en Modelos**” podéis consultar:

1. [Model-Based Design. Matlab Webpage Content. Last Access: 12/11/2021](#)
2. [Roger Aarenstrup. \(2015\). Managing Model-Based Design](#)

2 - Metodología: Dimensionado de un SAE

dimensionar : tr. Determinar o evaluar la dimensión de algo.

- ❑ El **dimensionado de un sistema de almacenamiento de energía** implica:
“Determinar (cuantitativamente) las características del almacenamiento”
- ❑ La necesidad de incluir un sistema de almacenamiento nace de dar respuesta o **solucionar un problema**.
- ❑ Por tanto, las características principales del sistema de almacenamiento deben ser tales que den respuesta o solución al problema, a la vez que son **económicamente viables**.

NOTA: la viabilidad económica puede estar ligada al sistema de retribuciones ofrecido por solucionar el problema (p.ej. gestión de desvíos), a el ahorro que introduce el sistema (p.ej. Por reducción de vertidos de generación renovable), o por tener un coste competitivo en mercado (p. ej. un sistema de alimentación aislado).

- ❑ Las **características principales** del sistema de almacenamiento suelen ser:
Energía, Potencia, y tipo de dispositivo (ciclos máximos, eficiencia, etc.)

2 - Metodología: Esquema del dimensionado



Esquema de Dimensionado (Diseño basado en Modelos)

MODELO

Perturbación
/ Problema

SISTEMA

Corrección
/ Solución

Variable de
diseño
Variable crítica

Criterios de
Diseño

Límites/
Objetivos

2 - Metodología: Esquema del dimensionado



METODOLOGÍA: PASO 1



Model.)

N. T.
SYSTEM OF ELECTRICAL

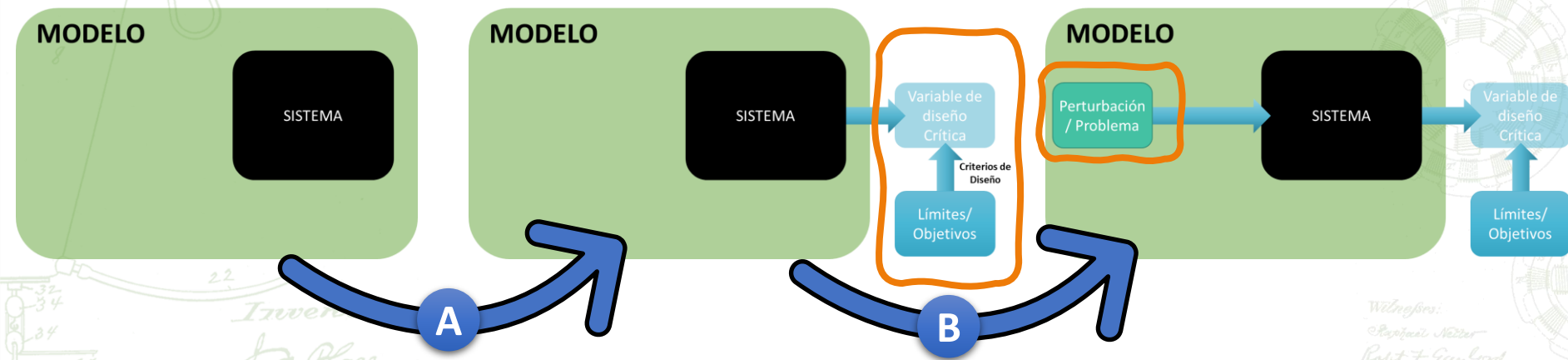
No. 487,796.

Fig. 5

1

IDENTIFICACIÓN CUALITATIVA DEL PROBLEMA A RESOLVER (PERTURBACIÓN):

- A** Determinar la **variable de diseño** o variable crítica y los límites u objetivos a aplicar
- B** Identificar la **perturbación** o problema que causa el problema o provoca el desvío de la variable de diseño fuera de los límites



2 - Metodología: Esquema del dimensionado



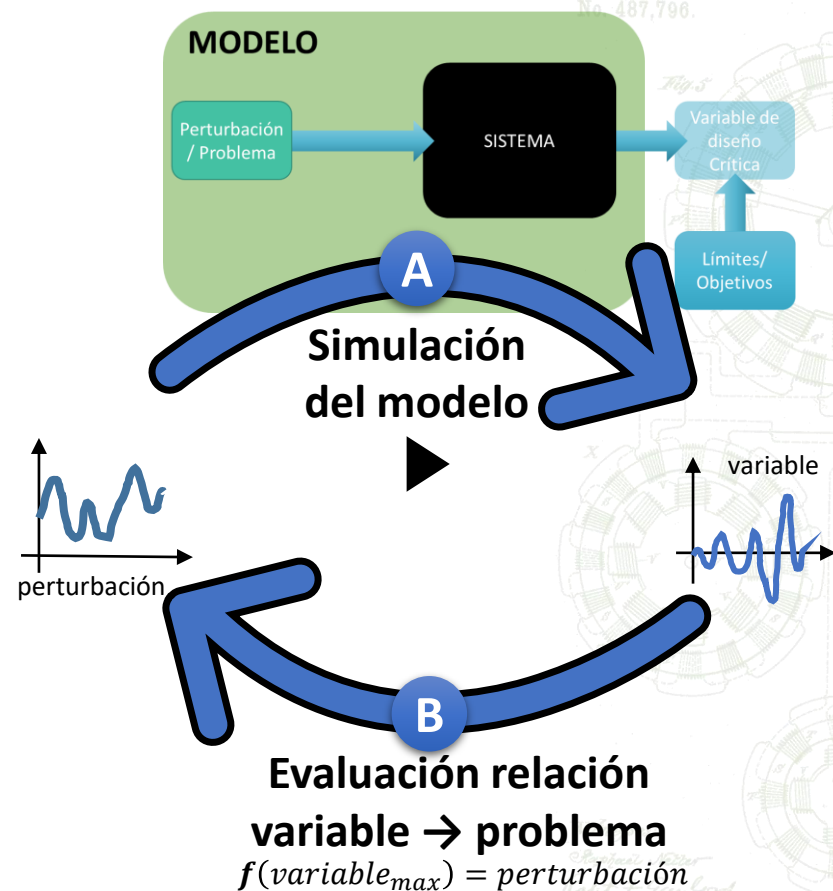
METODOLOGÍA: PASO 2



2

EVALUACIÓN CUANTITATIVA DE LA RELACIÓN ENTRE LA VARIABLE DE DISEÑO Y LA PERTURBACIÓN:

- A** Obtener una relación, función o similar entre la perturbación y la variable de diseño mediante la simulación del modelo del sistema.
- B** Mediante dicha relación, función o similar, **evaluar los valores límite de la perturbación** que hacen que la variable de diseño cumpla los objetivos o límites de diseño.



2 - Metodología: Esquema del dimensionado



METODOLOGÍA: PASO 3



Model.)

N. T.
SYSTEM OF ELECTRICAL

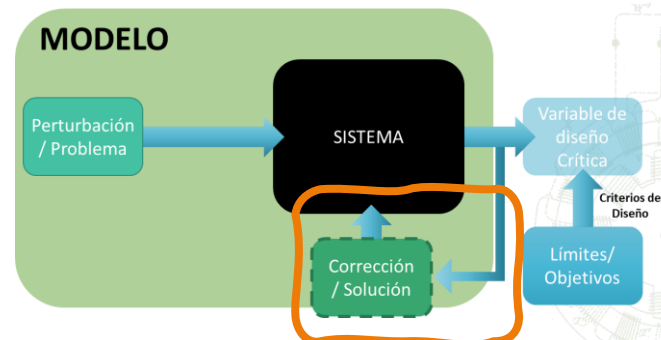
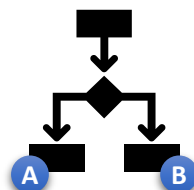
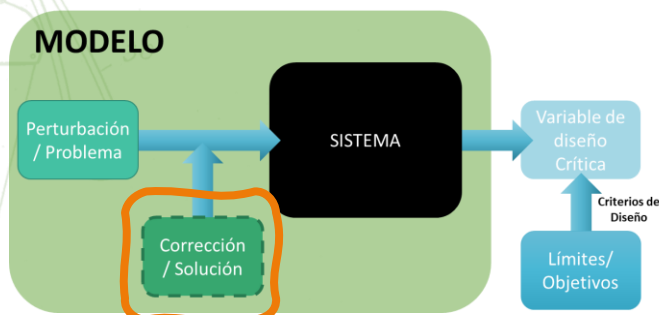
No. 487,796.

Fig. 5

3

IDENTIFICACIÓN CUALITATIVA DE LA SOLUCIÓN (CORRECCIÓN):

- Definición de la acción correctora que permitiría mitigar la perturbación (A) o que permitiría mantener bajo control la variable de diseño (B).
- En esencia es decidir como integrar el almacenamiento en el sistema



Dada la relación encontrada - $f(variable) = perturbación$ -, mitigar la perturbación o mantener bajo control la variable de diseño produce resultados análogos.

2 - Metodología: Esquema del dimensionado



METODOLOGÍA: PASO 4



Model.)

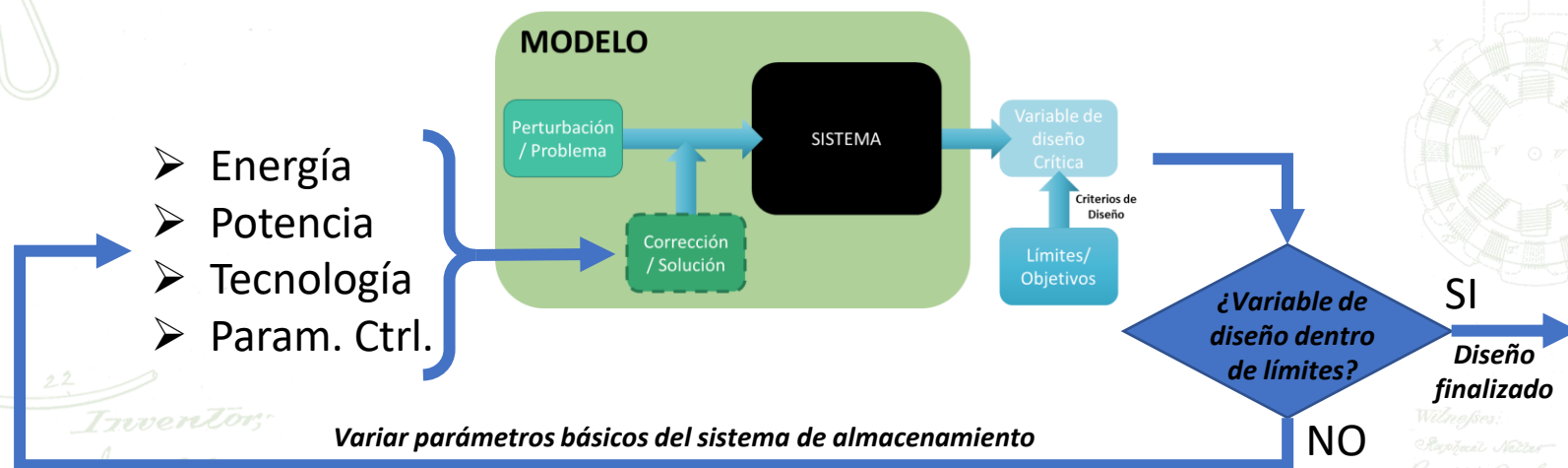
N. T.
SYSTEM OF ELECTRICAL

No. 487,796.

4

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS BÁSICOS DE LA CORRECCIÓN:

- Definir los valores de los parámetros básicos del sistema de almacenamiento que mantienen la variable de diseño dentro de sus valores límite, lo que incluye tanto sus **características básicas** (energía, potencia, etc.), la **tecnología de almacenamiento** a usar, sus **parámetros de control**, como (incluso) el **punto de conexión a la red**.



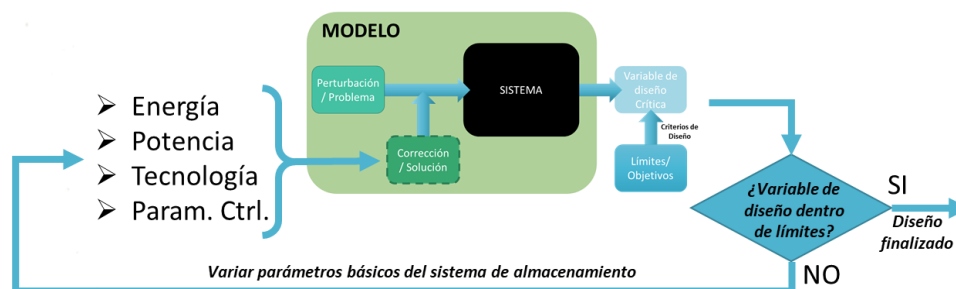
2 - Metodología: Esquema del dimensionado



METODOLOGÍA: EXTRA



¿CÓMO RESOLVER EL BUCLE DE DISEÑO? COMENTARIOS CUALITATIVOS



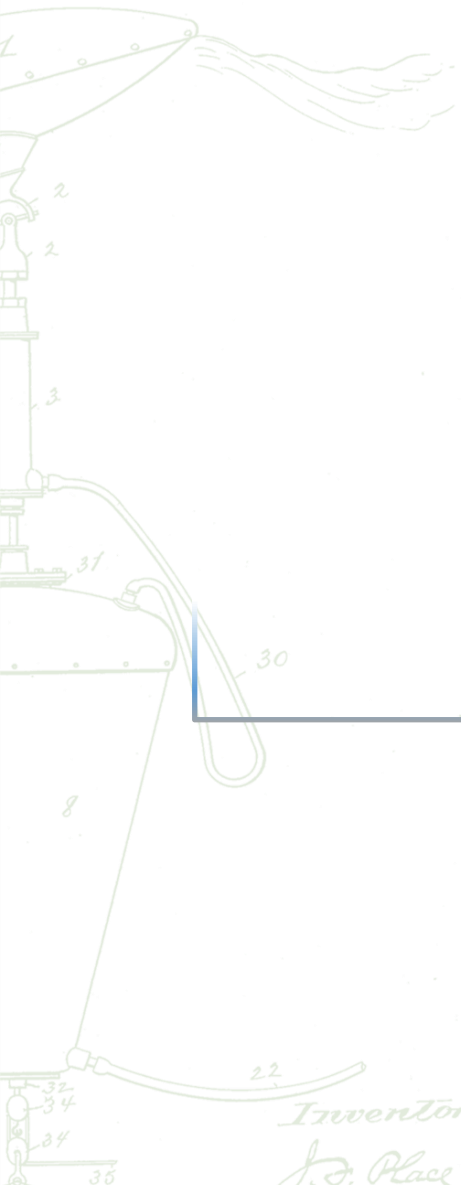
VARIABLES

- Las **perturbación** puede ser un valor único, podemos tener registros de perturbaciones de un periodo largo de tiempo (p.ej. de cara hora del año) o, incluso, podemos llegar a tener perfiles temporales con una probabilidad de contingencia.
- La **variable resultado** puede ser una (o un conjunto de) variable binaria (SI/NO), una variable numérica, o un perfil temporal. En este último caso, puede ser necesario caracterizar el perfil con un solo valor (por ejemplo, la varianza del perfil).
- Si tenemos un conjunto de variables numéricas, también hay que proponer una manera de evaluarlas de forma conjunta (por ejemplo, varianzas menores que un cierto valor límite)

BUCLE

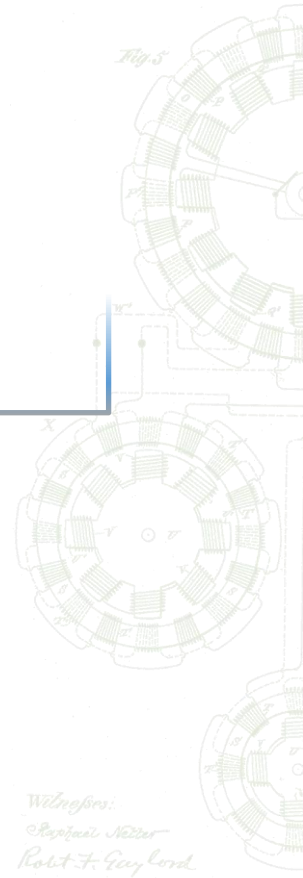
- La condición de parada puede ser mono-variable (un valor de una variable dentro de un rango, la minimización de una cierta variable) o multivariable (se obtendría un [frente de Pareto](#)).
- Las variables de diseño se pueden evaluar y variar todas juntas, o se puede plantear un diseño en cascada si están desacopladas.
- El bucle puede resolverse por fuerza bruta (decidir un conjunto de valores de las características del almacenamiento, evaluarlos, y decidir cual es el mejor) o mediante [algoritmos de optimización](#) (p.ej. algoritmos estocásticos.)

3 - EJEMPLOS



(No Model.)

N. T.
SYSTEM OF ELECTRICAL
No. 487,796.

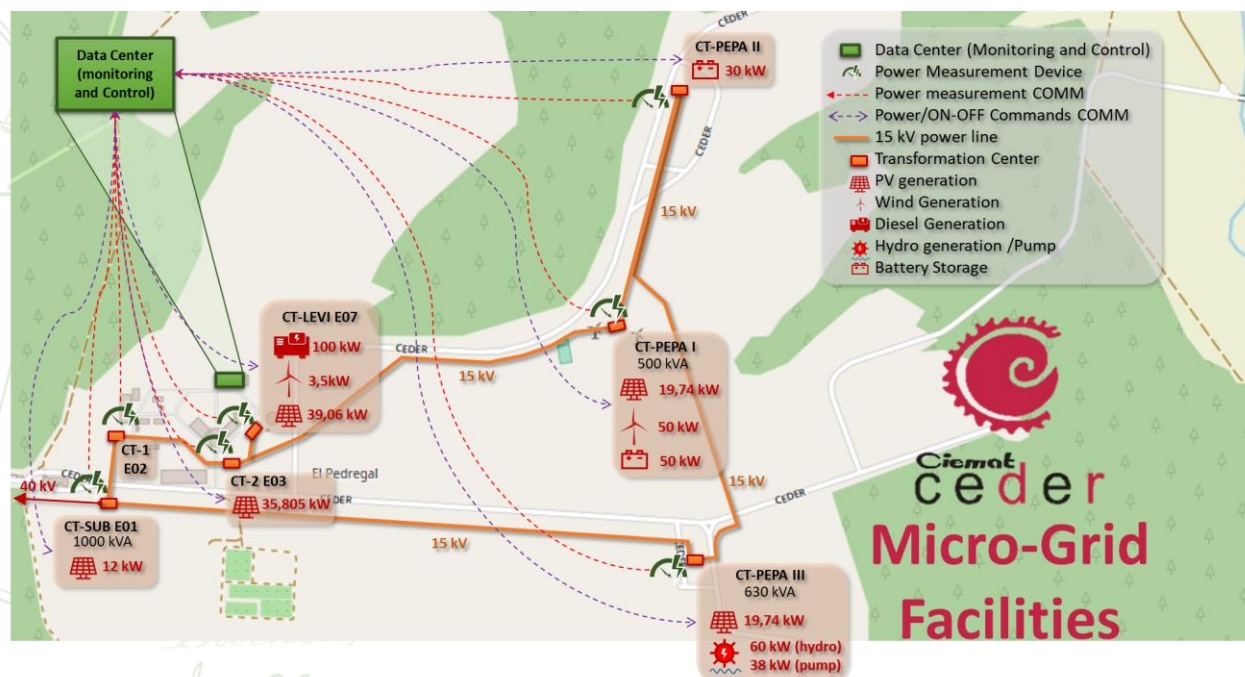


3 - EJEMPLOS (1/4): balance potencias / minimización consumo



Microrred con alta penetración de renovables

MICRORRED CON GENERACIÓN RENOVABLE NO GESTIONABLE, GENERACIÓN NO-RENOVABLE Y CONSUMO RESIDENCIAL CONECTADO A LA RED ELÉCTRICA



