



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***

**Volantes de inercia: modelo y ejemplo de integración  
en aplicaciones como almacenamiento híbrido**

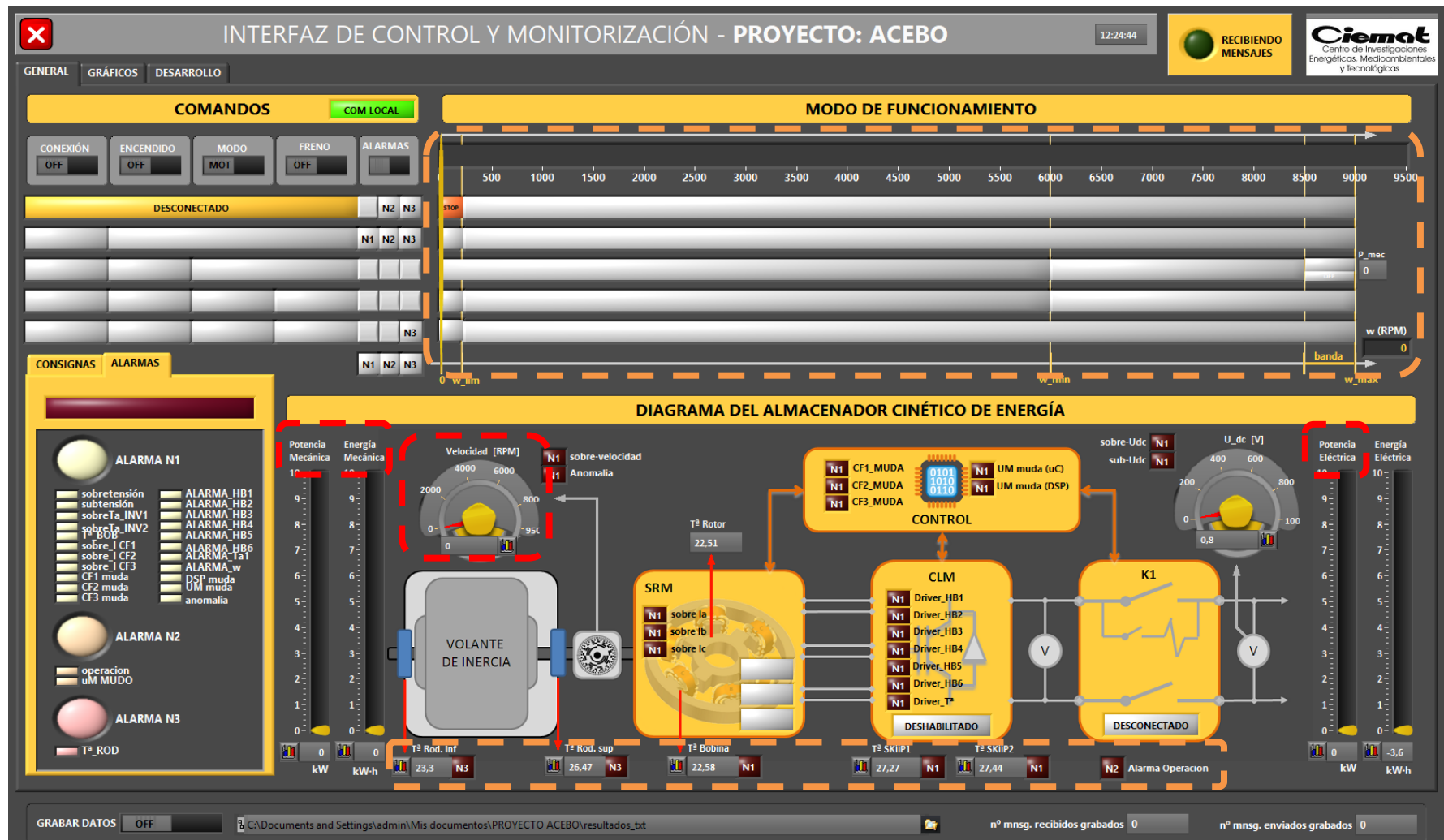
**Jorge Torres**

**01 junio de 2022**

# Contenido

1. Volantes de inercia: Parámetros principales.
2. Volantes de inercia: Formulación de energía, potencia y dinámica.
3. Volantes de Inercia: Mapa de eficiencia de ciclado
4. Volantes de Inercia: Control de un sistema con varios módulos
5. Volantes de Inercia: Esquema final
6. Plantas comerciales de almacenamiento con volantes
7. Plantas comerciales de almacenamiento híbrido con volantes
8. Ejemplo de aplicación de volantes de inercia

# 1. Volantes de inercia: Parámetros principales



## 2. Volantes de Inercia: Formulación energía, potencia y dinámica (I)

El proceso energético está regido por las ecuaciones básicas:

