



# IX Asamblea General de REOLTEC

## Sistemas de Almacenamiento Energético Aplicaciones de Potencia para Eólica

Santiago Arnaltes  
Manuel García Plaza

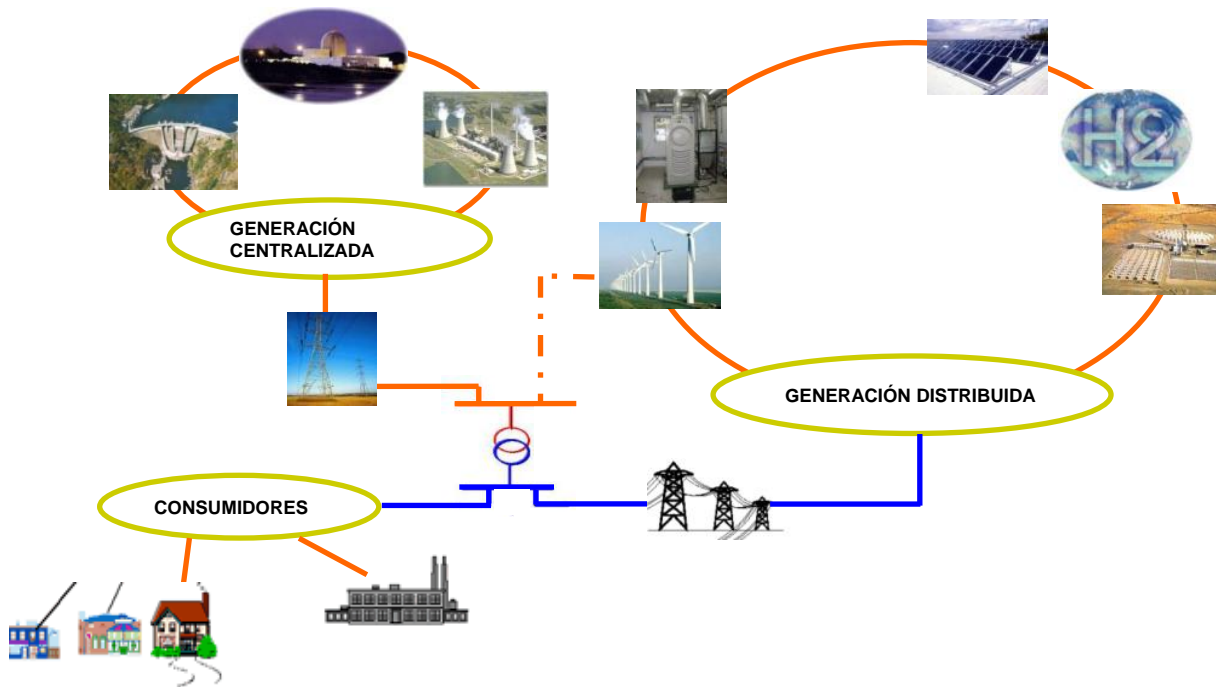
## Sistemas de almacenamiento energético