**EJEMPLO:
MICRORED DEL
CENTRO
TERRITORIAL
CEDER
(CIEMAT)**

3 - EJEMPLOS (1/4): balance potencias / minimización consumo

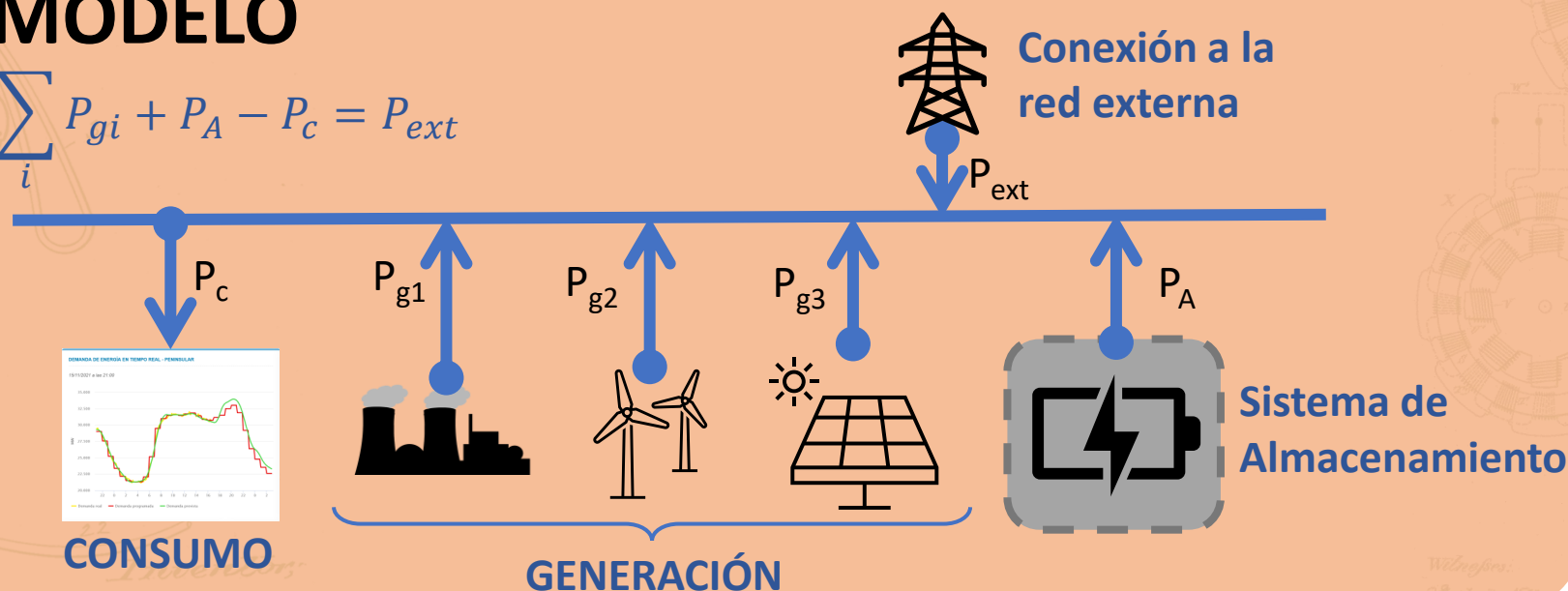


Microrred con alta penetración de renovables

MICRORRED CON GENERACIÓN RENOVABLE NO GESTIONABLE, GENERACIÓN NO-RENOVABLE Y CONSUMO RESIDENCIAL CONECTADO A LA RED ELÉCTRICA

MODELO

$$\sum_i P_{gi} + P_A - P_c = P_{ext}$$

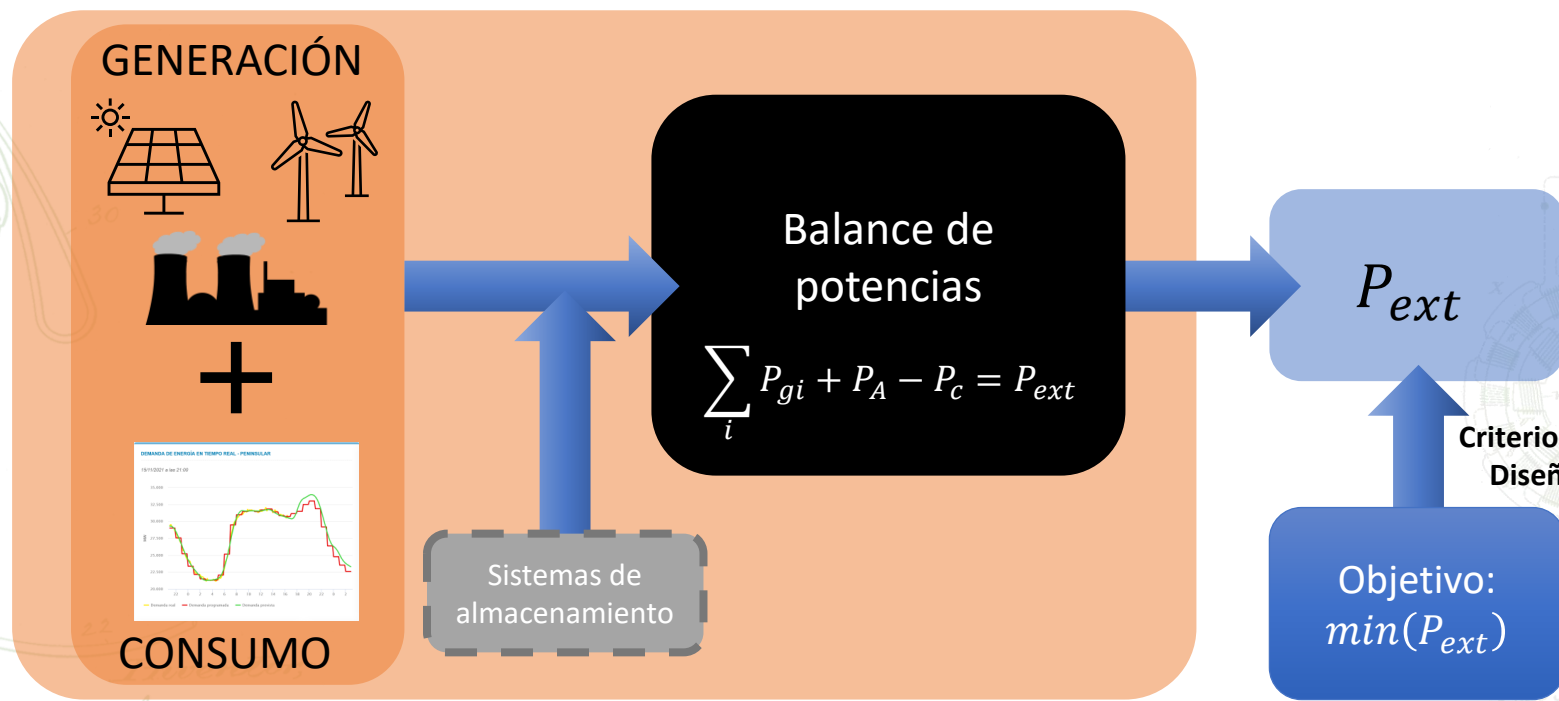


3 - EJEMPLOS (1/4): balance potencias / minimización consumo



Microrred con alta penetración de renovables

OBJETIVO: Dimensionado de un sistema de almacenamiento que asegure un balance de potencia generada-consumida minimizando consumo de la red.



3 - EJEMPLOS (2/4): balance de potencias / congestiones



Flexibilización de una red de transporte

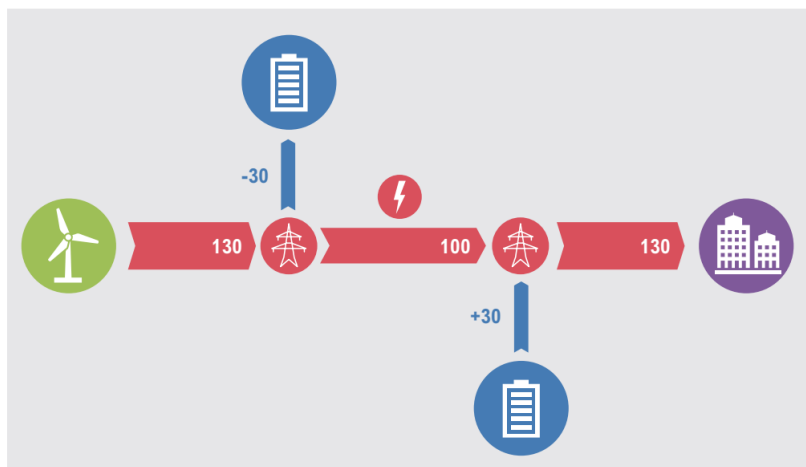


Fig. 2: Simplified example of neutral use of storage for congestion management

Fuente: [ENERGY STORAGE AND STORAGE SERVICES - ENTSO-E POSITION, October 2016](#)

Congestión en la red eléctrica:

Ocurre cuando la programación del mercado programadas (casación de generación y carga) dan como resultado un flujo de energía eléctrica sobre un elemento de transmisión (p.ej. Línea de transporte) que excede la capacidad disponible para ese elemento en un instante de tiempo determinado.

La operación de los sistemas de almacenamiento en tiempo real permitiría flexibilizar la operación de la red eléctrica.

P. ej.: Pueden modificar dinámicamente el flujo de potencia en las líneas de transmisión, dado solución a problemas como la congestión de líneas de transmisión en hora punta.

3 - EJEMPLOS (2/4): balance de potencias / congestiones



Flexibilización de una red de transporte

SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO OPERADOS EN TIEMPO REAL PARA FLEXIBILIZACIÓN DE LA RED ELÉCTRICA

MODELO

Modelo unifilar eléctrico para análisis de Flujo de cargas y análisis de congestiones



Fuente: [REE website](#)

Sistemas de Almacenamiento operados por el centro de control eléctrico o integrados en el mercado eléctrico

3 - EJEMPLOS (2/4): balance de potencias / congestiones



Flexibilización de una red de transporte

OBJETIVO: Dimensionado de un sistema de almacenamiento que minimice el coste de las congestiones.

Programación diaria
de generación y
previsión de
consumos



Modelo eléctrico
unifilar y flujo de
cargas

Sistemas de
almacenamiento

Resultados
*Flujo
de cargas*

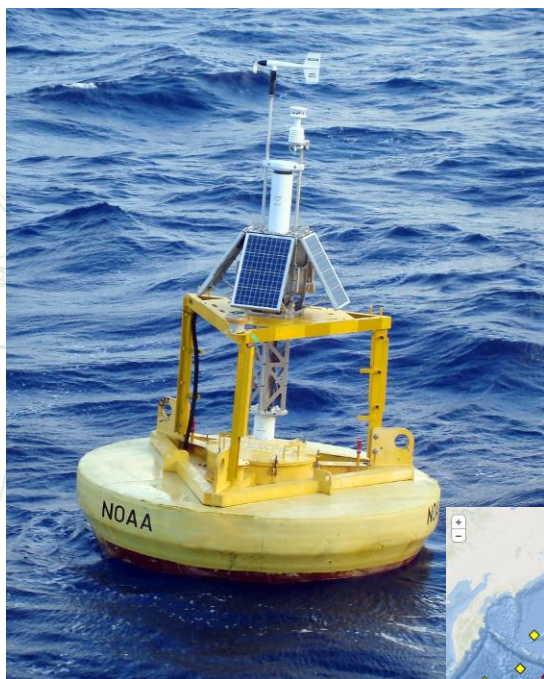
Criterios de
Diseño

Objetivo:
 $\min(\text{congestiones})$

3 - EJEMPLOS (3/4): balance de potencias / calidad de suministro



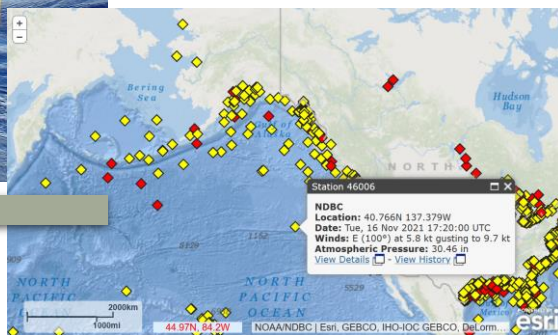
Sistema de alimentación aislado



Fuente: [National Buoy Data Center website](https://www.ndbc.noaa.gov/)

EJEMPLO: BOYA METEOROLÓGICA

Los sistemas de almacenamiento son esenciales en sistemas aislados en entornos remotos donde se necesita asegurar el suministro eléctrico.



Otros Ejemplos:

- 1) Alimentación de emergencia en hospitales en redes eléctricas débiles.
- 2) Suministro eléctrico en residencias rurales sin conexión a la red eléctrica.

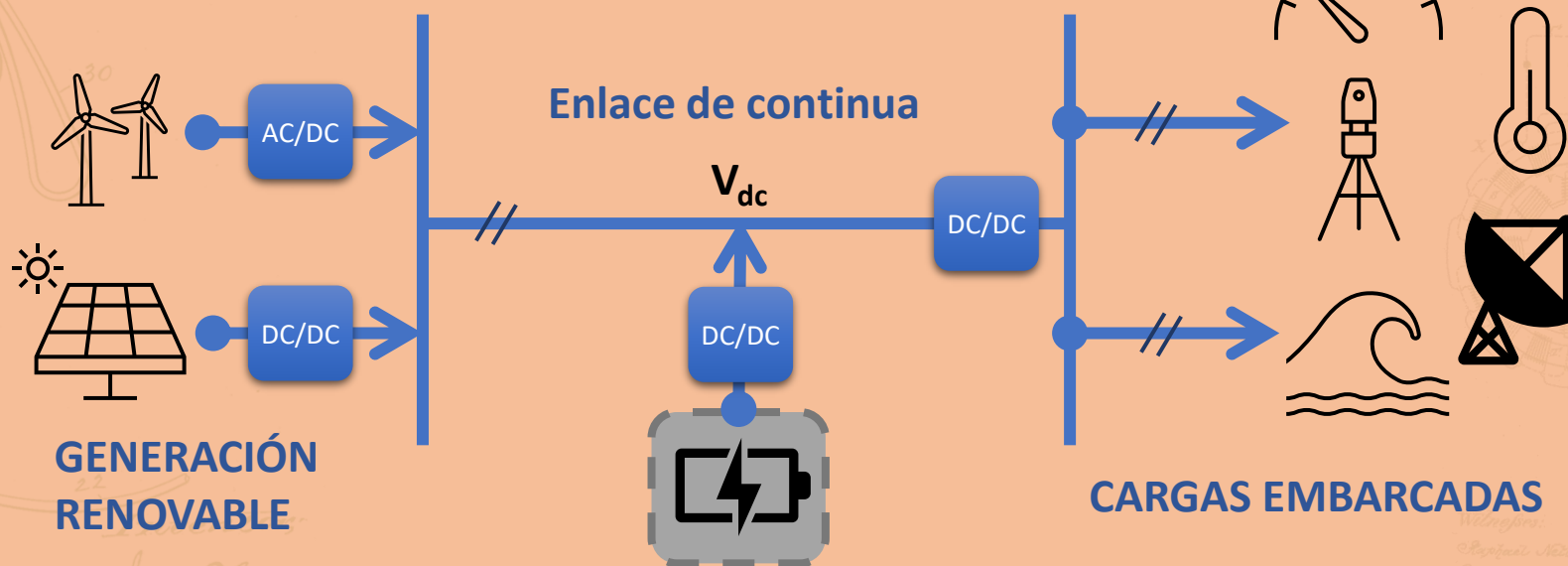
3 - EJEMPLOS (3/4): balance de potencias / calidad de suministro



Sistema de alimentación aislado

SISTEMAS DE ALMACENAMIENTO PARA ALIMENTACIÓN DE CARGAS EN UNA BOYA METEOROLÓGICA

MODELO ELÉCTRICO DETALLADO

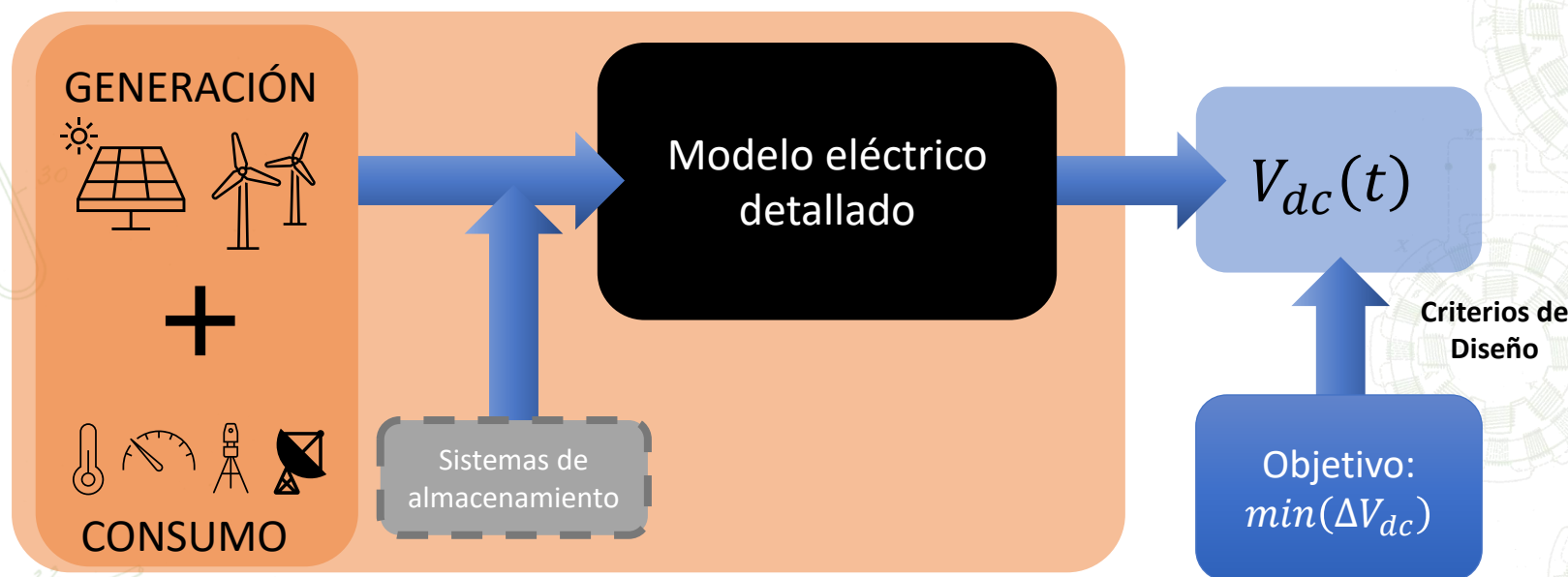


3 - EJEMPLOS (3/4): balance de potencias / calidad de suministro



Sistema de alimentación aislado

OBJETIVO: Dimensionado de un sistema de almacenamiento que asegure la correcta alimentación de las cargas embarcadas (mantener estable la tensión en el enlace de continua)



Ejemplo de dimensionado de bota meteorológica con generación undimotriz: [Lafoz M, Blanco M, Beloqui L, Navarro G, Moreno-Torres P \(2016\) Dimensioning methodology for energy storage devices and wave energy converters supplying isolated loads. IET Renew Power Gener 10](#)

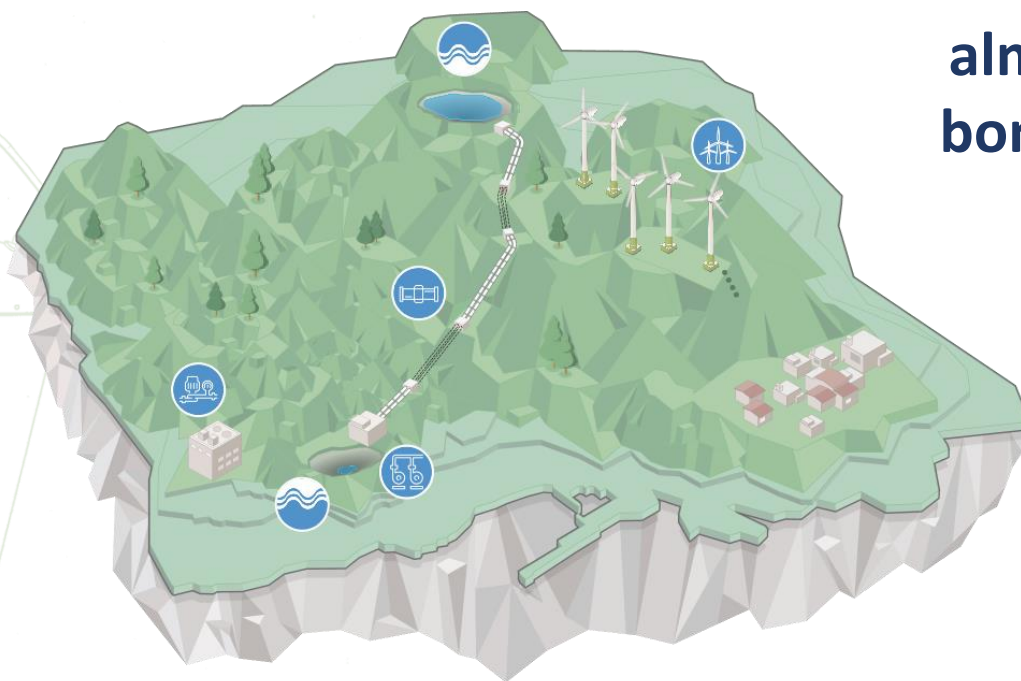
3 - EJEMPLOS (4/4): Servicios de red para control de frecuencia



Regulación primaria y secundaria de red eléctrica

EJEMPLO: Central de almacenamiento por hidro- bombeo y generación eólica **GORONA DEL VIENTO**

Los sistemas de
almacenamiento pueden
usarse como apoyo a la
regulación de frecuencia de
la red eléctrica en redes
débiles



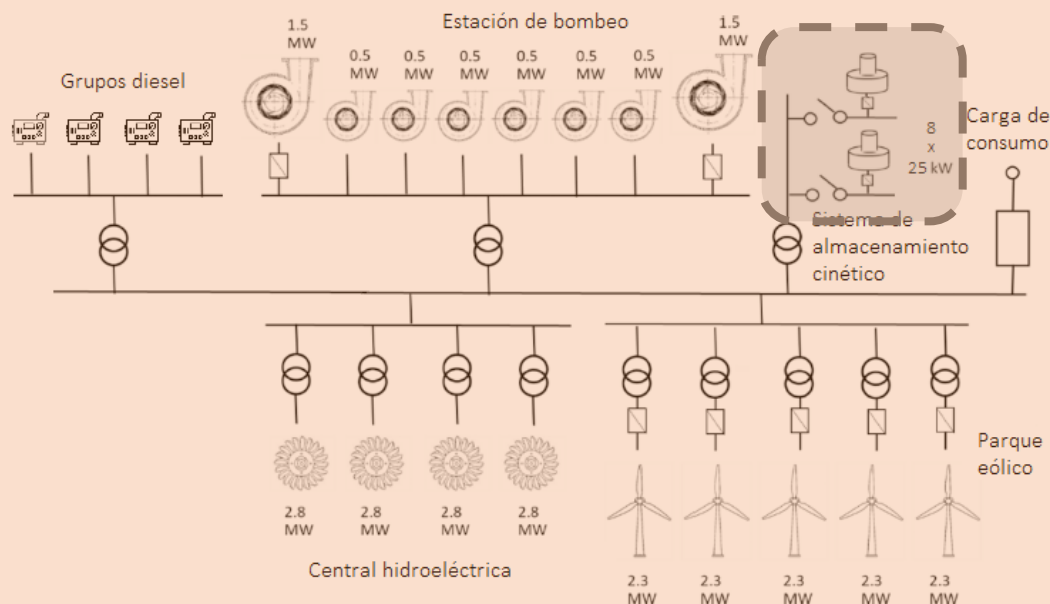
Fuente: Gorona del Viento website

3 - EJEMPLOS (4/4): Servicios de red para control de frecuencia



Regulación primaria y secundaria de red eléctrica

MODELO ELÉCTRICO EN NODO ÚNICO



Los modelos inerciales en nodo único permiten evaluar la evolución dinámica de la frecuencia eléctrica.