➤ Energía Cinética de un volante de inercia o flywheel:  $E = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega^2$

➤ Energía útil de un flywheel:  $E_{util} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot (\omega^2 - \omega_{min}^2)$

➤ Energía útil máxima:  $E_{m\acute{a}x\ util} = \frac{1}{2} \cdot J \cdot \omega_{max}^2 \cdot \left[ 1 - \left( \frac{1}{k} \right)^2 \right]$   $k = \frac{\omega_{max}}{\omega_{min}}$

➤ Estado de carga:  $SoC = \frac{\omega}{\omega_{max}} \cdot 100$

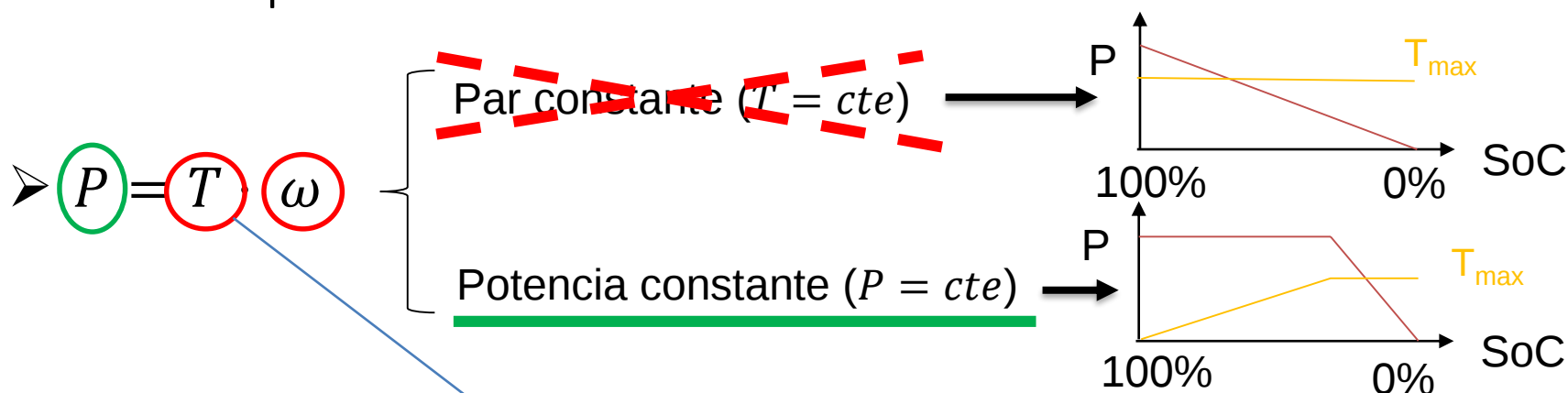
● Datos de diseño o entrada

● Parámetros del modelo

| $k$              | $SoC$        | $E_{util}$                   |
|------------------|--------------|------------------------------|
| $k = 1/2$        | [50% – 100%] | $0,75 \cdot E_{m\acute{a}x}$ |
| $k = 1/\sqrt{2}$ | [70% – 100%] | $0,5 \cdot E_{m\acute{a}x}$  |