- Utility scale
- Battery applications
- Renewable integration

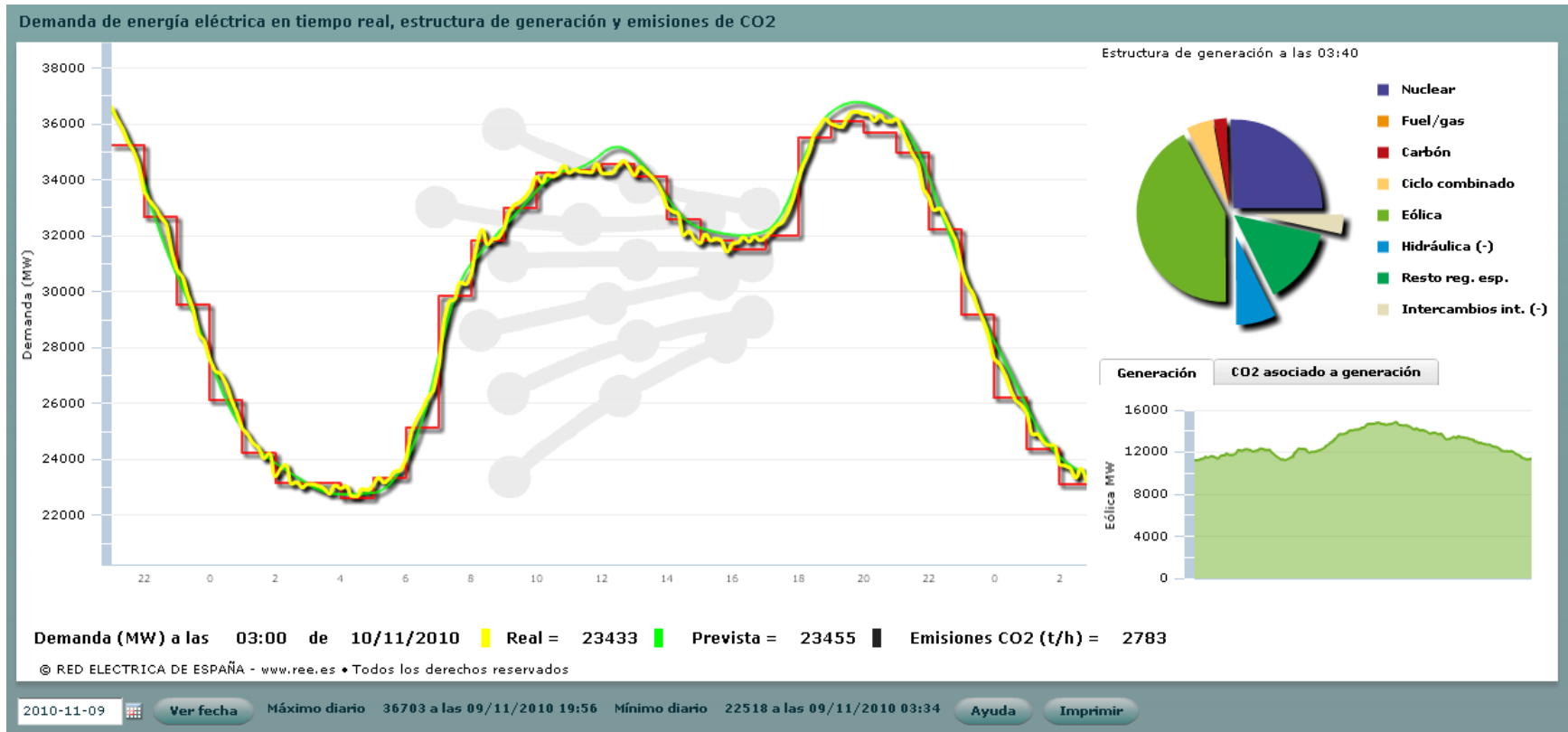


# Operación del sistema eléctrico

Teorema de Boucherot:  $\sum P=0$   $\sum Q=0$



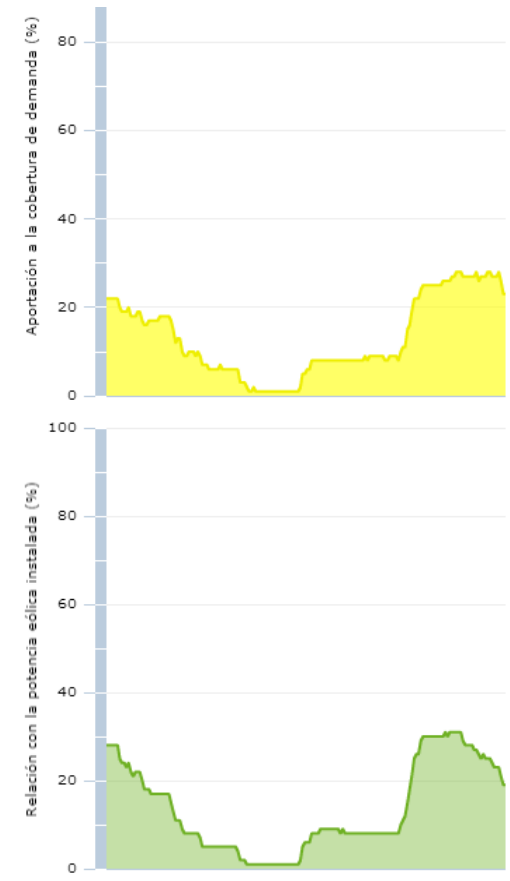
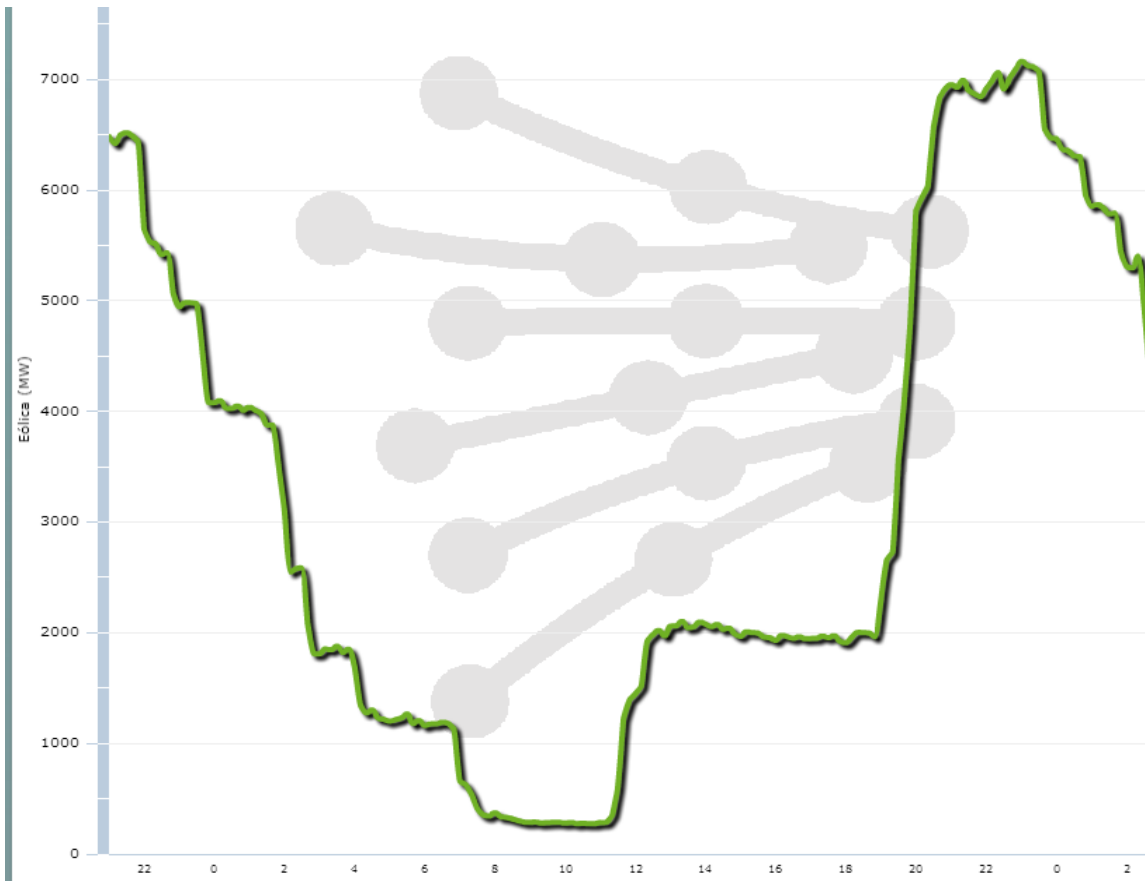
# Operación del sistema eléctrico



## Almacenamiento energético para redes eléctricas

Recorte generación eólica. 30-3-2013 festividad de la pascua.

Generación eólica en tiempo real, aportación a la cobertura de demanda y relación con la potencia eólica instalada.