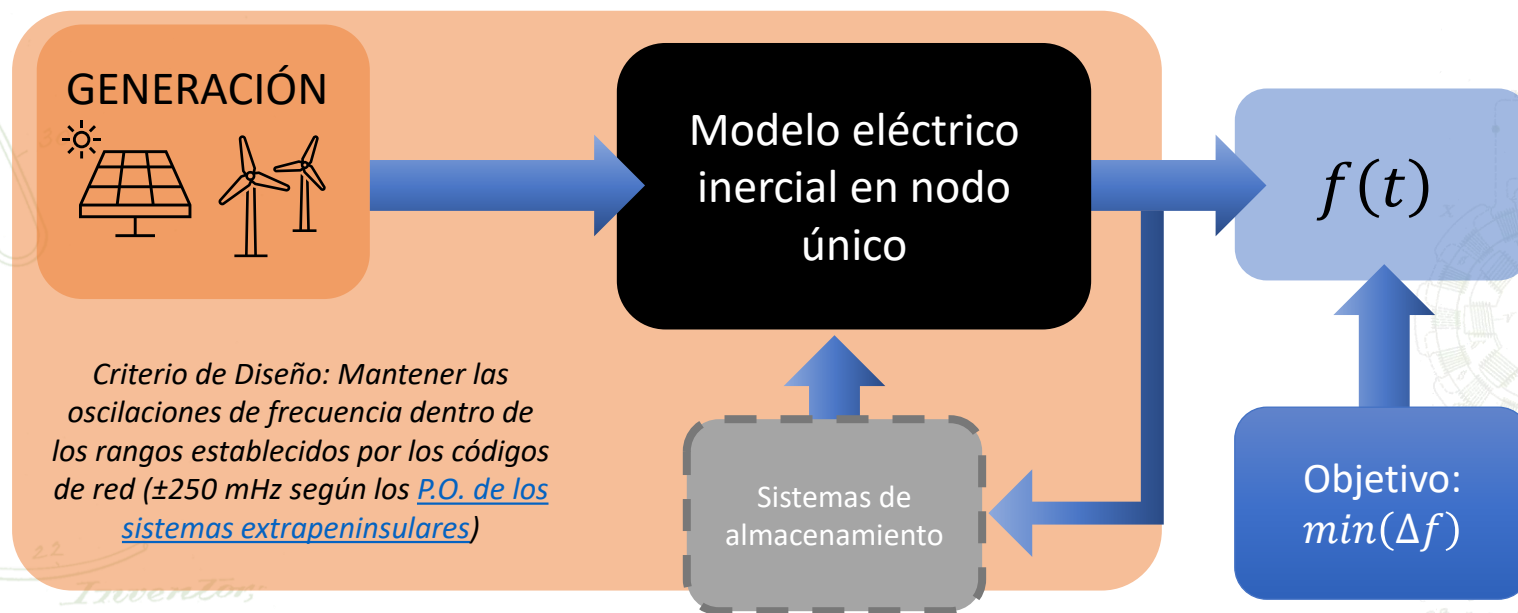
Estos modelos incluyen la regulación primaria y secundaria de frecuencia.

3 - EJEMPLOS (4/4): Servicios de red para control de frecuencia



Regulación primaria y secundaria de red eléctrica

OBJETIVO: Dimensionado de un sistema de almacenamiento que minimice las desviaciones de frecuencia. Al ser un modelo dinámico, además de la potencia y energía, es necesario optimizar las variables de sus controladores.



4 – CASO DE ESTUDIO

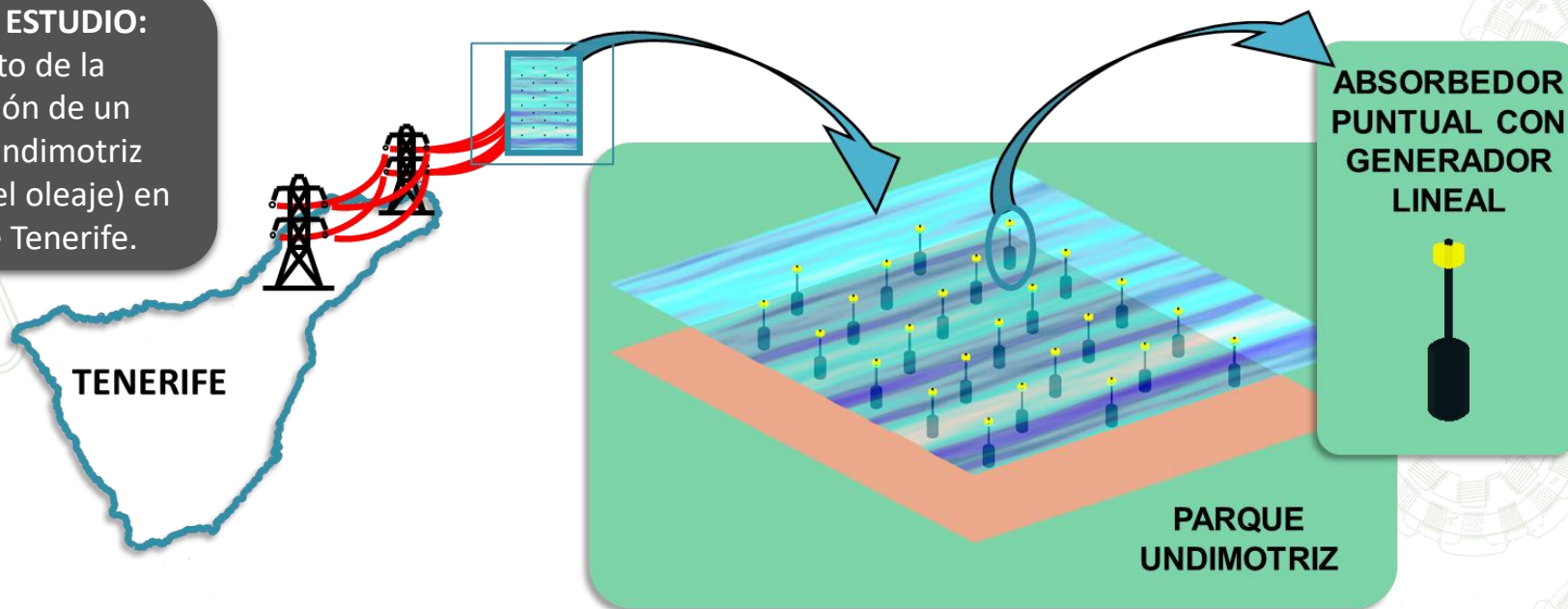
4 - CASO DE ESTUDIO: Descripción General



Integración de energías renovables en redes eléctricas débiles

CASO DE ESTUDIO:

impacto de la
instalación de un
parque undimotriz
(energía del oleaje) en
la isla de Tenerife.



Para más información sobre este análisis, consultar: [1. Villalba I, Blanco M, Pérez-Díaz JI, Fernández D, Díaz F, Lafoz M \(2019\) Wave farms grid code compliance in isolated small power systems. IET Renew Power Gener 13:171–179 . <https://doi.org/10.1049/iet-rpg.2018.5351>](#)

4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 1



METODOLOGÍA: PASO 1



M440.3

SISTEMAS DE ELECTRICAL

No. 487,796.

1

IDENTIFICACIÓN CUALITATIVA DEL PROBLEMA A RESOLVER (PERTURBACIÓN):

- A** Determinar la **variable de diseño** o variable crítica y los límites u objetivos a aplicar
- B** Identificar la **perturbación** o problema que causa el problema o provoca el desvío de la variable de diseño fuera de los límites

MODELO



SISTEMA

MODELO

SISTEMA

Variable de
diseño
Crítica

Criterios de
Diseño

Límites/
Objetivos

MODELO

Perturbación
/ Problema

SISTEMA

Variable de
diseño
Crítica

Límites/
Objetivos

A

B

4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 1

METODOLOGÍA: PASO 1

Identificación cualitativa del problema a resolver (perturbación)

Descripción del modelo del sistema

MODELO

MODELO PARQUE UNDIMOTRIZ

Ocean-Wave
Conditions:
Directional Wave
Power Density
Spectrum

WEC Characteristics
WAVE Farm Layout

Wave
Farm
Model

Grid
Conditions:
Generated Power
of Conventional
Power Plants

WEC Electric
Power Profile

Grid Characteristics

Electric
Grid
Model

MODELO RED ELÉCTRICA TENERIFE

Grid Electric
frequency Profile

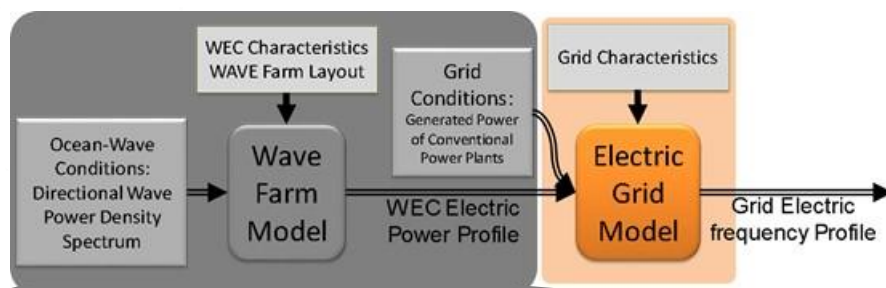
Perturbación a analizar
(precalculada)

Modelo Eléctrico en
nodo único para análisis
de frecuencia

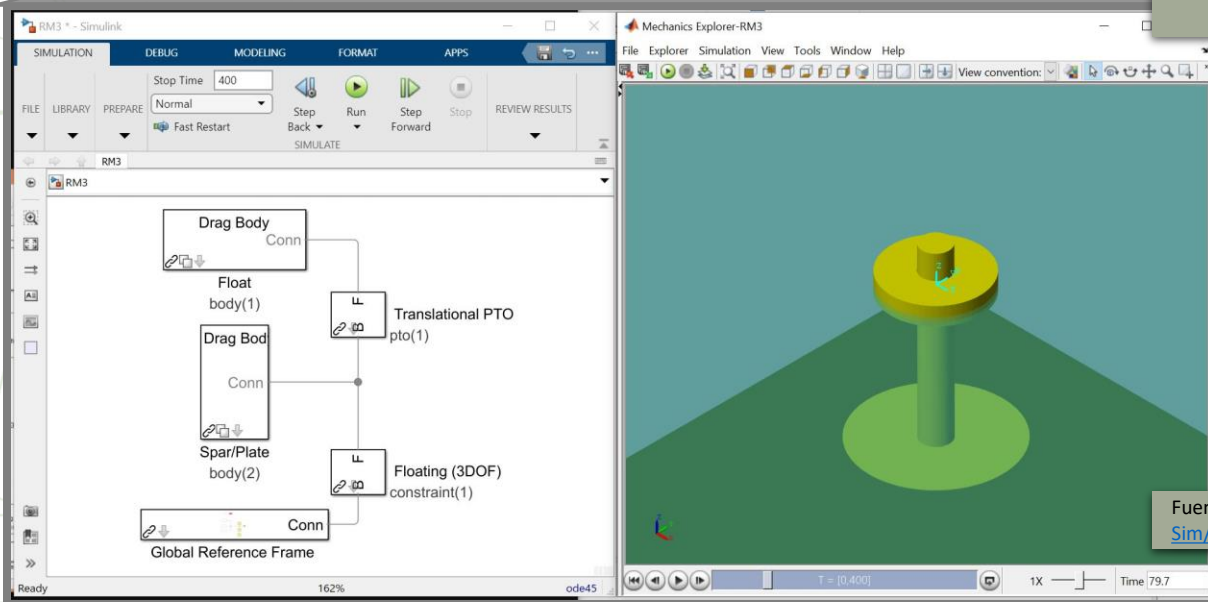
- Modelo compuesto de 2 submodelos (**PARQUE+RED**)
- El modelo **PARQUE** alimenta al **MODELO** red como entrada, pero sin retroalimentación

4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 1

¿? Descripción del modelo del sistema



Modelo en librería WECSIM
(espacio de estados de
modelo mecánico de
absorbedor puntual en 6
grados de libertad)

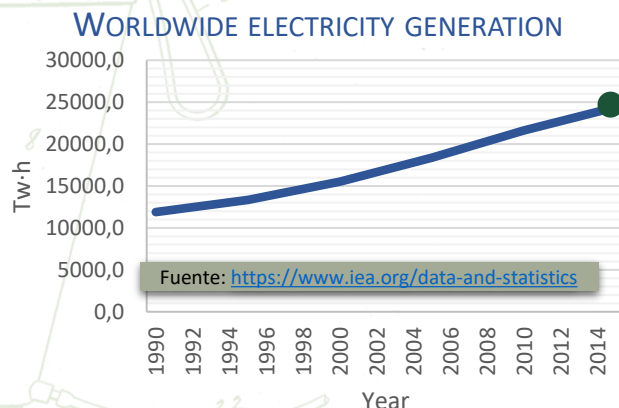


Fuente: <https://wec-sim.github.io/WECSim/master/index.html>

4 CASO DE ESTUDIO: [Energía undimotriz 1/2]

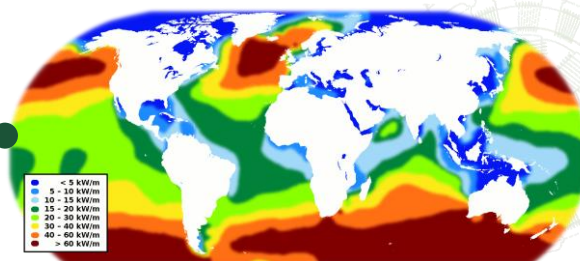
- ☐ **ENERGÍA UNDIMOTRIZ:** Energía útil obtenida del movimiento de las olas del mar
- ☐ Se engloba en las energías oceánicas (corrientes, mareas, etc.)
- ☐ Alta **DENSIDAD** energética, **PREDICTIBILIDAD** y **COMPLEMENTARIEDAD** con otras renovables
- ☐ **RECURSO ENERGÉTICO ELEVADO** y sin explotar comercialmente

Estimación global de energía undimotriz del orden de la generación de energía eléctrica mundial



GENERACIÓN MUNDIAL DE
ELECTRICIDAD (2017)
25716 TW·H

RECURSO TOTAL
ESTIMADO EN
29500 TW·H



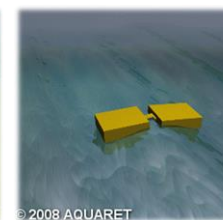
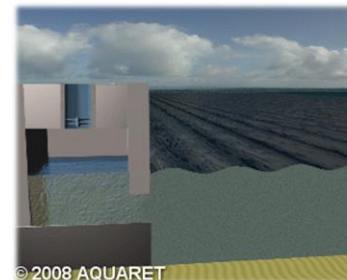
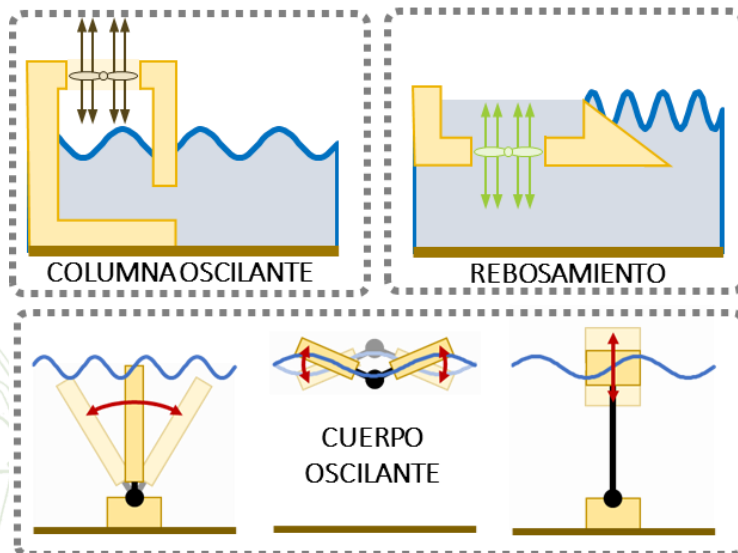
RECURSO UNDIMOTRIZ MUNDIAL

Para más información sobre el estado de desarrollo de la energía undimotriz, consultar:

[Magagna D \(2019\) Ocean Energy Technology Development Report](#); [Magagna D \(2019\) Ocean Energy Technology Market Report. European Commission JRC](#)

4 CASO DE ESTUDIO: [Energía undimotriz 2/2]

Clasificación de captadores por principio de operación



Presión Diferencial

Atenuador

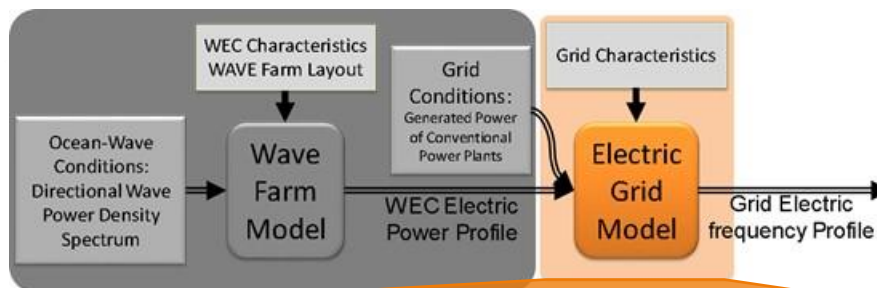
Absorbedor puntual

- ❑ **1799:** 1ª patente (Girard e hijos, Paris)
- ❑ **70's/80's:** gran desarrollo I+D+i a raíz de la crisis del petróleo
- ❑ **Actualidad:** ETAPA PRECOMERCIAL CON GRAN INTERÉS ACADÉMICO E INDUSTRIAL
- ❑ **Actualidad:** GRAN DIVERSIDAD DE CONCEPTOS Y PRINCIPIOS DE OPERACIÓN