## 2. Volantes de Inercia: Formulación energía, potencia y dinámica (II)

Formulación en potencia:

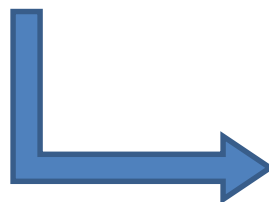


Formulación dinámica:

➤ Ecuación de momento angular:  $T - T_{autod} = J \alpha = J \frac{d\omega}{dt}$

● Datos de diseño o entrada

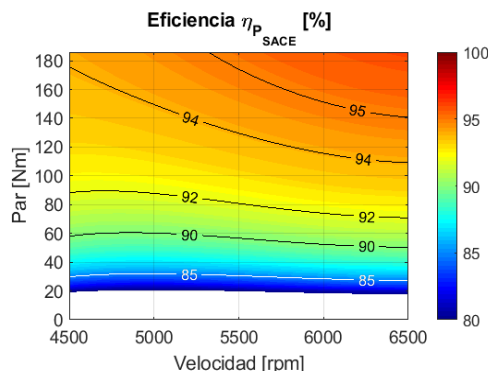
● Parámetros del modelo



$$\int_{\omega(t=0)}^{\omega} \frac{d\omega}{dt} = \int \frac{T - T_{autod}}{J}$$

### 3. Volantes de Inercia: Mapa de eficiencia de ciclado

¿Dónde se ve la eficiencia del ciclo de carga-descarga?



$$\eta_{P_{SACE}} = \frac{T \cdot \omega}{T \cdot \omega + P_{SACE}}$$

$$\int_{\omega(t=0)}^{\omega} \frac{d\omega}{dt} = \int \frac{P_{interna} - P_{autod}}{\omega \cdot J}$$

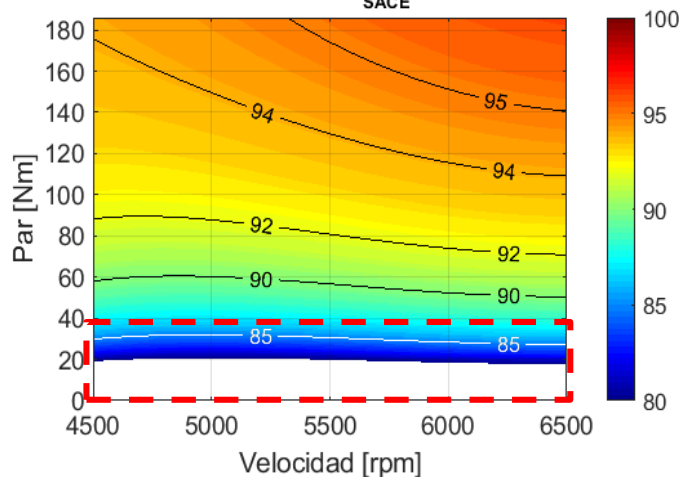
| Casos          | Potencia externa<br>( $P_{externa}$ ) | Potencia interna<br>( $P_{interna}$ )               | Comentarios                                                 |
|----------------|---------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Almacenar      | $P_{externa} > 0$                     | $P_{interna} = \eta_{P_{SACE}} \cdot P_{externa}$   | $P_{interna} < P_{externa}$<br>$E_{alm,real} < E_{externa}$ |
| Ceder potencia | $P_{externa} < 0$                     | $P_{interna} = \frac{P_{externa}}{\eta_{P_{SACE}}}$ | $P_{interna} > P_{externa}$<br>$E_{ced,real} > E_{externa}$ |
| Standby        | $P_{externa} = 0$                     | $P_{interna} = 0$                                   | $P_{autod}$                                                 |

## 4. Volantes de Inercia: Control de un sistema con varios módulos

¿Hay diferencia entre operar un volante y otra tecnología de almacenamiento?