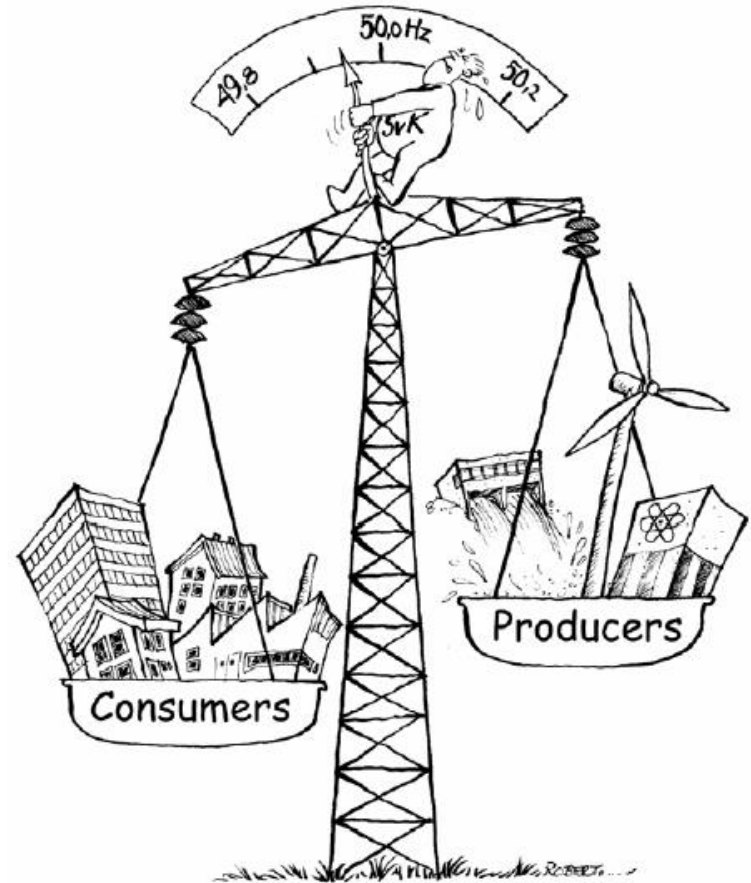


Valor estimado de generación eólica a las 03:00 del 30/03/2013 : 4418(MW).

Supone un 19 % de la potencia total eólica instalada y una aportación del 24 % a la cobertura de la demanda.