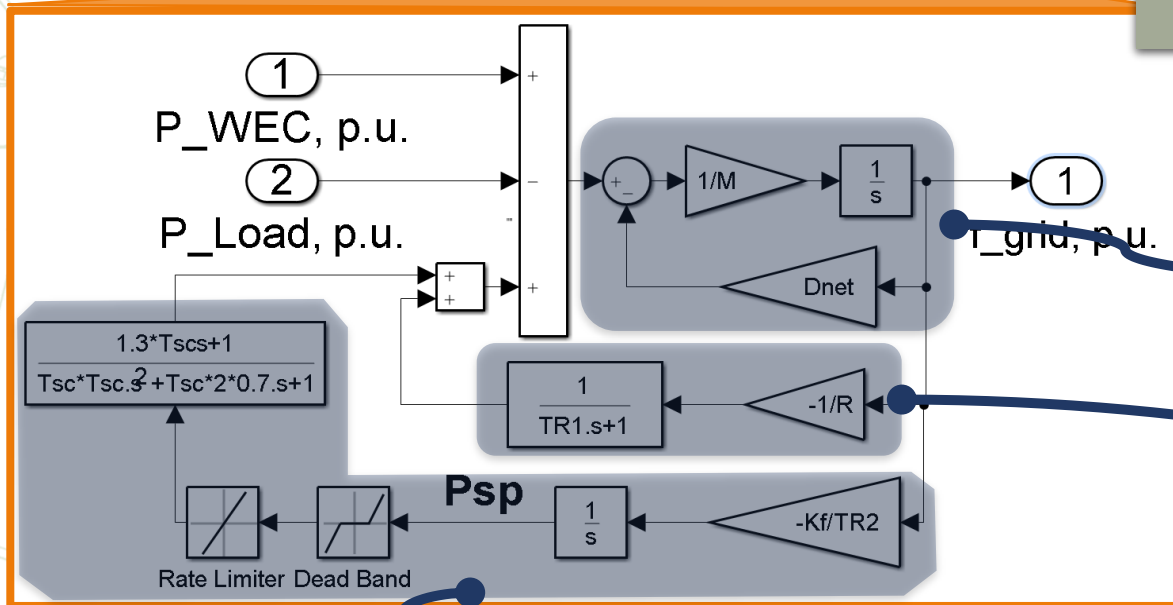
Para más información sobre dispositivos de extracción de energía del oleaje, consultar el siguiente [link](#) o consultar: [5 Falcão, A.F. de O. Wave energy utilization: A review of the technologies. Renew. Sustain. Energy Rev. 2010, 14, 899–918, doi:10.1016/j.rser.2009.11.003.](#)

4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 1

¿? Descripción del modelo del sistema



**Modelo Eléctrico en nodo
único para análisis de
frecuencia de la red de la
isla de Tenerife**



**INERCIA DEL SISTEMA Y
AMORTIGUAMIENTO DE LOS
CONSUMOS**

(la inercia varía según el número
de plantas convencionales
sincronizadas)

REGULACIÓN PRIMARIA

REGULACIÓN SECUNDARIA

MARCOS BLANCO - Ejemplo práctico de dimensionado de
almacenamiento de energía 2 (renovables)

4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 1



METODOLOGÍA: PASO 1

1

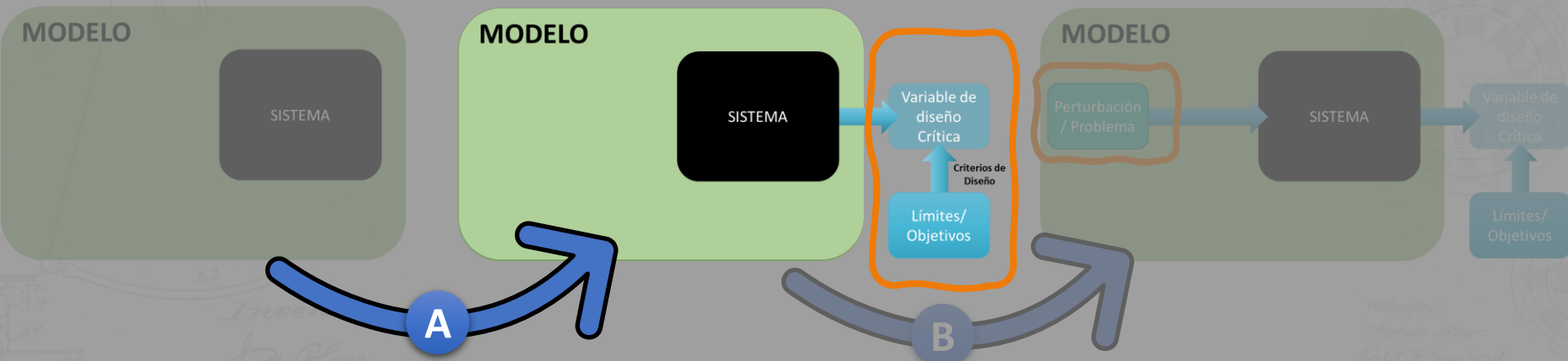
IDENTIFICACIÓN CUALITATIVA DEL PROBLEMA A RESOLVER (PERTURBACIÓN):

A

Determinar la variable de diseño o variable crítica y los límites u objetivos a aplicar

B

Identificar la perturbación o problema que causa el problema o provoca el desvío de la variable de diseño fuera de los límites



4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 1

METODOLOGÍA: PASO 1

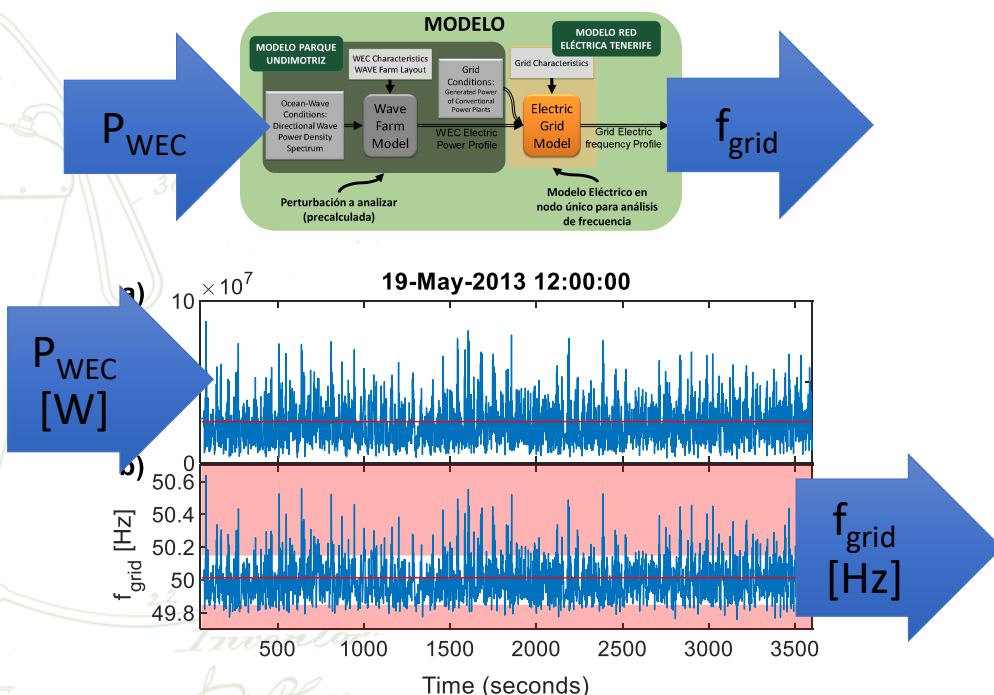
Identificación cualitativa del problema a resolver (perturbación)

A Determinar la variable de diseño y los límites a aplicar

- ☐ Se simula la respuesta de la red ante perturbaciones oscilantes
- ☐ LA OSCILACIÓN DE POTENCIA PROVOCA OSCILACIONES DE FRECUENCIA.
- ☐ LA GENERACIÓN UNDIMOTRIZ ES UN EVENTO “NO EXCEPCIONAL”.

SISTEMAS INSULARES

- La frecuencia debe permanecer en la zona de operación normal ($50 \text{ Hz} \pm 150 \text{ mHz}$).
- Por encima de $\pm 150 \text{ mHz}$ se denomina zona de alerta.
- Fuera de los límites de $50 \text{ Hz} \pm 250 \text{ mHz}$, el sistema está en zona de emergencia.



4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 1

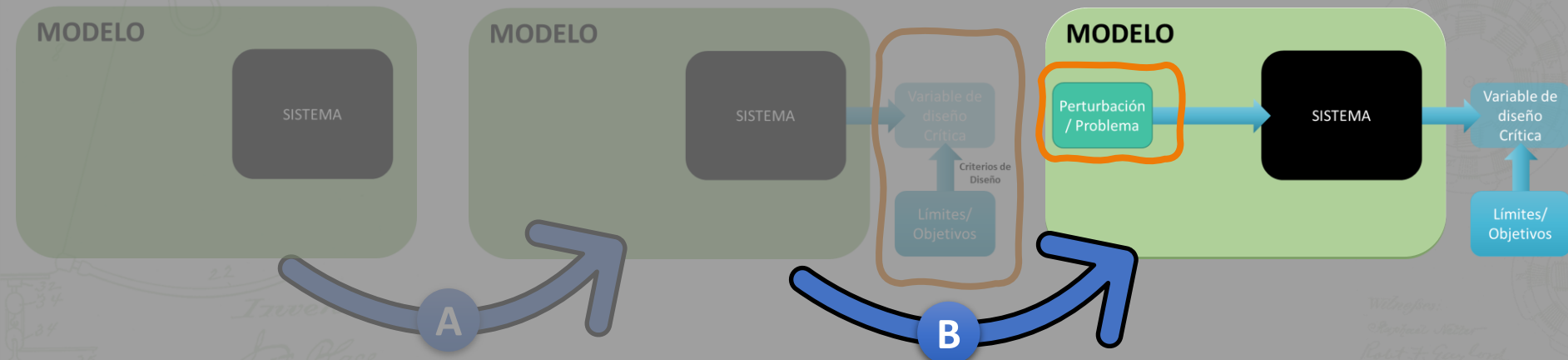


METODOLOGÍA: PASO 1

1

IDENTIFICACIÓN CUALITATIVA DEL PROBLEMA A RESOLVER (PERTURBACIÓN):

- A** Determinar la **variable de diseño** o variable crítica y los límites u objetivos a aplicar
- B** **Identificar la perturbación** o problema que causa el problema o provoca el desvío de la variable de diseño fuera de los límites



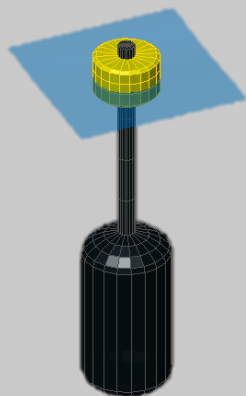
4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 1

METODOLOGÍA: PASO 1

Identificación cualitativa del problema a resolver (perturbación)

B Identificar y analizar cualitativamente la perturbación

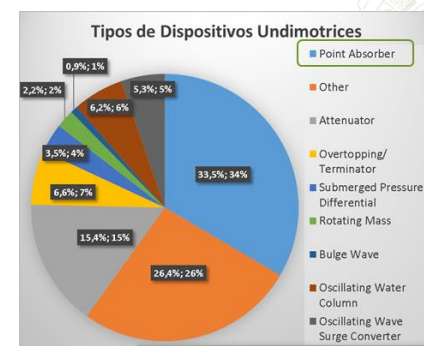
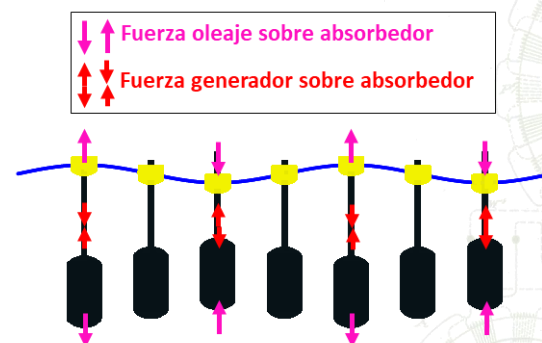
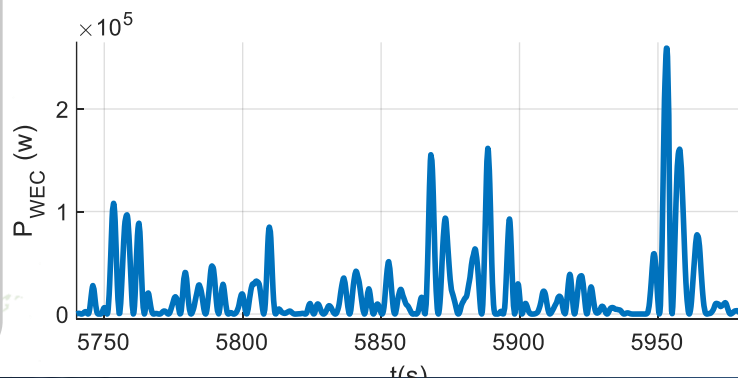
Dispositivo de
captador del oleaje
del parque undimotriz



**ABSORBEDOR
PUNTUAL**

Principio de Funcionamiento:

- El oleaje mueve el Absorbedor Puntual (crea un movimiento oscilatorio)
- El movimiento creado se “frena” con un generador eléctrico lineal.
- La potencia generada es oscilatoria.



Fuente: <http://www.emec.org.uk/marine-energy/wave-developers/>

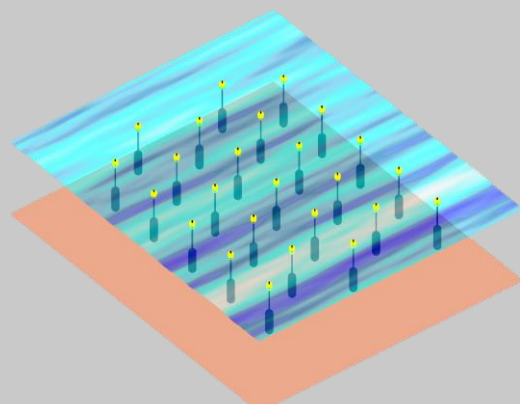
4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 1

METODOLOGÍA: PASO 1

Identificación cualitativa del problema a resolver (perturbación)

B Identificar y analizar cualitativamente la perturbación

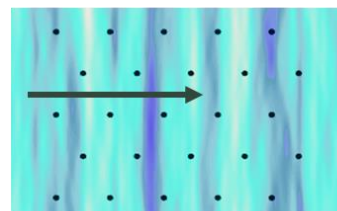
Disposición espacial de los
absorbedores en el parque



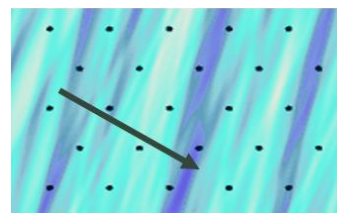
PARQUE UNDIMOTRIZ

Oscilación de potencia
dependiente de **posición de**
WECs y de **dirección de oleaje**

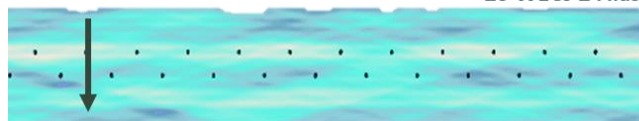
25 WECs 5 Filas



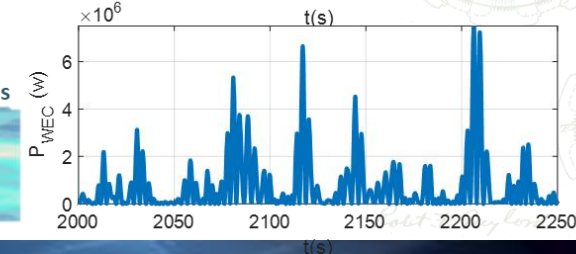
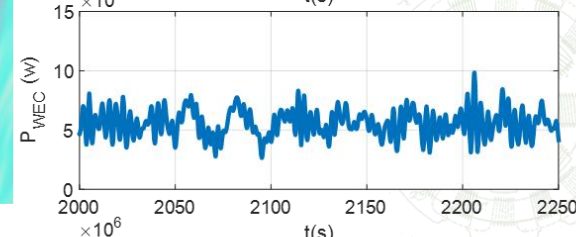
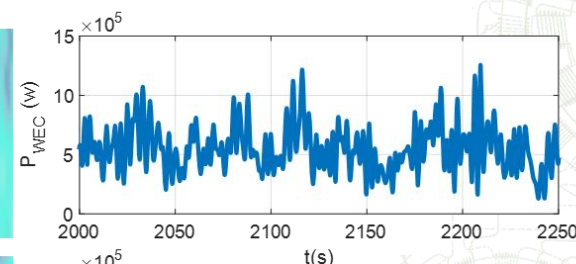
25 WECs 5 Filas



25 WECs 2 Filas

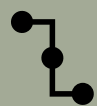


↓ Dirección de Oleaje
● Absorbedor Puntual



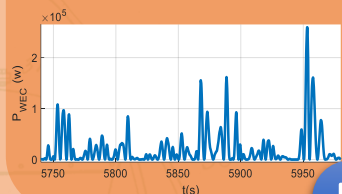
4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 1

METODOLOGÍA: PASO 1



Identificación cualitativa del problema a resolver (perturbación)

GENERACIÓN
UNDIMOTRIZ



B

Modelo eléctrico
inercial en nodo
único

$f(t)$

A

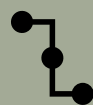
Objetivo:
 $\min(\Delta f)$

Criterio de Diseño:
Mantener las
oscilaciones de
frecuencia dentro de
los rangos
establecidos por los
códigos de red (± 150
mHz según los [P.O. de los sistemas extrapeninsulares](#))

OBJETIVO: Dimensionado de un sistema de almacenamiento que minimice las desviaciones de frecuencia. Al ser un modelo dinámico, además de la potencia y energía, es necesario optimizar las variables de sus controladores.

4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 1

METODOLOGÍA: PASO 1



Identificación cualitativa del problema a resolver (perturbación)

En resumen:

- ❑ En un sistema eléctrico, **los desequilibrios de potencia se traducen en variaciones en la frecuencia**. Por lo tanto, oscilaciones de potencia provocan oscilaciones de frecuencia.
- ❑ La **energía undimotriz** es la energía obtenida del movimiento de las olas. La naturaleza oscilante del oleaje lleva a una **generación de potencia oscilante**.
- ❑ El sistema eléctrico de la **isla de Tenerife se puede considerar una red débil** (baja inercia). Cuanto más baja es la inercia de un sistema, más altas son las variaciones de la frecuencia ante las mismas variaciones de potencia.

4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 2



METODOLOGÍA: PASO 2



2

EVALUACIÓN CUANTITATIVA DE LA RELACIÓN ENTRE LA VARIABLE DE DISEÑO Y LA PERTURBACIÓN:

- A** Obtener una relación, función o similar entre la perturbación y la variable de diseño mediante la simulación del modelo del sistema.
- B** Mediante dicha relación, función o similar, **evaluar los valores límite de la perturbación** que hacen que la variable de diseño cumpla los objetivos o límites de diseño.