Eficiencia  $\eta_{p\_SACE}$  [%]



- Reparto equitativo

$$P_{SAE\_total} = n_{módulos} \cdot P_{mod\_SAE}$$

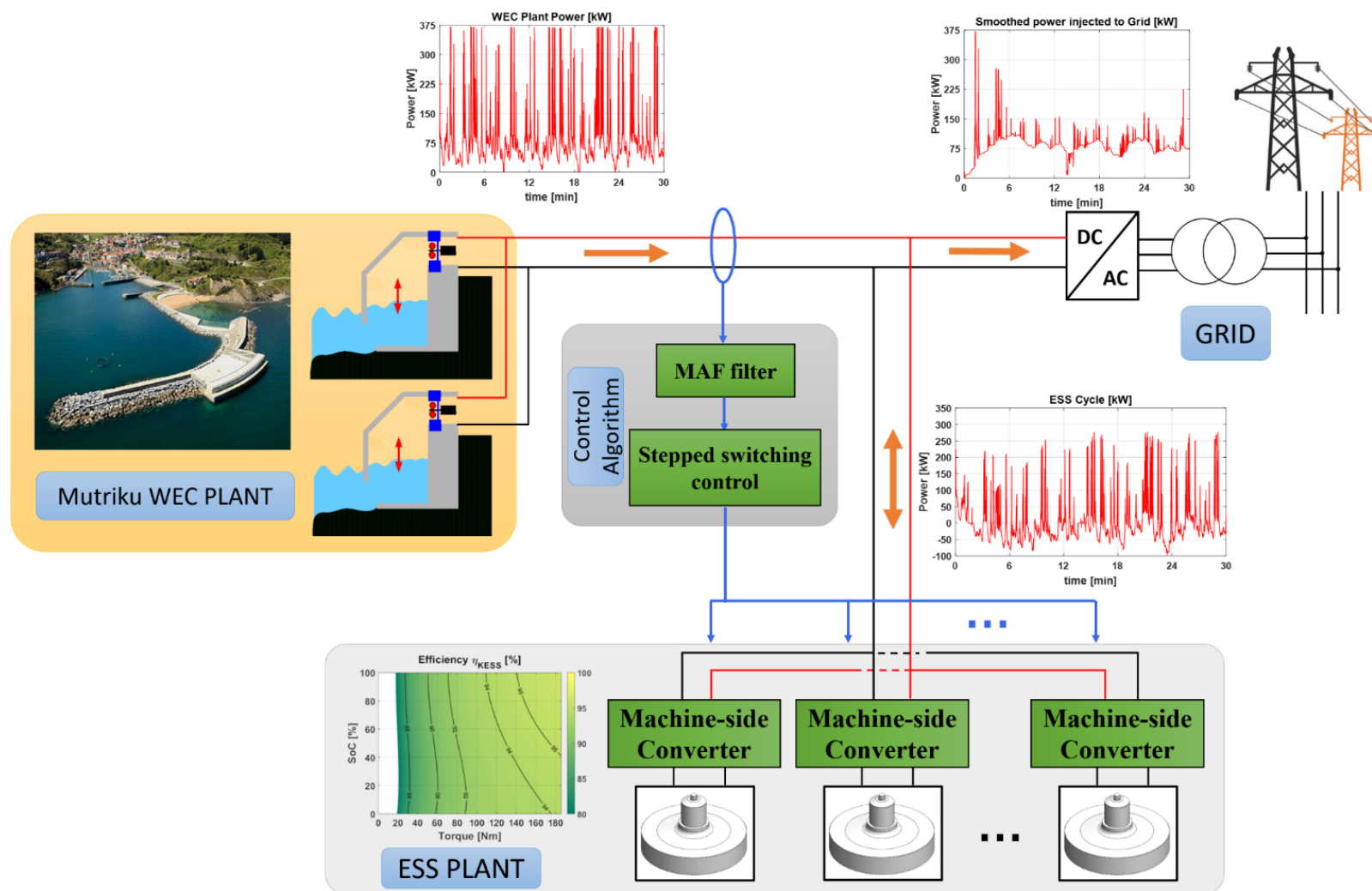
- Activación escalonada “Stepped switching”

$$P_{SAE\_total} = \sum_{i=1}^{n_{módulos}} P_{i\ mod\_SAE}$$

$$n_{módulos\ activos} = E \left[ \frac{P_{SAE\_total}}{P_{mod\_SAE}} \right] + 1$$