# Operación del sistema eléctrico

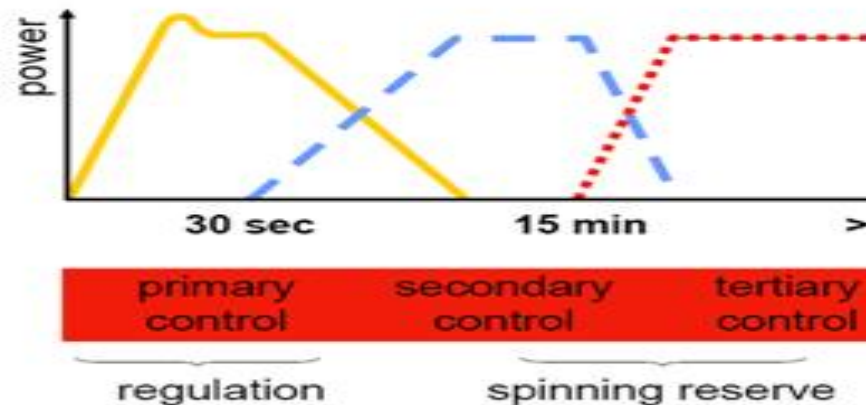
$\Sigma P \neq 0$  desvío de frecuencia



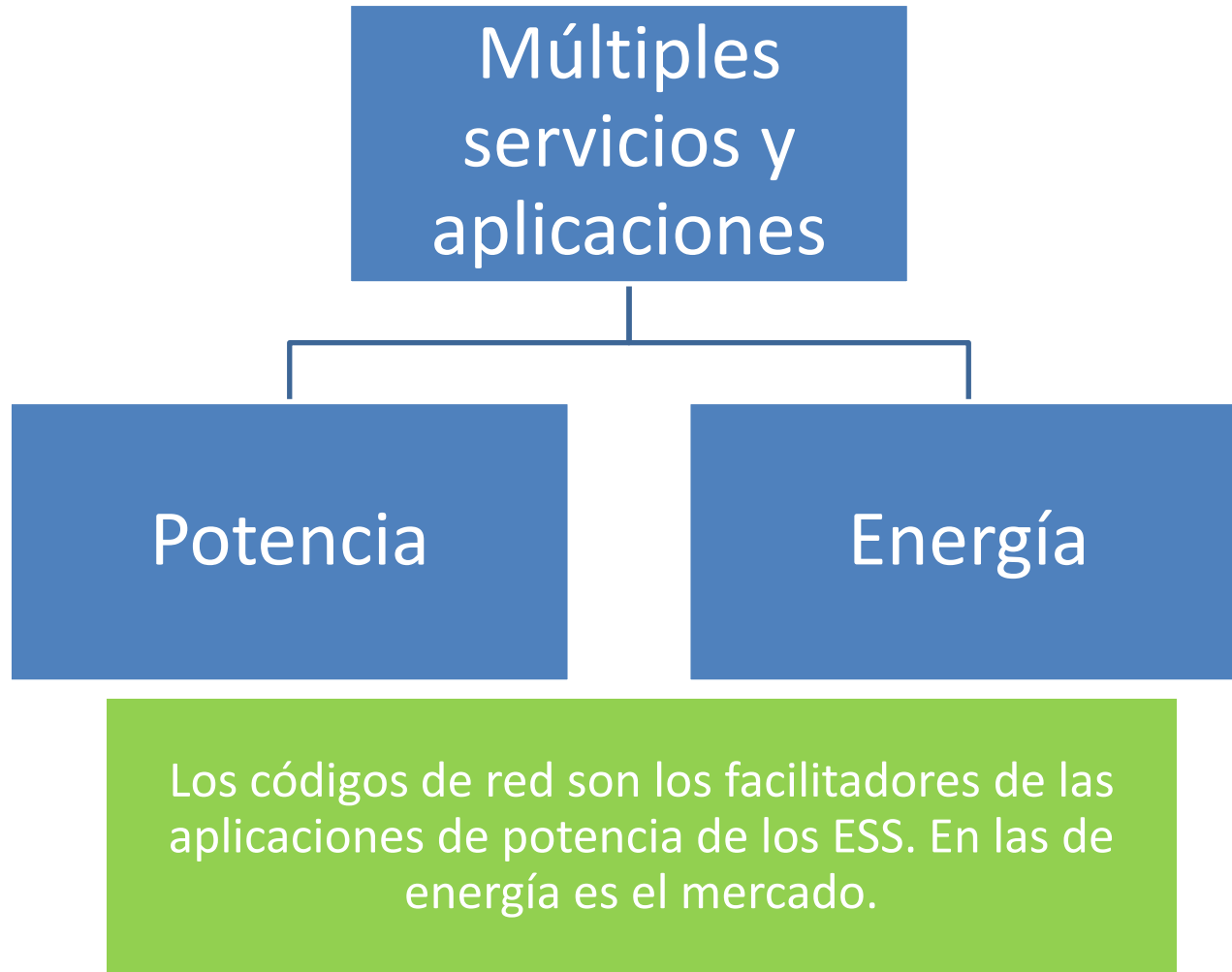
# Operación del sistema eléctrico

Servicios complementarios de control potencia-frecuencia:

- P.O. 7.1: Regulación primaria
- P.O. 7.2: Regulación secundaria
- P.O. 7.3: Regulación terciaria



## Oportunidades de aplicación de los sistemas de acumulación en redes eléctricas





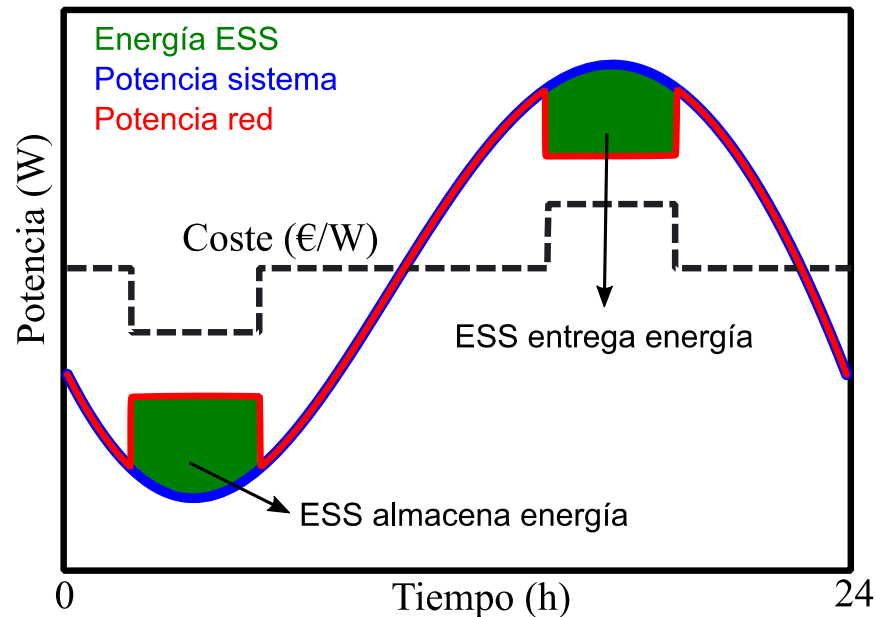
### Generación

- 1. Arbitraje.
- 2. Nivelación de carga.
- 3. Laminado de picos.
- 4. Suavizado de pendientes.
- 5. Regulación potencia-frecuencia.
- 6. Emulación de inercia.
- 7. Control de tensión.
- 8. Arranque autógeno.
- 9. Seguimiento de carga.
- 10. Calidad de potencia
- 11. Seguridad de suministro

# Descripción de las oportunidades de aplicación de los sistemas de acumulación en redes eléctricas

## 1. Arbitraje

Implica almacenar energía en periodos de baja demanda (bajo precio eléctrico) y venderla en periodos de alta demanda (precios mayores).