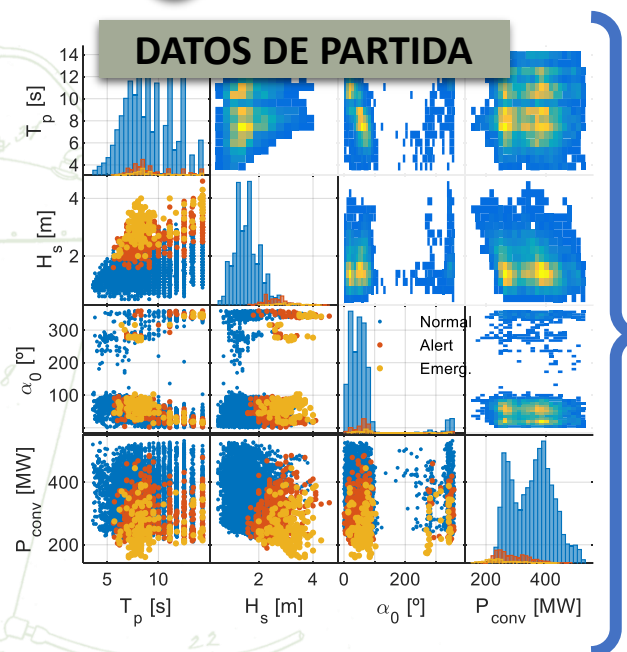


4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 2

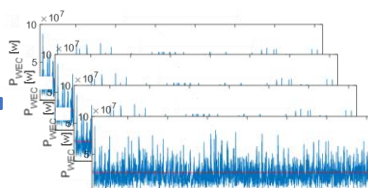
METODOLOGÍA: PASO 2

Evaluación de la relación entre variable de diseño y perturbación

A Simulación del modelo



GENERACIÓN
UNDIMOTRIZ

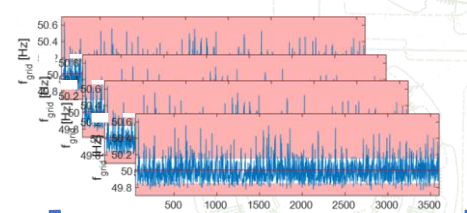


×

N perfiles de entrada
evaluados

Modelo
eléctrico
inercial en
nodo único

$f(t)$



N perfiles de
resultados



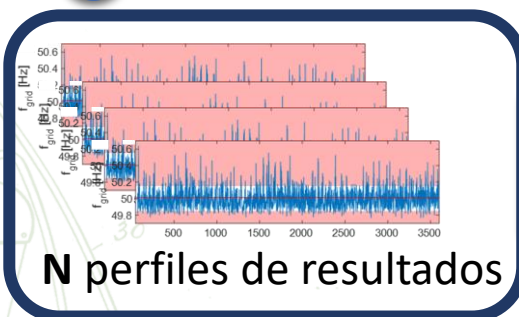
SE EVALÚAN LOS DATOS CADA TENIENDO EN CUENTA LOS PERFILES DE GENERACIÓN DEL PARQUE UNDIMOTRIZ PARA EL OLEAJE (PERIODO, ALTURA, DIRECCIÓN) Y EL ESTADO DE LA RED ELÉCTRICA (INERCI) CADA HORA DEL AÑO.

4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 2

METODOLOGÍA: PASO 2

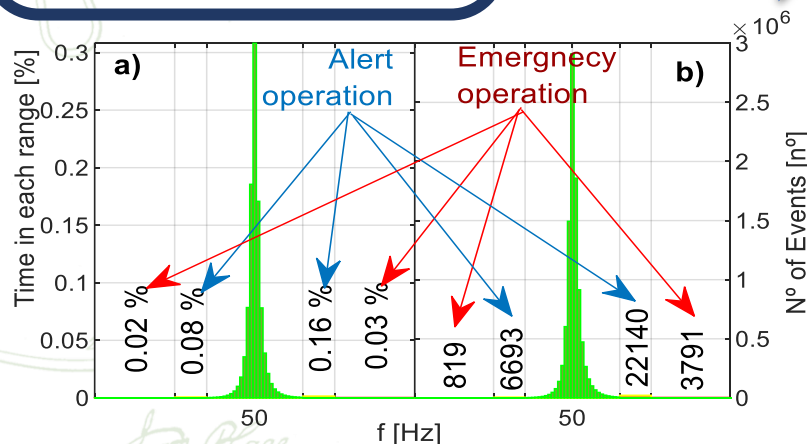
Evaluación de la relación entre variable de diseño y perturbación

A Simulación del modelo



Análisis de resultados

Obtención de los **histogramas** de tiempo y eventos de generación que provocan **estados de alarma y emergencia** debido a la oscilación de frecuencia producida.



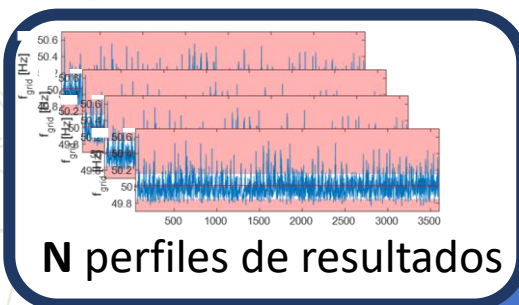
- El sistema eléctrico se encuentra **FUERA DEL RANGO NORMAL DE OPERACIÓN EL 0.3% DEL TIEMPO ANUAL**.
- Más de 33000 eventos (picos) de sobre-frecuencia o sub-frecuencia.

4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 2

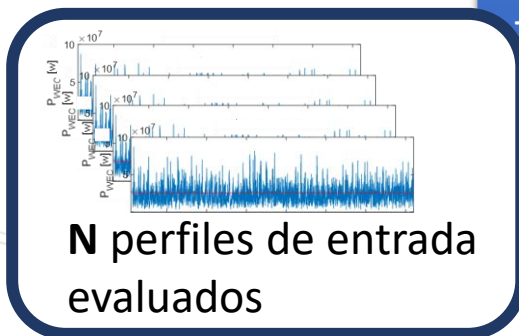
METODOLOGÍA: PASO 2

Evaluación de la relación entre variable de diseño y perturbación

A Simulación del modelo

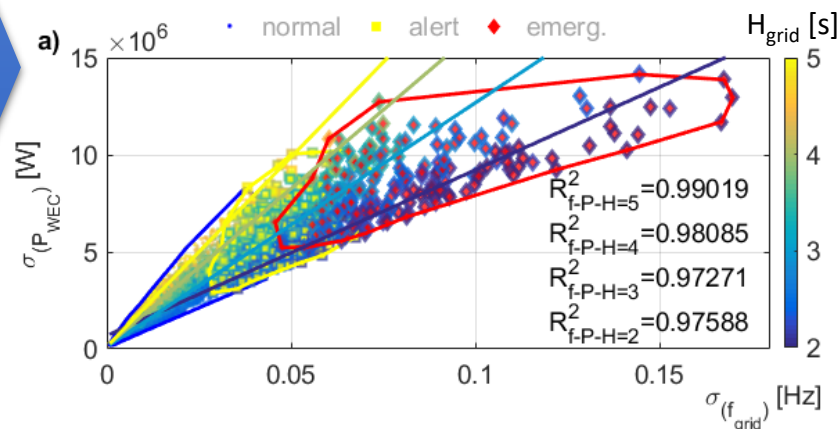


+



Análisis de
relación
PERTURBACIÓN
- VARIABLE DE
SALIDA

Obtención de la **varianza**
(estadística) de **cada perfil de
generación y de frecuencia**,
evaluando si estos provocan
estados de alarma y emergencia

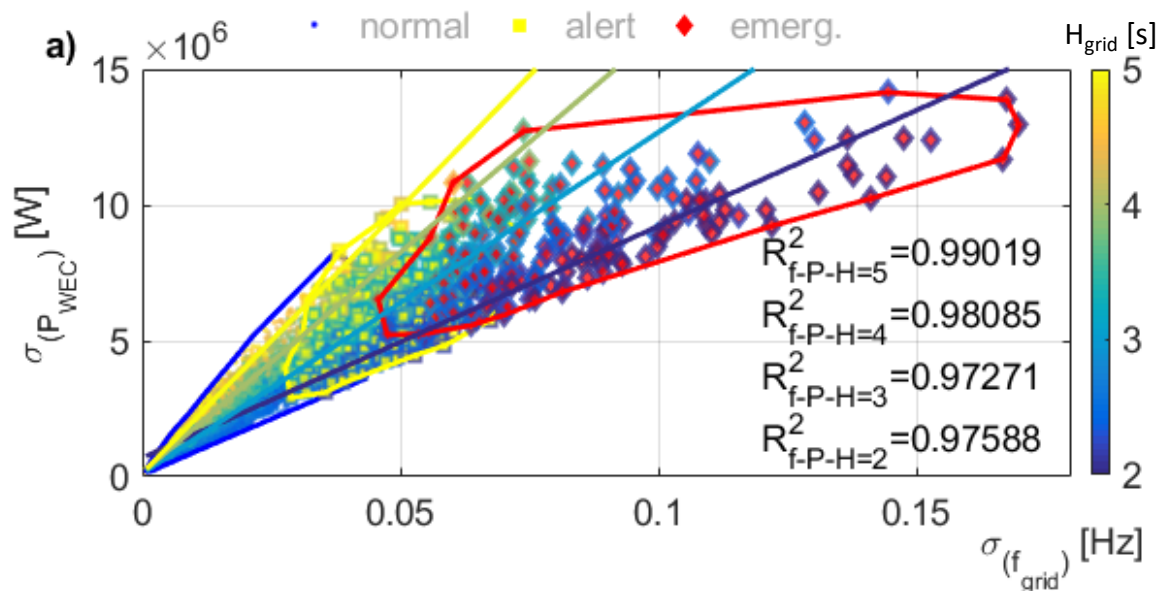


4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 2

METODOLOGÍA: PASO 2

Evaluación de la relación entre variable de diseño y perturbación

A Simulación del modelo



- ☐ **DEPENDENCIA ENTRE LAS VARIANZAS** (o desviaciones estándar) de **POTENCIA UNIDIMOTRIZ** inyectada en la red y la varianza de la **FRECUENCIA DE RED**
- ☐ A esta dependencia afecta el parámetro de estado de la red eléctrica.

4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 2



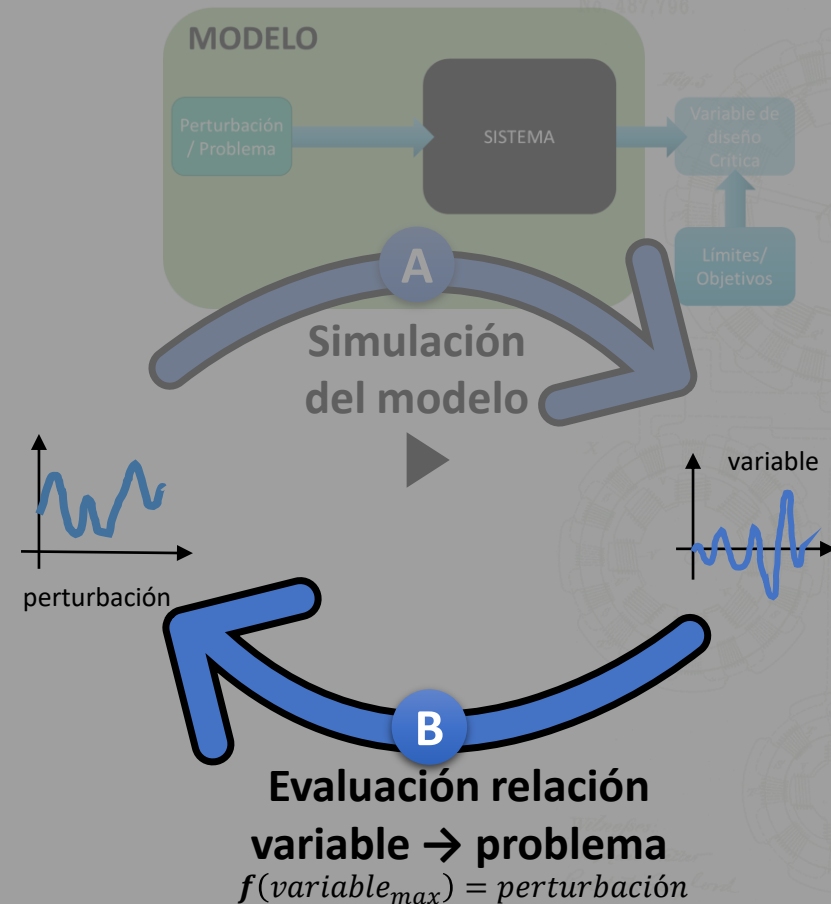
METODOLOGÍA: PASO 2



2

EVALUACIÓN CUANTITATIVA DE LA RELACIÓN ENTRE LA VARIABLE DE DISEÑO Y LA PERTURBACIÓN:

- A** Obtener una relación, función o similar entre la perturbación y la variable de diseño mediante la simulación del modelo del sistema.
- B** Mediante dicha relación, función o similar, **evaluar los valores límite de la perturbación** que hacen que la variable de diseño cumpla los objetivos o límites de diseño.

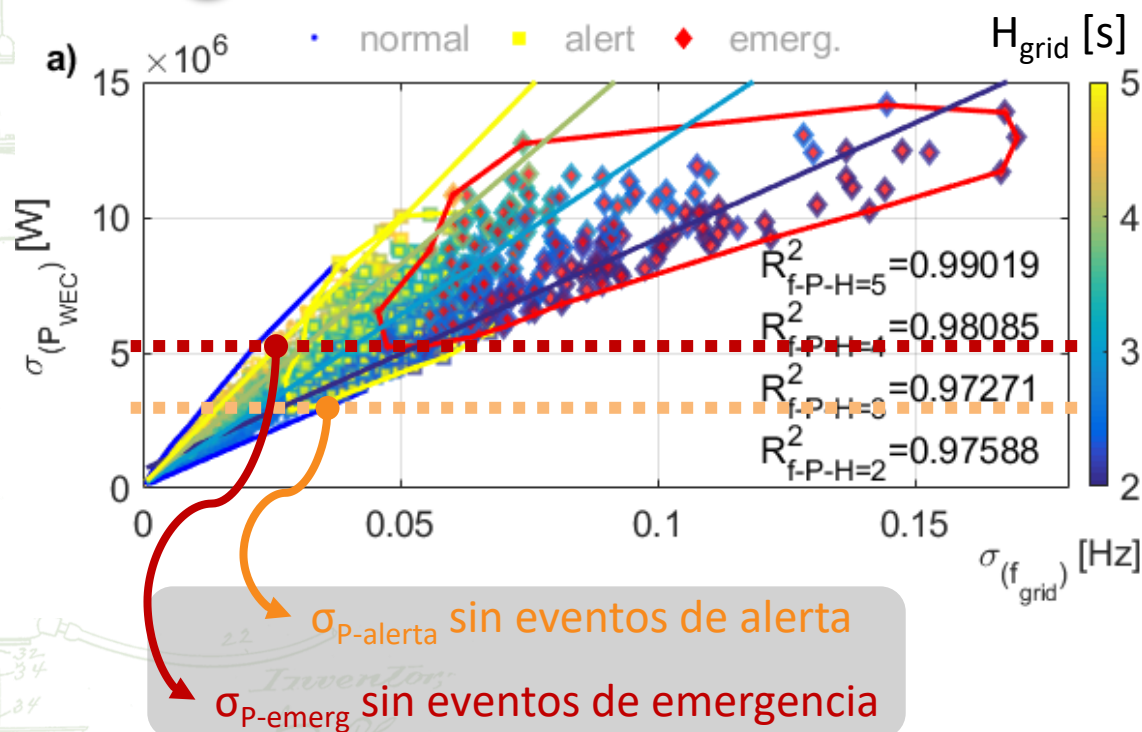


4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 2

METODOLOGÍA: PASO 2

Evaluación de la relación entre variable de diseño y perturbación

B Evaluación relación [variable → problema]



- En vez de obtener una función que relacione la potencia con la frecuencia, **SE EVALÚA UNA RELACIÓN A PARTIR DE LA NUBE DE PUNTOS QUE RELACIONAN LAS VARIANZAS DE POTENCIA Y LA DE FRECUENCIA.**
- Se puede **DEFINIR UNA VARIANZA DE POTENCIA** para la que **NO SE DAN ESTADOS NI DE ALERTA NI DE EMERGENCIA** para cualquier estado de red.
- Esta varianza de potencia objetivo se puede utilizar para diseñar el sistema de almacenamiento

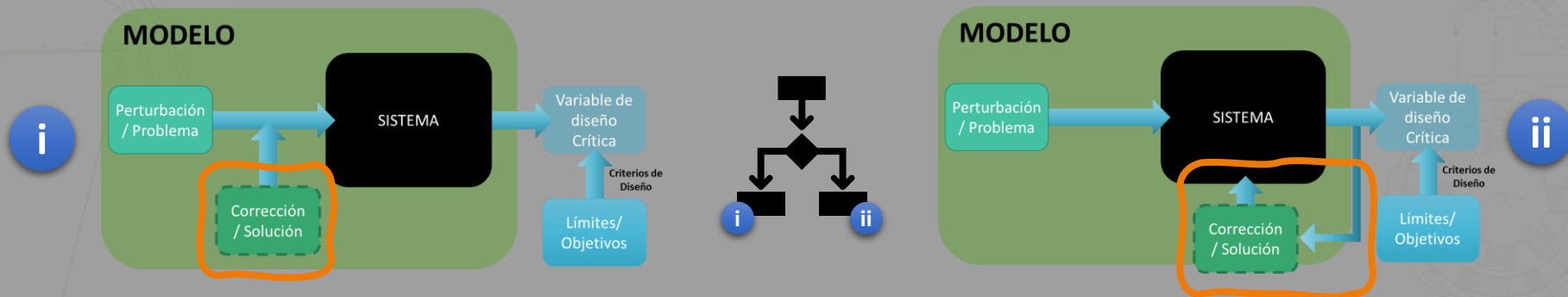
4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 3

METODOLOGÍA: PASO 3

3

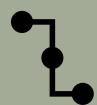
IDENTIFICACIÓN CUALITATIVA DE LA SOLUCIÓN (CORRECCIÓN):

- Definición de la acción correctora que permitiría mitigar la perturbación (A) o que permitiría mantener bajo control la variable de diseño (B).
- En esencia es decidir como integrar el almacenamiento en el sistema



Dada la relación encontrada - $f(variable) = perturbación$ -, mitigar la perturbación o mantener bajo control la variable de diseño produce resultados análogos.

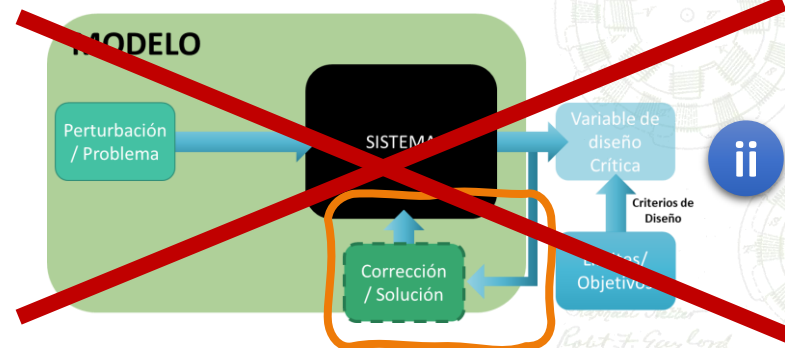
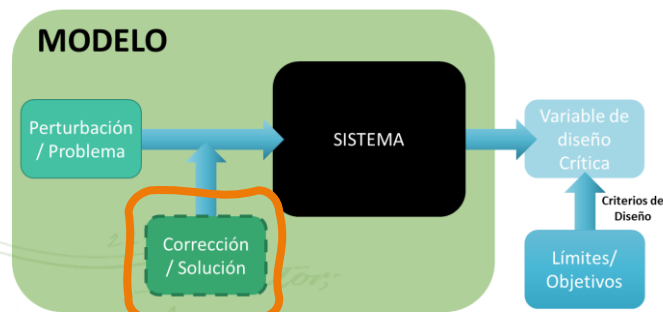
4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 3



METODOLOGÍA: PASO 3

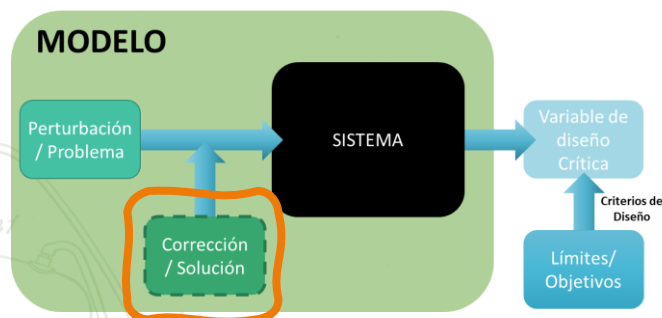
Identificación cualitativa de la solución (corrección)

- ❑ Se observa **DEPENDENCIA ENTRE LA VARIANZA DE LA FRECUENCIA Y LOS EVENTOS DE ALARMA Y EMERGENCIA.**
- ❑ A su vez, se observa dependencia entre las varianzas de la potencia inyectada y la frecuencia de red (parece una dependencia lineal ante estados de red similares)
- i** Se propone como solución la **INCLUSIÓN DE UN SISTEMA DE ALMACENAMIENTO EN EL PUNTO DE CONEXIÓN DEL PARQUE UNDIMOTRIZ PARA SUAVIZAR LAS OSCILACIONES DE POTENCIA.**
- ❑ Se puede diseñar un sistema de almacenamiento que reduzca la varianza de la potencia inyectada hasta un valor objetivo