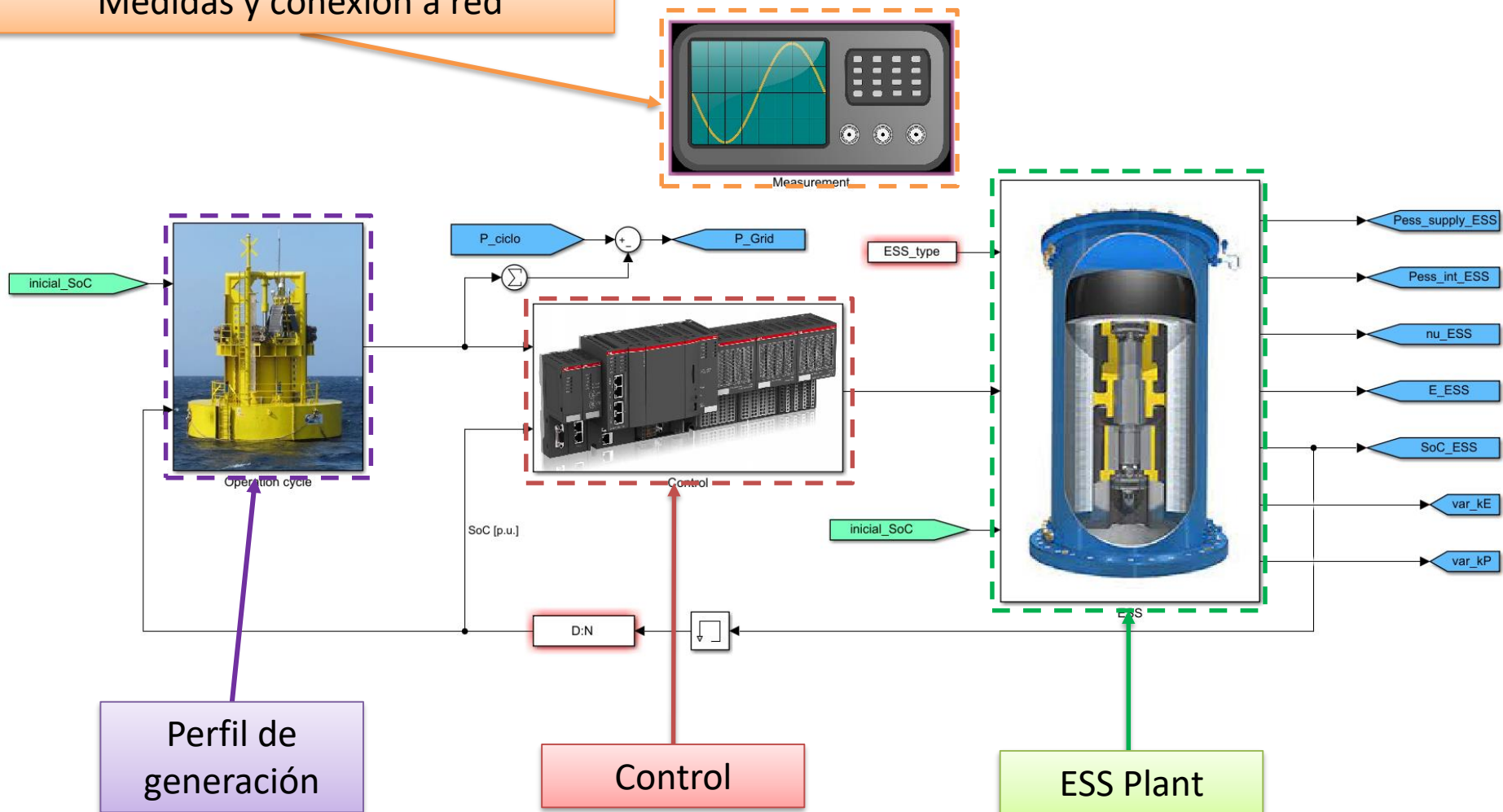
| Tecnología | Estrategia control    | Eficiencia [%] |
|------------|-----------------------|----------------|
| SCs        | Reparto equitativo    | 90.1%          |
| KESS       | Reparto equitativo    | 65.2%          |
| SCs        | Activación escalonada | 91.0%          |
| KESS       | Activación escalonada | 88.7 %         |