4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 3

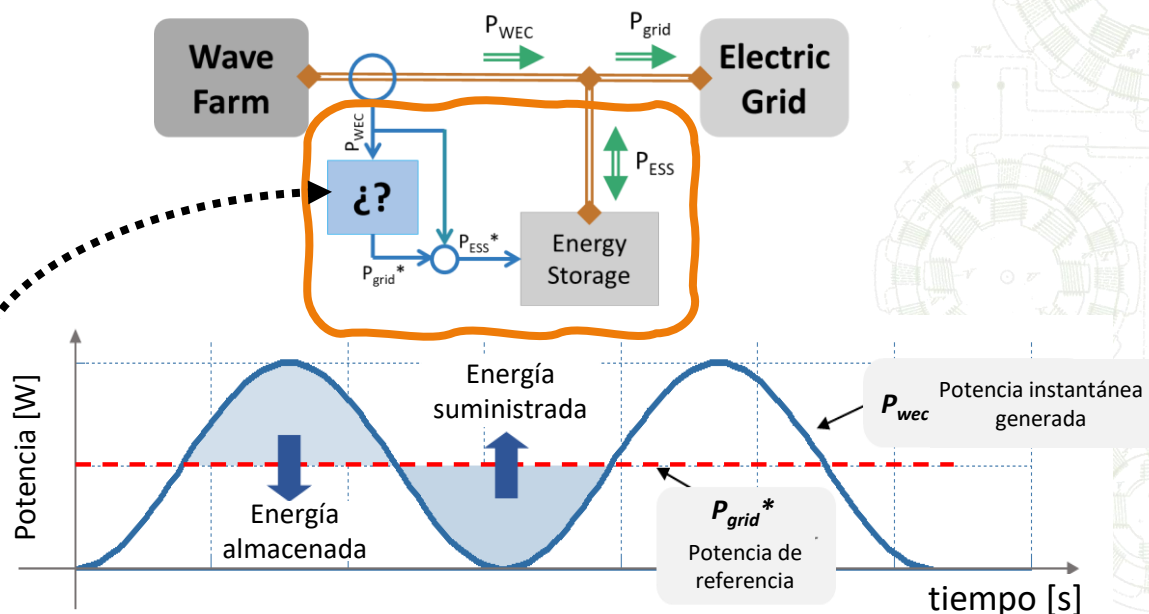
METODOLOGÍA: PASO 3 Identificación cualitativa de la solución (corrección)



NOTAS:

- Se desea "alisar" la potencia generada (P_{wec}).
- La potencia "alisada" se inyecta en la red (P_{grid}).
- La diferencia entre ambas potencias o se almacena o se suministra desde el sistema de almacenamiento (P_{ESS})
- La potencia alisada objetivo (P_{grid}^*) se debe calcular a partir de valores pasados de la potencia generada (P_{wec}).
- SE HA DE DEFINIR UN ALGORITMO CAPAZ DE DEFINIR INSTANTE A INSTANTE EL VALOR DE P_{GRID}^*

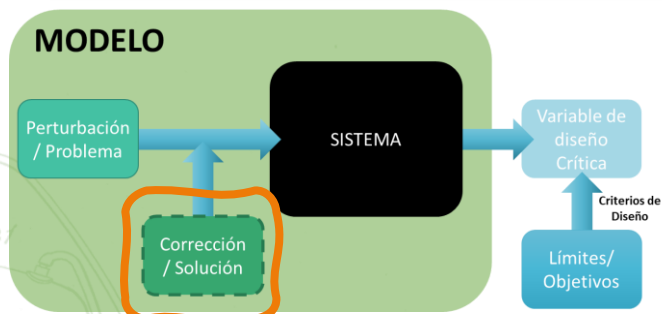
i Modificación del modelo con la inclusión del sistema de almacenamiento (**SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA + CONTROL**)



4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 3

METODOLOGÍA: PASO 3

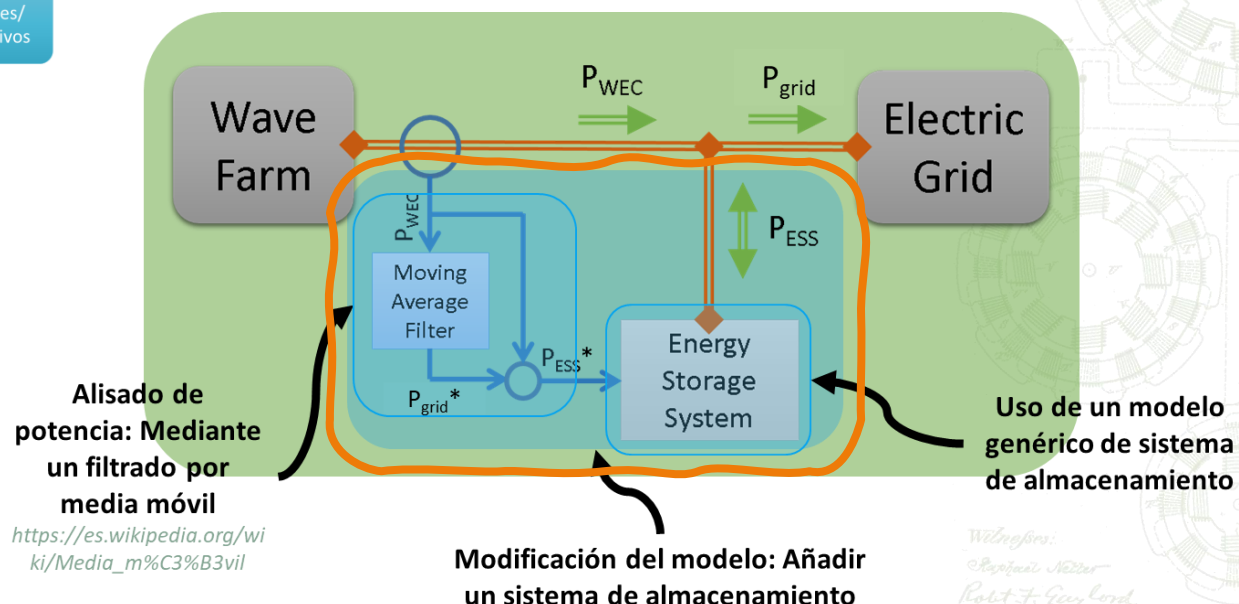
Identificación cualitativa de la solución (corrección)



i Modificación del modelo con la inclusión del sistema de almacenamiento (**SISTEMA DE ALMACENAMIENTO DE ENERGÍA + CONTROL**)

En este caso:

La potencia alisada objetivo (P_{grid}^*) se define como la **MEDIA DE MOVIL DE LA POTENCIA GENERADA** (la media aritmética de n valores anteriores).

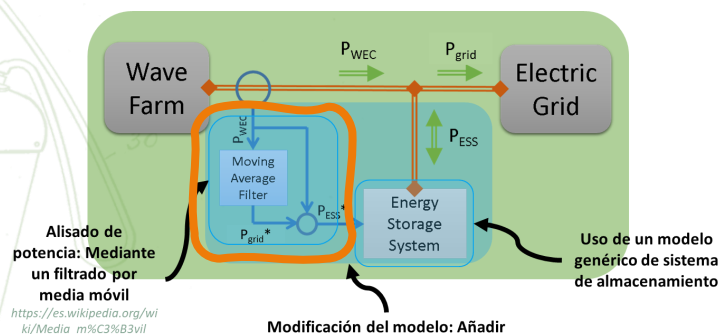


4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 3

METODOLOGÍA: PASO 3

Identificación cualitativa de la solución (corrección)

i La **MEDIA MOVIL SIMPLE** evalúa (P_{grid}^*) en cada instante como la media aritmética de **n** valores anteriores de P_{wec} .



El sistema de almacenamiento quedaría dimensionado definiendo **P NOMINAL, **E NOMINAL** y **N MUESTRAS** de la media movil.**

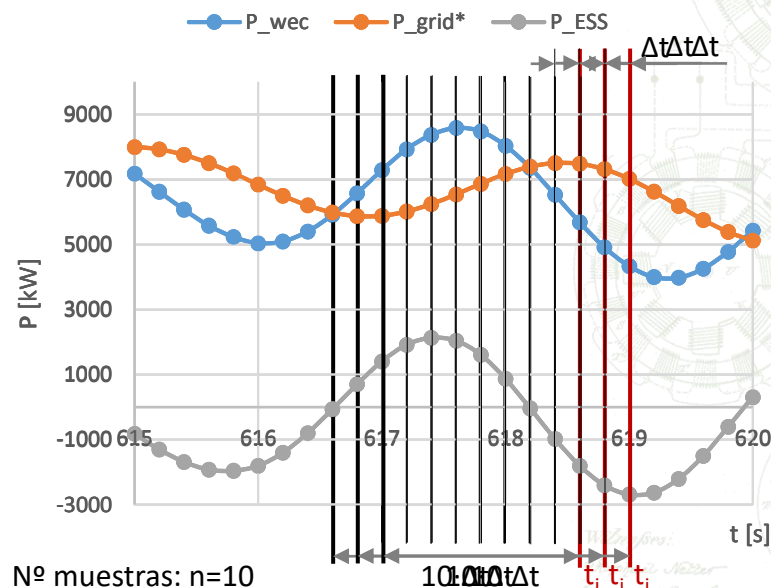
Moving Average: https://en.wikipedia.org/wiki/Moving_average

FILTRO DE MEDIA MOVIL SIMPLE (MAF)

$$P_{grid}^*(t_i) = \frac{P_{wec}(t_i) + P_{wec}(t_i - \Delta t) + P_{wec}(t_i - 2\Delta t) + \dots + P_{wec}(t_i - (n-1)\Delta t)}{n}$$

$$P_{grid}^*(t_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} P_{wec}(t_i - j \cdot \Delta t)$$

Ventana del filtro de media móvil



4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 4

METODOLOGÍA: PASO 4



M440.3

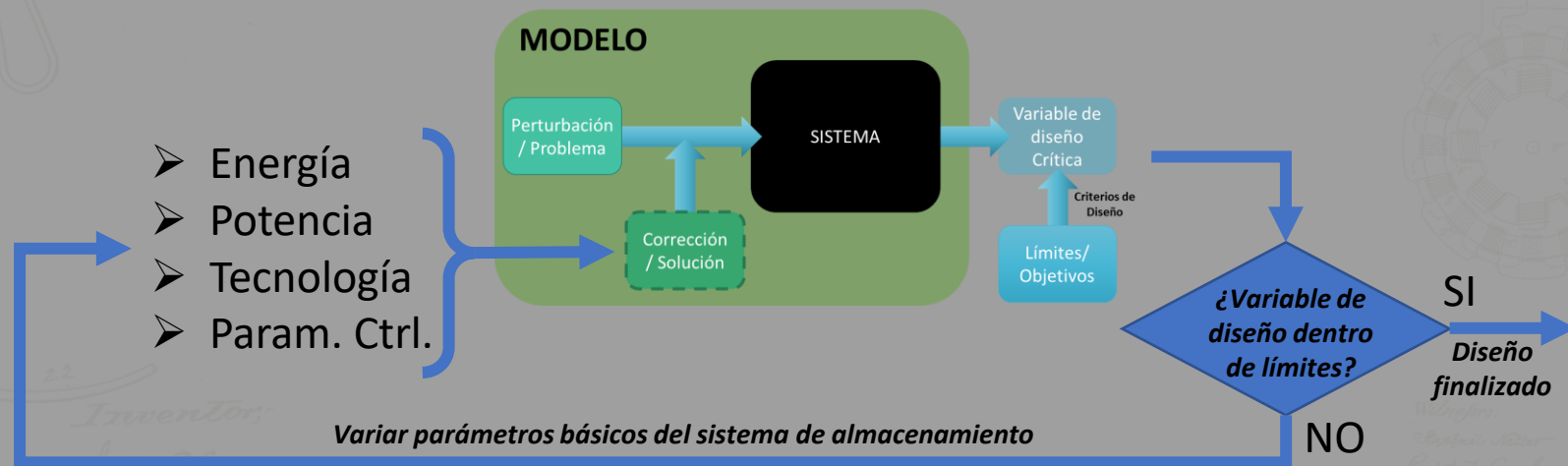
SISTEMAS OF ELECTRICAL

No. 487,798.

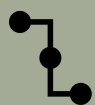
4

DETERMINACIÓN DE LOS PARÁMETROS BÁSICOS DE LA CORRECCIÓN:

- Definir los valores de los parámetros básicos del sistema de almacenamiento que mantienen la variable de diseño dentro de sus valores límite, lo que incluye tanto sus **características básicas** (energía, potencia), la **tecnología de almacenamiento** a usar, sus **parámetros de control**, como (incluso) el **punto de conexión a la red**.



4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 4



METODOLOGÍA: PASO 4

Determinación de los parámetros básicos de la corrección

PASO 4.1 → Calcular el tamaño de la ventana de la media móvil

Filtro de media móvil – ec. (1)

$$(1) \ y_t = \frac{1}{n} (x_t + x_{t-1} + \dots + x_{t-N}) = \frac{1}{n} \sum_{k=0}^{n-1} x_{t-k}$$

Estimación de varianza – ec. (2)

$$(2) \ \sigma_y^2 = \text{var}(y_t) = \frac{1}{n^2} \text{var} \left(\sum_{k=0}^N x_{t-k} \right) = \dots$$

$$\dots = \frac{1}{n^2} \sum_i^{n-1} \sum_j^{n-1} \text{cov}(x_{t-i}, x_{t-j})$$

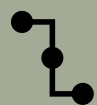
- Se puede predecir la varianza de potencia resultante de un filtro de media móvil mediante estadística (propiedades de la **VARIANZA**)

- OJO: las autocovarianzas de P_{wec} se pueden calcular una sola vez para después evaluar la varianza de P_{grid}^* para varios tamaños de ventana n*

Variance properties: <https://en.wikipedia.org/wiki/Variance>

Wiener–Khinchin theorem: https://en.wikipedia.org/wiki/Wiener%E2%80%93Khinchin_theorem

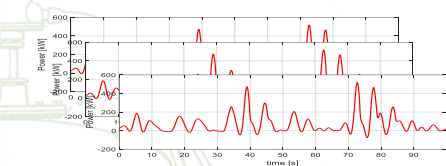
4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 4



METODOLOGÍA: PASO 4

Determinación de los parámetros básicos de la corrección

PASO 4.1 → Calcular el tamaño de la ventana de la media móvil

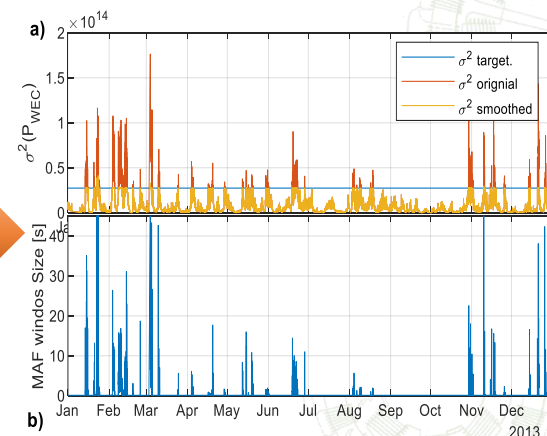


N perfiles de P_{wec} de
entrada evaluados

Evaluación de n para que
 $\sigma^2_{P_{grid}}$ sea igual o menor que
 $\sigma_{P-emerg}$ mediante ec. (2)

$$\sigma_y^2 = var(y_t) = \frac{1}{n^2} var\left(\sum_{k=0}^N x_{t-k}\right) = \dots$$

$$\dots = \frac{1}{n^2} \sum_i^{n-1} \sum_j^{n-1} cov(x_{t-i}, x_{t-j})$$



Valores n de la ventana del MAF para cada perfil de P_{wec} que cumple que
varianza P_{grid} está por debajo del valor límite definido

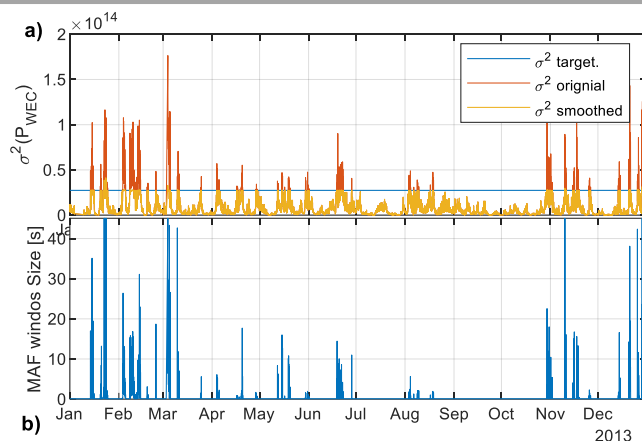
4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 4

METODOLOGÍA: PASO 4

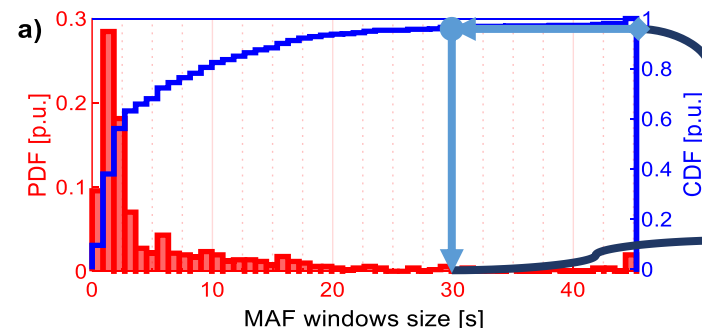
Determinación de los parámetros básicos de la corrección

PASO 4.1 → Calcular el tamaño de la ventana de la media móvil

- Se quiere reducir la varianza mediante el alisado de la potencia con sistemas de almacenamiento
- Una vez definida la varianza objetivo, **SE PUEDE CALCULAR EL FILTRADO CON MEDIA MÓVIL NECESARIO** (la ventana necesaria).
- Se debe elegir la ventana para alisar la potencia en el % de casos que se requiera)
- OJO:** cuanto mayor ventana, mayores necesidades de almacenamiento

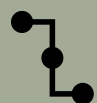


Evaluación n
para que σ^2_{Pgrid}
sea igual o
menor que
 $\sigma_{P-emerg}$ mediante
ec. (2)



97% de los
casos alisados
Ventana de MAF
de 30 segundos

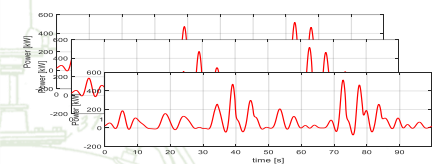
4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 4



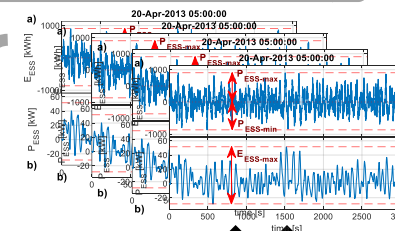
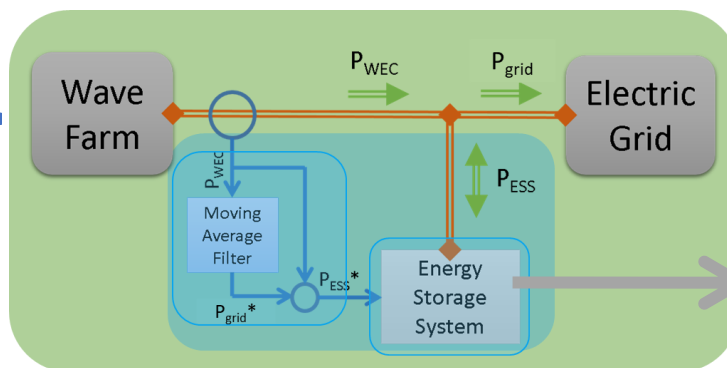
METODOLOGÍA: PASO 4

Determinación de los parámetros básicos de la corrección

PASO 4.2 → Calcular necesidades de potencia-energía del almacenamiento



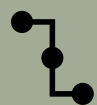
N perfiles horarios
de P_{wec} de entrada
evaluados



N perfiles de P_{ESS} y tras E_{ESS} el
MAF de 30 s de ventana

Cálculo de la energía y
potencia nominal para cada
hora del año

4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 4

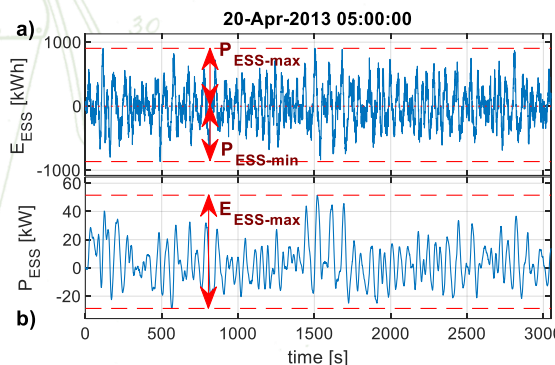


METODOLOGÍA: PASO 4

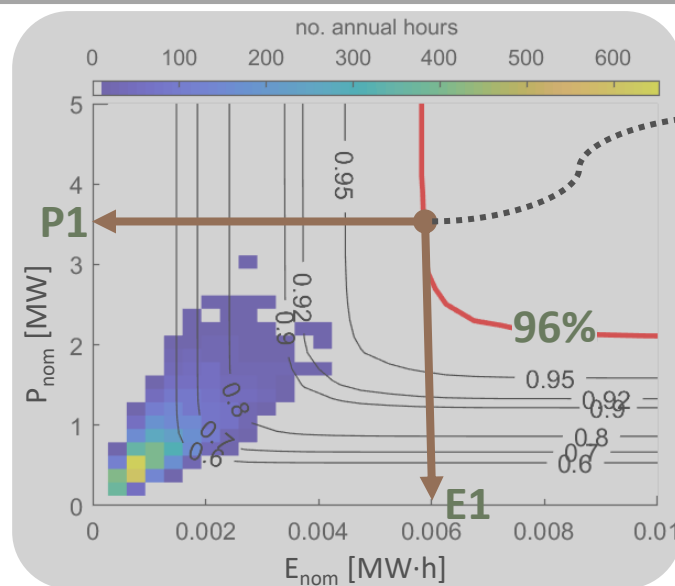
Determinación de los parámetros básicos de la corrección

PASO 4.2 → Calcular necesidades de potencia-energía del almacenamiento

Cálculo de la energía y potencia nominal para cada hora del año



Se evalúan la **OSCILACIÓN DE ENERGÍA Y DE POTENCIA MÁXIMAS** para cada simulación horaria como **VALORES NOMINALES** del almacenamiento

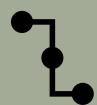


Un dispositivo con unas características de **P1** como potencia nominal y **E1** como energía nominal cubriría las necesidades almacenamiento del **96%** de las horas anuales

Se puede obtener un **HISTOGRAMA ACUMULADO DE DOS VARIABLES (ENERGÍA Y POTENCIA DE ALMACENAMIENTO)**, que refleje el nº de horas al año en las que el sistema del almacenamiento alisa completamente las oscilaciones hasta el valor requerido.