## 5. Volantes de Inercia: Esquema final



## 5. Volantes de Inercia: Esquema final

Medidas y conexión a red



## 6. Plantas comerciales de almacenamiento con volantes



Tamaño: 20 MW | 5 MWh

Localización: Stephentown, New York

Aplicación: mejorar la estabilización de la frecuencia durante el control primario.



Tamaño: 20 MW | 5 MWh

Localización: Hazle Township, Pennsylvania

Aplicación: mejorar la estabilización de la frecuencia durante el control primario.



Tamaño: 2 MW | 0,5 MWh

Localización: Minto, Ontario (Canadá)

Aplicación: mejorar la estabilización de la frecuencia durante el control primario.

## 7. Plantas comerciales de almacenamiento híbrido con volantes (I)



### Flywheel-battery hybrid system installed in Ireland

By [John Parnell](#)

April 1, 2016

[Commercial](#) [Technology](#)

[LinkedIn](#)

[Twitter](#)

[Reddit](#)

[Facebook](#)

[Email](#)

The pilot plant in County Offaly was built for Schwungrad Energie. Source: Freqcon.  
A flywheel-battery hybrid storage system has been installed in Ireland, a system that the companies involved claim is the first of its kind.  
The system includes two 160kW by US manufacturer Beacon and a Hitachi 160kW/576kWh deep-cycle lead-acid battery. The power conversion system was provided by German company Freqcon.

Sistema híbrido combina baterías de plomo-ácido de 160kW/576 kWh del fabricante Hitachi con 2 volantes de inercia que aportan 320kW de la compañía Beacon Power. Esta planta piloto situada en County Offaly (Ireland) tiene como objetivo mejorar la estabilización de la frecuencia durante el control primario.

## 7. Plantas comerciales de almacenamiento híbrido con volantes (II)



NRStor Completes Acquisition of 5MW  
Energy Storage Facility in Clear Creek,  
Ontario

Facility will be developed into Canada's first hybrid battery  
and flywheel storage project



TORONTO, Canada – May 30, 2019 – NRStor Inc. (NRStor), a developer of energy storage projects, today announced it has completed the acquisition of a 5MW connected energy storage facility, located in Clear Creek, Ontario.

Sistema híbrido combina baterías de litio con 10 volantes de inercia que aportan 5MW de la compañía Temporal Power. Esta planta piloto situada en Clear Creek, Ontario (Canada) tiene como objetivo mejorar la estabilización de la frecuencia durante el control primario.

## 7. Plantas comerciales de almacenamiento híbrido con volantes (III)



2 sept 2020

### Flywheel-lithium battery hybrid energy storage system joining Dutch grid services markets



The hybrid system in Almelo, Netherlands. S4 Energy's flywheels in foreground with Leclanché containerised battery storage systems behind. Image: Leclanché.

**Los volantes de inercia son una buena combinación para sistemas híbridos de almacenamiento.**

El sistema híbrido combina baterías de litio de 8.8MW/7.12 MWh con 6 volantes de inercia que aportan 3MW. En total, tienen una capacidad de potencia de 9MW para la estabilización de la frecuencia durante el control primario.