MARCOS BLANCO - Ejemplo práctico de dimensionado de almacenamiento de energía 2 (renovables)

4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 4



METODOLOGÍA: PASO 4

Determinación de los parámetros básicos de la corrección

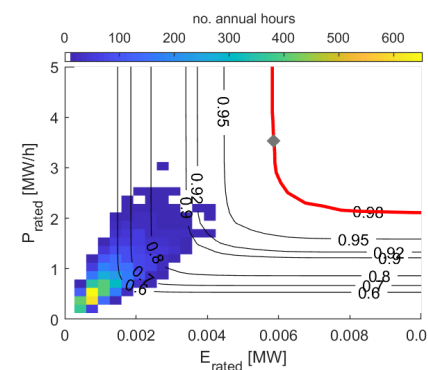
PASO 4.3 → Determinar tecnología de almacenamiento

PUNTO DE PARTIDA:

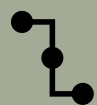
Tras modelar una determinada red y un determinado escenario se han obtenido unas necesidades de almacenamiento en un espacio temporal, se parte de la determinación de los valores de Potencia (P) y Energía (E) necesarios para cubrir las necesidades definidas.

PROCEDIMIENTO:

- A** Seleccionar las tecnologías de almacenamiento adecuadas para dicha aplicación (baterías, supercondensadores y volantes de inercia)
- B** Definir las dimensiones de los almacenamientos de cada tipo en términos de potencia y energía, según un % de casos cubiertos
- C** Comprobar la idoneidad de los almacenamientos de cada tipo en términos de adecuación a las necesidades de almacenamiento y cuantificar el coste de cada una de las soluciones



4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 4



METODOLOGÍA: PASO 4

Determinación de los parámetros básicos de la corrección

PASO 4.3 → Determinar tecnología de almacenamiento

A A partir de dispositivos concretos se puede dimensionar un dispositivo determinado (los siguientes se han utilizado en este ejemplo):

BATERÍAS



BATERÍAS LiFePO4: 20Ah, 3.2V.

Energía: 4.3kWh

Potencia: 137kW

688V nominales

(con 215 celdas en serie)

SUPERCONDENSADORES



MAXWEL: 2,7V 3000F

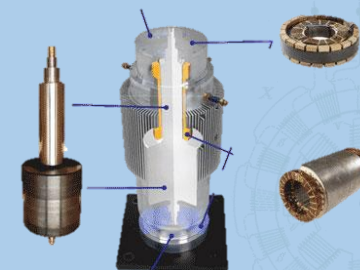
0.58 kWh (Energía con U min 50%)

Potencia max: 138kW

690V nominales

(256 unidades, 690V, 200A)

VOLANTES DE INERCIA



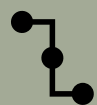
VYCON

0.83 kWh (Energía hasta el 50% de la velocidad)

Potencia max: 500kW

690V nominales

4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 4



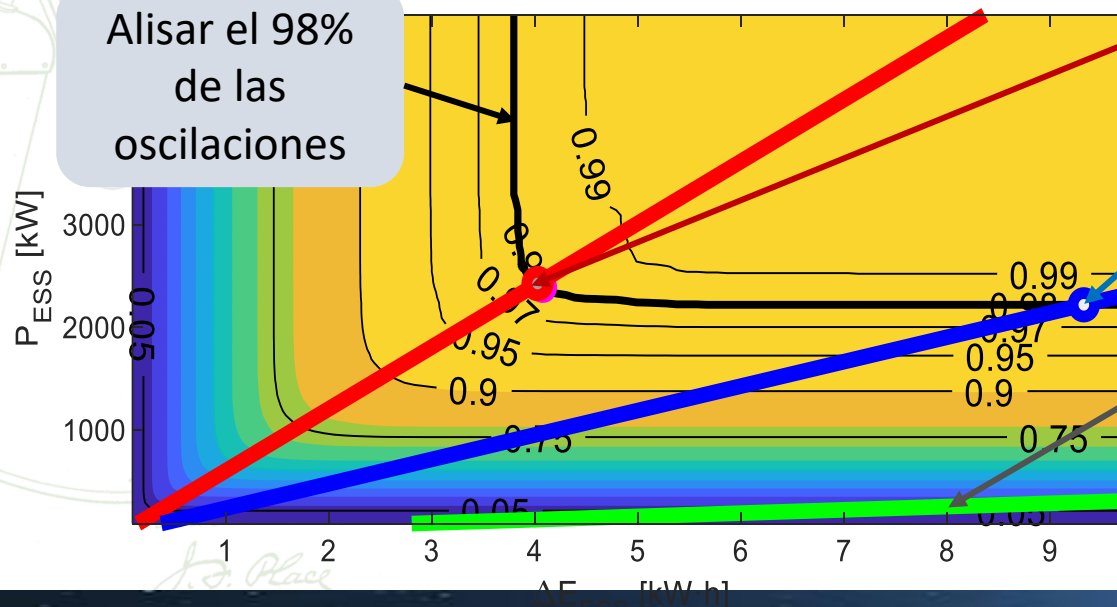
METODOLOGÍA: PASO 4

Determinación de los parámetros básicos de la corrección

PASO 4.3 → Determinar tecnología de almacenamiento

B Definir las dimensiones de los almacenamientos de cada tipo en términos de potencia y energía, según un % de casos cubiertos.

Alisar el 98%
de las
oscilaciones



Volante Vycon:

- ud. 500 kW, 0.83 kWh
- Total: 2426 kW, 4,02 kWh

Supercondensador

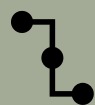
- ud. 138 kW, 0.58 kWh
- Total: 2219 kW, 69.6 kWh

Baterías

- Ud. 137 kW, 4.3 kWh
- Total: 2219 kW, 69.6 kWh

*Cada tecnología tiene una
pendiente constante
($k = E_{nom}/P_{nom}$) en el plano E/P*

4 - CASO DE ESTUDIO: Metodología <> Paso 4



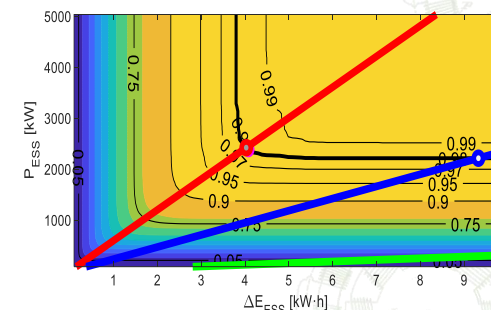
METODOLOGÍA: PASO 4

Determinación de los parámetros básicos de la corrección

PASO 4.3 → Determinar tecnología de almacenamiento

c Comprobar la idoneidad de los almacenamientos de cada tipo (adecuación a las necesidades y coste)

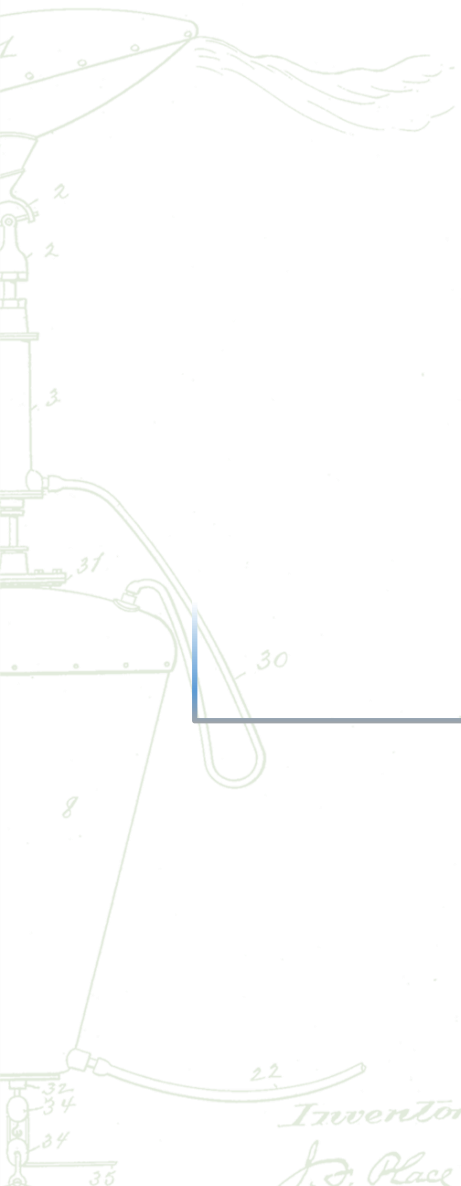
- ❑ Cada tecnología tiene una pendiente constante ($k=E_{nom}/P_{nom}$) en el plano E/P
- ❑ La solución se obtiene en el corte de la "recta" que define el sistema de almacenamiento, y la "curva" que define el objetivo de casos a cubrir.
- ❑ La recta de las baterías no llega a cortar a la curva objetivo en la gráfica (gran exceso de energía)



Tecnología ESS	P nominal [kW]	E nominal [kWh]	Coste [k\$]*	Unidades	P_nom/P_req	E_nom/E_req
'LiFePO4'	2219,2	69,653	4160	17	100%	1720%
'Flywheel'	2426,3	4,027	2620	5	103%	100%
'SuperCaps'	2219,2	9,326	2063	17	100%	229%

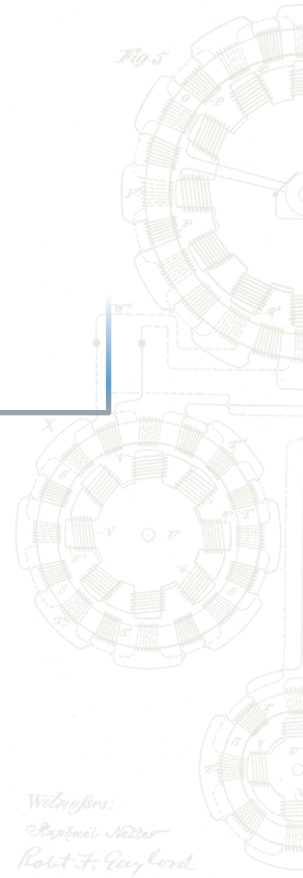
* Para información de costes. consultar: [Energy Storage Technology and Cost Characterization Report. U.S. DOE \(2019\)](#)

5 – EJERCICIO



(No Model.)

N. T.
SYSTEM OF ELECTRICAL
No. 487,796.



5 - EJERCICIO: Descripción

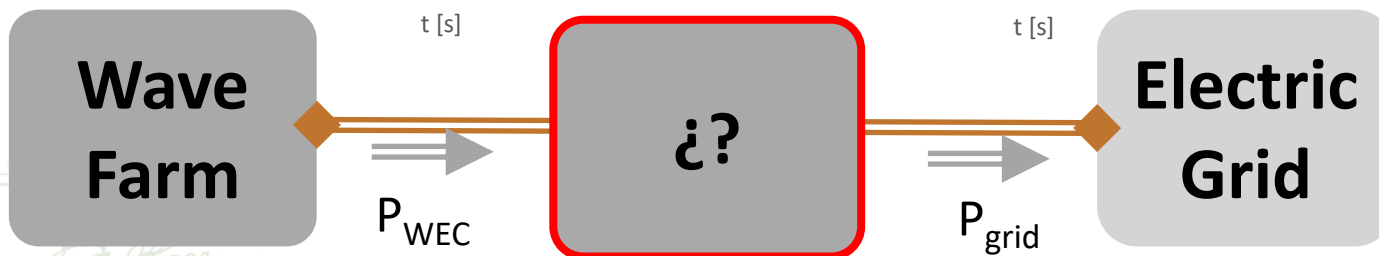
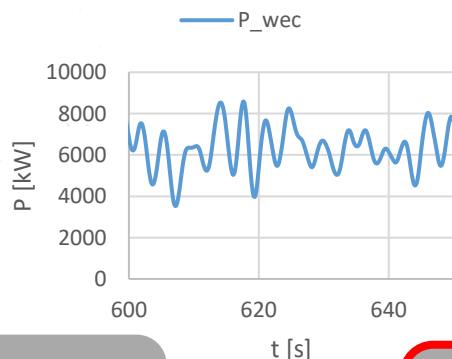
- ☐ El ejercicio propuesto consiste en la realización de los **CÁLCULOS DEL PASO 4 DE LA METODOLOGÍA DESCRITA EN EL CASO DE ESTUDIO** presentado (granja undimotriz en sistema eléctrico insular) pero de manera **SIMPLIFICADA**
- ☐ El ejercicio se realizara en **EXCEL** como parte de la sesión
- ☐ El ejercicio consta de **2 PARTES**:
 1. Determinación del tamaño de ventana del MAF
 2. Obtención del histograma acumulado bi-variante de potencia y energía requerida y evaluar 3 tecnologías de almacenamiento
- ☐ **MATERIAL** suministrado:
 - ✓ Fichero plantilla en EXCEL:
EJERCICIO_PARTES01&02_DIMENSIONADOESS_PLANTILA.XLSX
 - ✓ Datos de entrada (1 caso de generación undimotriz):
IN_PWEC_20130222T22.TXT

5 - EJERCICIO: Resumen de teoría

¿Qué tengo?

Potencia generada mediante un dispositivo undimotriz

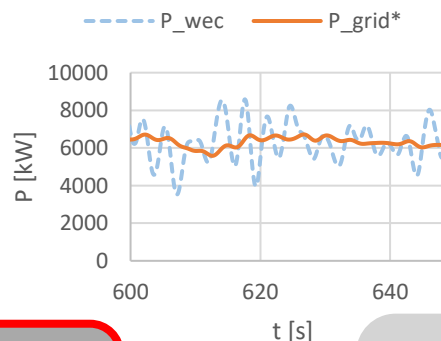
Oscilación de potencia alta (varianza alta) →
perturbación en la red eléctrica alta →
oscilación en la frecuencia eléctrica alta



¿Qué quiero/necesito?

Potencia inyectada a la red eléctrica adecuada

Inyección en la red eléctrica de una potencia
ALISADA → Oscilación de potencia baja (varianza baja) →
perturbación en la red eléctrica baja →

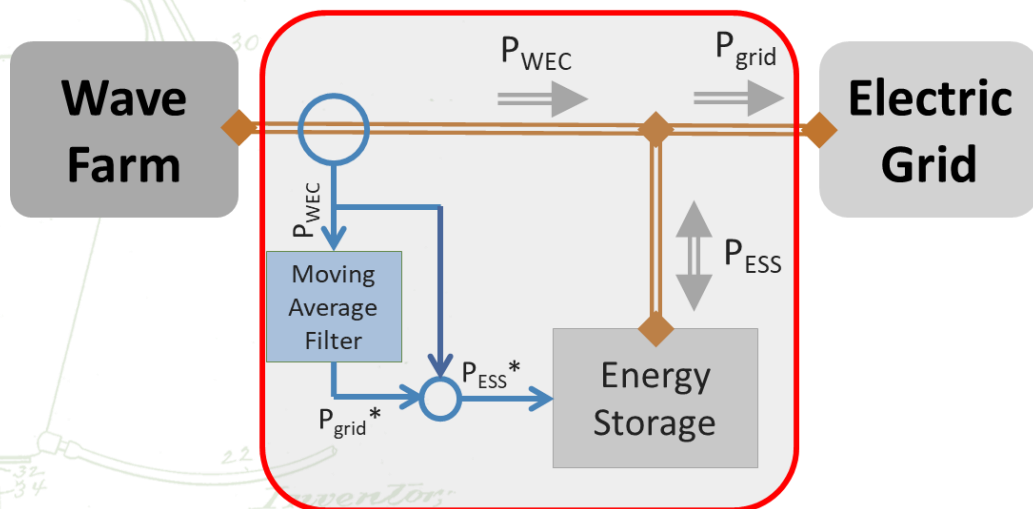


5 - EJERCICIO: Resumen de teoría

¿Cómo lo soluciono?

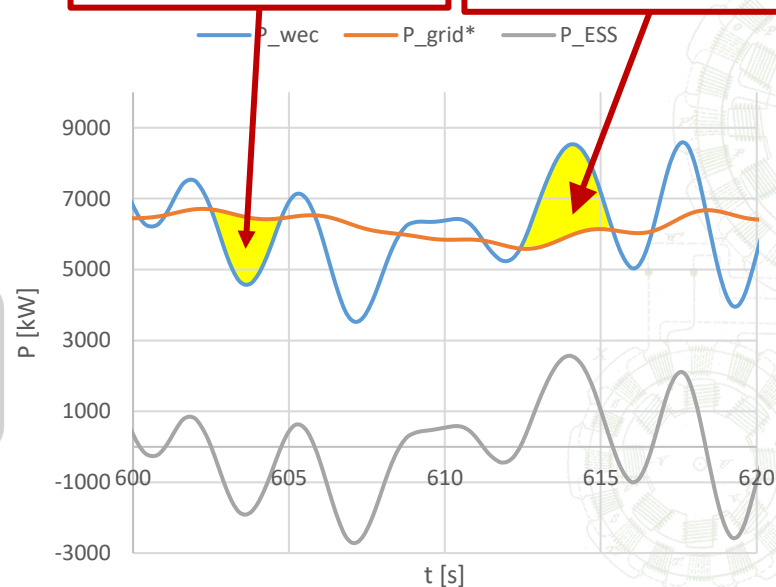
Dispositivo de almacenamiento que **ALISE las oscilaciones**

- La energía ni se crea ni se destruye → la diferencia entre potencia generada y potencia inyectada debe “fluir” hacia y desde algún otro dispositivo
- Ese dispositivo será el almacenamiento



Cuando P_{wec} (generada) sea menor que P_{grid} (inyectada en red) → Ceder potencia

Cuando P_{wec} (generada) sea mayor que P_{grid} (inyectada en red) → Absorber potencia



$$P_{WEC} - P_{grid} = P_{ESS}$$

5 - EJERCICIO: Resumen de teoría

PROBLEMA 1:

¿Cómo calculo instante a instante la potencia a inyectar en la red (P_{grid})?

Necesito:

1. Que la **potencia inyectada en la red tenga la misma media que la potencia generada** → Si la media de P_{wec} es mayor que P_{grid} , el dispositivo de almacenamiento tendría que absorber la diferencia y con el tiempo acabaría completamente lleno. Situación análoga si la media de P_{wec} es menor que P_{grid}
2. Que la **potencia inyectada tenga menos oscilaciones que la potencia generada** (necesito ALISAR la potencia generada).
3. En un sistema real, necesito **calcular** un valor de P_{grid} en **cada instante**.
4. En un sistema real, necesito **calcular** el valor instantáneo de P_{grid} en base a **variables que pueda medir**.