Localización: Almelo (The Netherlands)

## 7. Plantas comerciales de almacenamiento híbrido con volantes (IV)

### Add HyStor Project - Flywheel battery hybrid energy storage system

Add HyStor will develop and demonstrate an innovative adaptive flywheel battery hybrid energy storage system for dynamic grid stabilisation.



The innovative adaptive flywheel is modular and offers unparalleled configurability in terms of power to energy ratio which makes it the first dynamic energy storage system whose discharge duration can be matched exactly to the applications requirements.

Se efectúan dos plantas piloto:

- Irlanda: El sistema híbrido combina un volante de 250kW/10kWh con baterías de litio de 160kW para la estabilización de la frecuencia.
- Willenhall, UK: El sistema híbrido combina dos volantes de 250kW con baterías de litio de Toshiba de 1MWh para la estabilización de la frecuencia durante el control primario.



The  
University  
Of  
Sheffield.



**ADAPTIVE**  
Balancing Power

## 7. Plantas comerciales de almacenamiento híbrido con volantes (V)

*Ejemplo de combinación de baterías con volantes de inercia y ultracondensadores*



### Proyecto OSMOSE. Lanzarote-Fuerteventura. 2018-2020

Baterías: 3 MW – 0.75 MWh

Volantes de inercia: 1.6 MW – 0.005 MWh

Ultracondensadores: 10MW – 0.015 MWh



## 6. Ejemplo de aplicación de volantes de inercia

### EJERCICIO

Se quiere diseñar un sistema de almacenamiento híbrido para una aplicación con las siguientes características: 370V de tensión de red, una energía de **50kWh** y una potencia de **2MW**. Se dispone en catálogo de Supercondensadores, baterías y volantes.

#### Baterías



Energía celda: 80.95 Wh  
Potencia celda: 242.85 W

#### Supercondensadores



Energía celda: 3Wh  
Potencia celda: 5 kW

#### Volantes de Inercia



Energía volante: 830 Wh  
Potencia volante: 250kW

## 6. Ejemplo de aplicación de volantes de inercia

$$\begin{aligned}
 P_{total} &= N_{bat} \cdot P_{cell_{bat}} + N_{FW} \cdot P_{unit_{FW}} \\
 E_{total} &= N_{bat} \cdot E_{cell_{bat}} + N_{FW} \cdot E_{unit_{FW}}
 \end{aligned}
 \rightarrow
 \begin{cases}
 N_{FW} = \frac{E_{total} - \frac{P_{total}}{P_{cell_{bat}}} \cdot E_{cell_{bat}}}{E_{unit_{FW}} - \frac{P_{unit_{FW}}}{P_{cell_{bat}}} \cdot E_{cell_{bat}}} \\
 N_{bat} = \frac{P_{total}}{P_{cell_{bat}}} - \frac{P_{unit_{FW}}}{P_{cell_{bat}}} \cdot N_{FW}
 \end{cases}$$

| Casos            | Volantes   | Baterías     | SCs          |
|------------------|------------|--------------|--------------|
| <i>Vol + Bat</i> | 7.45 (8)   | 541.03 (541) | —            |
| <i>SCs + Bat</i> | —          | 603.92 (604) | 370.66 (371) |
| <i>Vol + SCs</i> | 71.76 (72) | —            | 26.27 (27)   |

\* Esto se puede completar con una ecuación de costes y de envejecimiento de los dispositivos con el número de ciclos. Esto se define según los términos de exceso de potencia y/o energía.

$$P_{total} = N'_{bat} \cdot P_{cell_{bat}} + N'_{SC} \cdot P_{cell_{SC}} + \Delta P$$

$$E_{total} = N'_{bat} \cdot E_{cell_{bat}} + N'_{SC} \cdot E_{cell_{SC}} + \Delta E$$

# Gracias por su atención

Jorge Torres Miranda

[jorge.torres@externos.ciemat.es](mailto:jorge.torres@externos.ciemat.es)