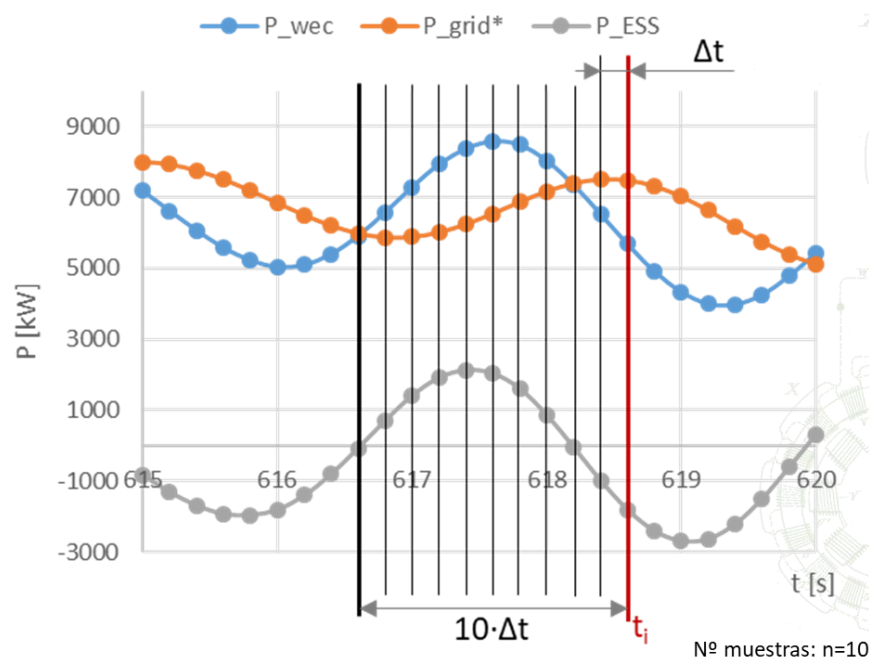
5 - EJERCICIO: Resumen de teoría

PROBLEMA 1:

¿Cómo calculo instante a instante la potencia a inyecta en la red (P_{grid})?

SOLUCIÓN 1: P_{grid} se calcula filtrando P_{WEC}

- Por ejemplo, un filtro de PASO BAJO, por definición da como resultado la señal original con las oscilaciones de alta frecuencia atenuadas.
- Un filtro de media móvil es un tipo de filtro de paso bajo.
- La media móvil simple evalúa (P_{grid}) en cada instante como como la media aritmética de n valores anteriores de P_{wec} .



$$P_{grid}^*(t_i) = \frac{P_{wec}(t_i) + P_{wec}(t_i - \Delta t) + P_{wec}(t_i - 2\Delta t) + \dots + P_{wec}(t_i - (n-1)\Delta t)}{n}$$

n

Ventana del filtro de
media móvil

5 - EJERCICIO: Resumen de teoría

PROBLEMA 2:

¿Cómo determino las necesidades de energía y potencia del sistema de almacenamiento?

Necesito:

1. Evaluar/calcular/saber que requerimientos de Energía y Potencia tendré en mi sistema de almacenamiento.
2. Relacionar cada pareja de valores nominales de Energía y Potencia requeridos con su capacidad de alisar la potencia undimotriz generada; es decir, con un % de oscilaciones alisadas.
3. En un sistema real, alisar el 100% de las oscilaciones nos puede llevar a valores realmente grandes de Potencia y Energía para alisar sólo unas pocas oscilaciones de gran magnitud.
4. Saber que tecnologías de almacenamiento serían adecuadas para los niveles de Potencia y Energía. En un sistema real, en tecnologías como los supercondensadores, la relación de Energía y Potencia es fija.

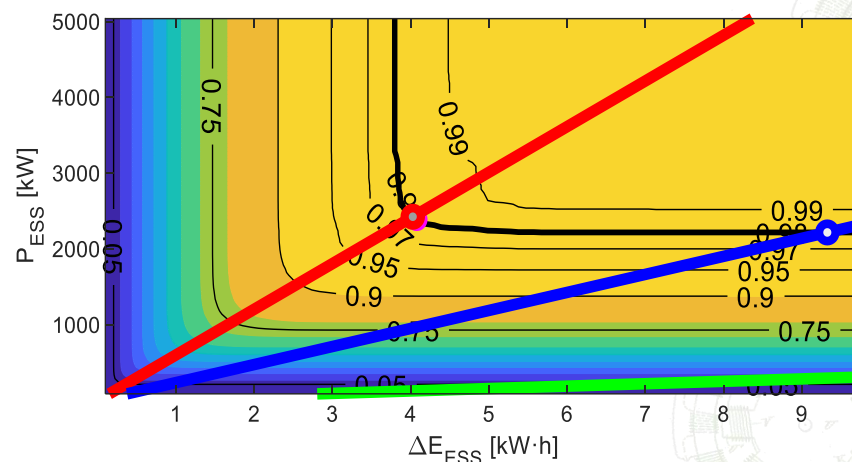
5 - EJERCICIO: Resumen de teoría

PROBLEMA 2:

¿Cómo determino las necesidades de energía y potencia del sistema de almacenamiento?

SOLUCIÓN 2:

- 1) P_{ESS} se evalúa calculando $P_{WEC} - P_{GRID}$
- 2) E_{ESS} se evalúa integrando P_{ESS}
- 3) Se detectan todos los máximos y mínimos del perfil temporal de P_{ESS} y E_{ESS}
- 4) Se representan todos estos máximos/mínimos en un diagrama de dispersión, y a partir de dicho diagrama de dispersión, se obtiene un histograma de contingencia acumulado.
- 5) Se representa sobre el histograma la curva que representa cada tecnología de almacenamiento y se evalúa la P y la E para cubrir un cierto % de máximos-mínimos y su coste



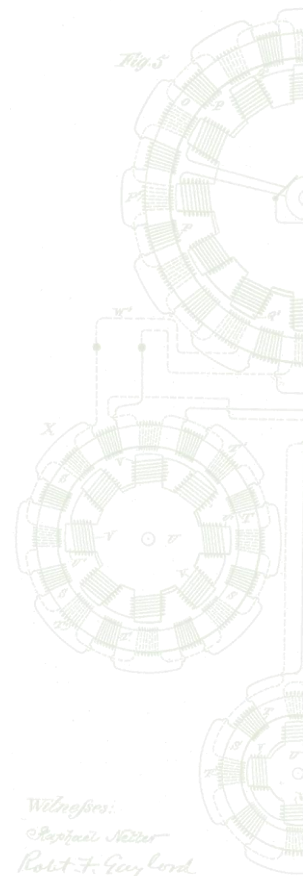
5 - EJERCICIO: Notas/Avisos

1. **OJO:** capturas de pantalla para OFFICE 2016. Para otras versiones, consultar ayuda de Microsoft referenciada.
2. **OJO:** En las celdas tipo **Entrada** se han de meter valores numéricos, generalmente variables de diseño a decidir por el alumno.
3. **OJO:** En las celdas tipo **Cálculo** se han de introducir fórmulas para calcular los valores requeridos. En caso de tener ya la fórmula introducida, NO modificar.

OJO: capturas de pantalla para OFFICE 2016. Para otras versiones, consultar ayuda de Microsoft referenciada.

(No Model.)
N. T.
SYSTEM OF ELECTRICAL
No. 487,796.

Fig. 5



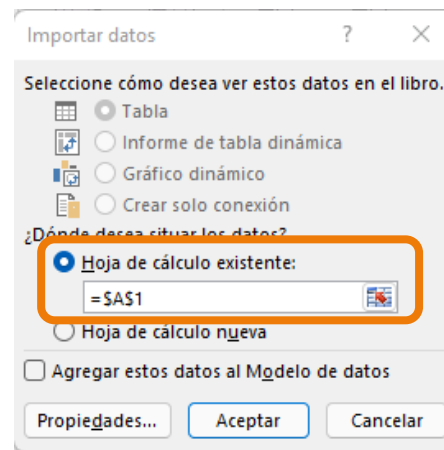
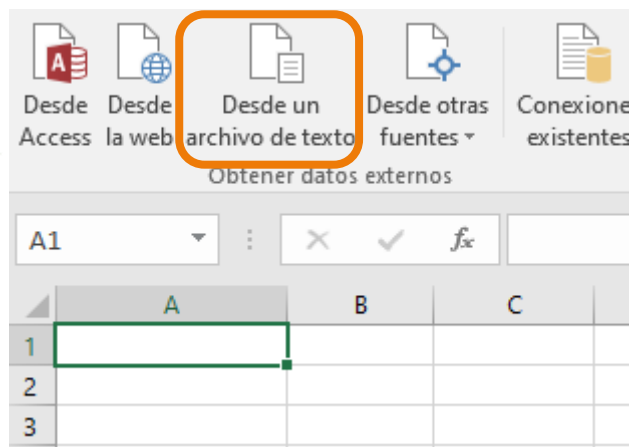
Witnesses:
Raphael Walter
Robert F. Gaylord

5 - EJERCICIO: Parte 1 -> Carga de datos

1. Abrir fichero plantilla y rellenar los datos personales en la hoja **DATOS ALUMNO**

	A	B
1	Nombre	
2	Email	
3		

2. Cargar los datos de generación en la hoja **in_Pwec**.



Como cargar datos en Excel desde un TXT

<https://support.microsoft.com/es-es/office/importar-o-exportar-archivos-de-texto-txt-o-csv-5250ac4c-663c-47ce-937b-339e391393ba>

5 - EJERCICIO: Parte 1 -> Calcular P y E del ESS

3. Generar los perfiles P_{grid} con filtros MAF con ventanas de diferente número de muestras en la hoja **Pgrid**.

- Introducir la fórmula para evaluar la media móvil y extender a todo el rango de valores.

=SI.ERROR(SUMA(DESREF(datoPwec;-nº_muestras_MAF+1;0;nº_muestras_MAF; 1))/nº_muestras_MAF;""))

Por ejemplo, para la primera celda (B3), la fórmula sería:

=SI.ERROR(SUMA(DESREF(in_Pwec!\$A2;-B\$1+1;0;B\$1; 1))/B\$1;""))

$$P_{grid}^*(t_i) = \frac{1}{n} \sum_{j=0}^{n-1} P_{wec}(t_i - j \cdot \Delta t)$$

- Se añade la función [SI.ERROR](#) para eliminar los mensajes de error y sustituirlos por celdas vacías)
- Los valores del número de muestras de la ventana (fila 1 -> B1:U1) se encuentran en la hoja **parte1.Summary** en B2:U2

4. Calcular la varianza de la potencia filtrada para cada tamaño de ventana en la hoja **parte1.Summary** con la función de Excel [VAR.P](#). El valor de la desviación estándar

CONSEJOS:

- Control+Desplazamiento (←↑→↓) te lleva a la última celda no vacía en la dirección seleccionada
- Shift+Desplazamiento (←↑→↓) permite seleccionar un rango de celdas con el teclado avanzando en la dirección seleccionada
- Seleccionando una celda con una fórmula y un rango de celdas contiguas vacías, y seleccionar en el menú "INICIO >> Modificar>> Rellenar >> hacia abajo" permite rellenar hacia abajo todo el rango con la fórmula inicial.
- Revisar como [referenciar celdas](#) en las fórmulas de manera relativa, de manera absoluta y de manera mixta.
- Revisar información sobre [media móvil](#)
- Revisar información sobre función [DESREF](#) de EXCEL

5 - EJERCICIO: Parte 1 -> Potencia filtrada 1/2

5. Generar los perfiles P_{ESS} como la diferencia entre los valores de P_{wec} y de P_{grid} en la hoja **PESS**.

- Introducir la fórmula para evaluar la media móvil y extender a todo el rango de valores e incluir SI.ERROR para sustituir los valores de error por celdas vacías.

Por ejemplo, para la primera celda (B3), la fórmula sería:

`=SI.ERROR(Pgrid!B3-in_Pwec!$A1;"")`

6. Generar los perfiles E_{ESS} como la integral rectangular de P_{ESS} en la hoja **EESS**.

- Introducir la fórmula para evaluar la [integral rectangular](#).

`=SI.ERROR((datoPESS*dt)+SI.ERROR(datoPESS;0); 0)`

Por ejemplo, para la primera celda (B3), la fórmula sería:

`=SI.ERROR((PESS!B2)*A3+SI.ERROR(B2;0); 0)`

$$\int_a^b f(x)dx = f(a) \cdot (b - a)$$

5 - EJERCICIO: Parte 1 -> Potencia filtrada 2/2

7. Calcular la potencia nominal y la energía nominal para cada caso de ventana de MAF en la hoja **parte1.Summary**.

- La potencia nominal es el valor absoluto máximo

Por ejemplo, para el primer valor de ventana, la fórmula sería:

$=\text{MAX}(\text{ABS}(\text{PESS!B502:B8954}))/1000$

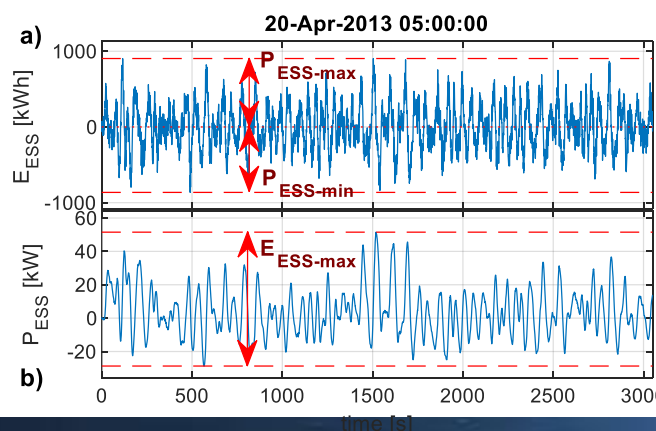


No puede haber celdas vacías o texto en el rango de la función ABS

- La energía nominal es el valor máximo pico-pico

Por ejemplo, para el primer valor de ventana, la fórmula sería:

$=\text{MAX}(\text{ABS}(\text{PESS!B501:B8954}))/1000$



5 - EJERCICIO: Parte 1 -> Ventana del MAF

8. Seleccionar el nº de muestras de la ventana de MAF que permiten mantener la desviación estandar de la potencia P_{grid} por debajo de **750 kW**
9. Revisar en **parte1.Summary** la fila 5 (desviación estándar de la potencia alisada) y seleccionar el mejor valor de MAF
10. Copiar dicho valor de MAF en la celda B2 de la hoja **ESS**.
 - Se van a rellenar automáticamente las columnas B, C y D con los valores de P_{ESS} , E_{ESS} y E_{ESS} corregida del caso de la ventana seleccionada gracias a la fórmula ya introducida en la plantilla que utiliza [BUSCARH](#)

Por ejemplo, para la primera celda (B3), la fórmula sería:
`=SI.ERROR((PESS!B2)*A3+SI.ERROR(B2;0);0)`

5 - EJERCICIO: Parte 1 -> Ventana del MAF

11. Intentar responder a las dos preguntas planteadas en la hoja **parte1.Summary** (Model.)

1. *Justificar la elección del número de muestras del filtro de media móvil*
2. *¿Cómo es la evolución de la Energía necesaria según aumenta el tamaño de la ventana del filtro y cómo es la relación de entre las variables de tamaño de ventana y varianza de la potencia inyectada a red Pgrid?*

30	Pregunta 1	Justificar la elección del número de muestras del filtro de media móvil
31	32	33
34	35	36
37	38	39
40	41	42
43	Pregunta 2	¿Cómo es la evolución de la Energía necesaria según aumenta el tamaño de la ventana del filtro y cómo es la relación de entre las variables de tamaño de ventana y varianza de la potencia inyectada a red Pgrid?
44	45	46
47	48	49
50	51	52
53		

2 Ideas/ conclusiones principales:



- Según aumentamos el tamaño de la ventana - o número de muestras - del filtro de media móvil la energía necesaria en nuestro sistema de almacenamiento sube.
- Según aumentamos el tamaño de la ventana - o número de muestras - del filtro de media móvil la desviación estándar de la potencia alisada baja hasta un cierto valor y luego se estabiliza.

5 - EJERCICIO: Parte 2 -> Detectar picos P-E

1. Detectar picos de potencia con una función que compara el valor anterior y posterior y rellenar la columna E de la hoja **ESS**
Por ejemplo, para la primera celda (E3), la fórmula podría ser: =SI(Y(B3>B2;B3>B4);1;0)
2. Extraer el valor de los picos de potencia con una función SI en la columna F de la hoja **ESS**
Por ejemplo, para la primera celda (F3), la fórmula podría ser: =SI(E3;ABS(B3)/1000;"")
3. Hacer lo análogo con la energía en las filas G y H, teniendo en cuenta que las unidades de energía tiene que pasar de Julios a kWh. *(Por ejemplo, =SI(G3;ABS(D3)/1000/3600;""))*
4. Copiar los valores de pico de energía de las filas F y H en las filas I y J siguiendo las indicaciones de la siguiente guía:
 - Seleccionar la columna F; copiar la columna y pegarla en otra columna auxiliar con “Pegar sólo valores”; seleccionar la nueva columna; pulsar: inicio >> Modificar >> Buscar y Seleccionar >> Ir a Especial...; marcar “constantes” y “números”; copiar la columna, pegar sólo valores en la columna I.
 - Hacer lo análogo con la columna H en la columna J



Asegurarse que los valores de potencia en las columnas G e I están en kW y los valores de las columnas H y J están en kWh.



Copiar los valores sin celdas vacías en las filas I y J, pero nunca usar CORTAR sobre las columnas I y J, ya que hay referencias a dichas columnas en gráficas y en las fórmulas de la hoja parte2.Summary, que pueden perderse/corromperse.

5 - EJERCICIO: Parte 2 -> Histograma P-E

5. El histograma bivariante acumulado se encuentra en el rango C37:M57 de la hoja **parte2.Summary**
6. Los valores del histograma representan el número de picos que tienen un valor de energía y potencia menor o igual a los valores de referencia de la fila 36 y la columna B respectivamente
7. Se va a utilizar la función CONTAR.SI.CONJUNTO de EXCEL

La fórmula representaría:

`CONTAR.SI.CONJUNTO(columna de E_ESS; "<=" & E_ref; columna de P_ESS;"<=" & P_Ref)/CONTAR(columna de E_ESS)`

Por ejemplo, para la primera celda (C37), la fórmula podría ser:

`=CONTAR.SI.CONJUNTO(ESS!I3:I403; "<=" & $B37; ESS!$J$3:$J$403;"<=" & C$36)/CONTAR(ESS!J3:J403)`

5 - EJERCICIO: Parte 2 -> Análisis de tecnologías

8. Rellenar las columnas D y E de la hoja **parte2.Summary** con los datos de coste de las tecnologías de almacenamiento de la tabla en base a los datos del documento: [Energy Storage Technology and Cost Characterization Report. U.S. DOE \(2019\)](#)
9. Una vez definido el límite de casos a satisfacer en un 85% (celda H1), completar las filas de potencia y energía (E_{nom} y P_{nom}) para tecnología de almacenamiento teniendo en cuenta las unidades (*Ud. de almacenamiento*)

*Por ejemplo, para la primera celda (H4), la fórmula podría ser: $=\$F2*H3$*

10. Completar las filas de coste (*coste*) multiplicando el coste por energía por la energía nominal y el coste por potencia por la potencia nominal

Por ejemplo, para la primera celda (H5), la fórmula podría ser: $=H3\$D\$2+H4*\$E\2*

11. Calcular el % de casos que se satisfacen con los valores de potencia nominal y energía nominal usando la función CONTAR.SI.CONJUNTO de igual manera que se hizo al calcular el histograma.

Por ejemplo, para la primera celda (H6), la fórmula podría ser:

$=\text{CONTAR.SI.CONJUNTO}(\text{ESS}!\$I\$3:\$I\$403; "<=" \& H\$4; \text{ESS}!\$J\$3:\$J\$403; "<=" \& H\$3)/\text{CONTAR}(\text{ESS}!\$J\$3:\$J\$403)$

5 - EJERCICIO: Parte 2 -> Análisis de tecnologías

12. Por último, seleccionar una tecnología e intentar justificar el porqué de la selección.

18	Pregunta 3	Seleccione una tecnología y justifique porque
19	mínimo 250 caracteres	
20		
21		
22		
23		
24		
25		
26		
27		
28		
29		
30		
31		
32		

13. EXTRA: Probar con varios valores de la ventana del MAF y evaluar como cambian los resultados ¿Cambia en algún momento la tecnología más idónea?

CONSEJO: Puede que haga falta cambiar el vector de número de unidades del almacenamiento para conseguir valores por encima del valor definido como minimo de casos satisfechos (85%)

CONSEJO: Se debe poner un valor en la celda B1 de la hoja "ESS" de los que aparecen en el rango de celdas B2:U2 de la hora "parte1.Summary"

MARCOS BLANCO AGUADO
marcos.blanco@ciemat.es

Gracias.