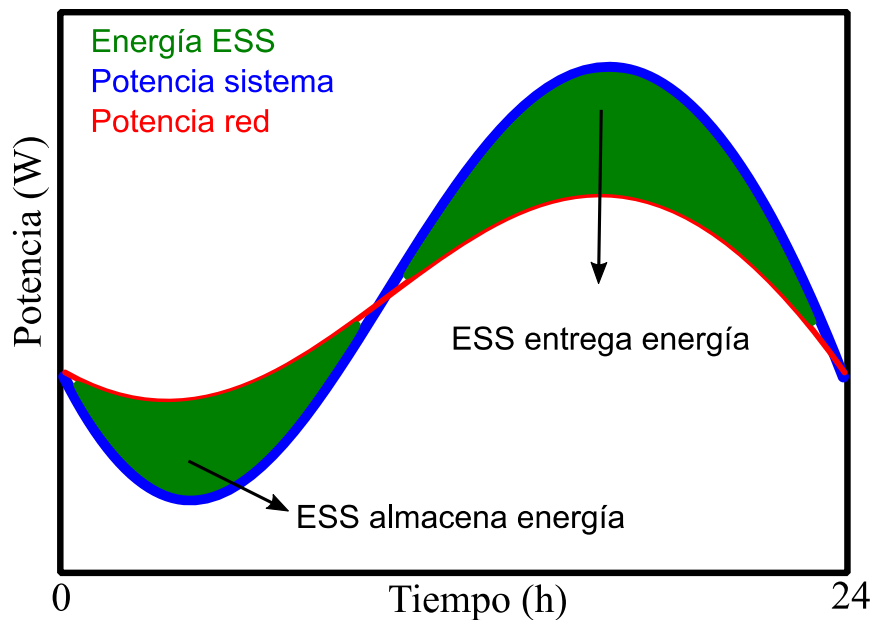


Ejemplo esquemático del servicios de arbitraje

# Descripción de las oportunidades de aplicación de los sistemas de acumulación en redes eléctricas

## 2. Load Leveling – Load shifting

Implica almacenar energía en periodos de elevada generación y verterla a la red en periodos de baja generación.

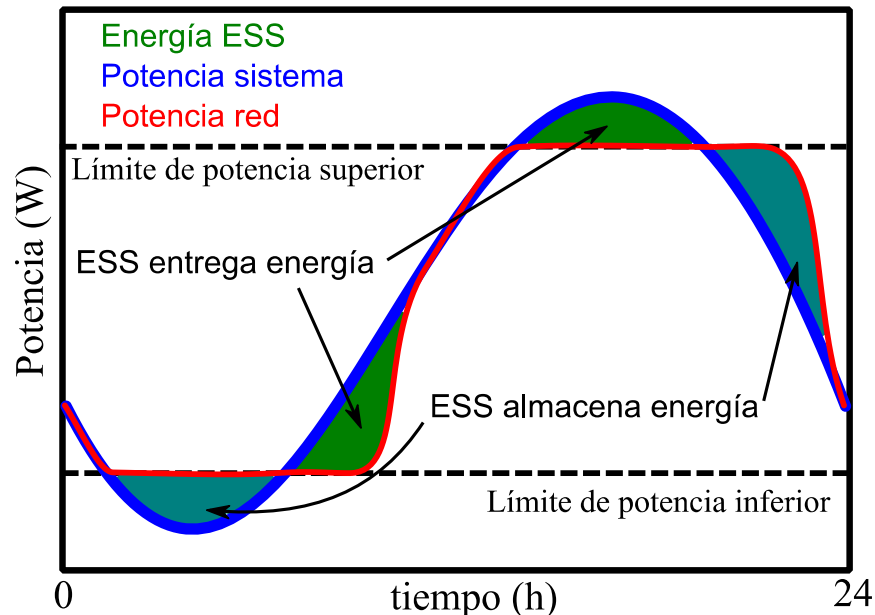


Ejemplo esquemático del servicio de nivelación de carga

# Descripción de las oportunidades de aplicación de los sistemas de acumulación en redes eléctricas

## 3. Laminado de picos de potencia.

**Peak-shaving.** Se evitan inconvenientes de exceder los límites de potencia de intercambio con la red si durante el pico de potencia, el excedente es cubierto por un ESS. Los límites pueden ser consecuencia de los requerimientos técnicos o por conveniencia económica. Los picos de potencia pueden ser de generación o de consumo, aunque estos últimos son los más estudiados.

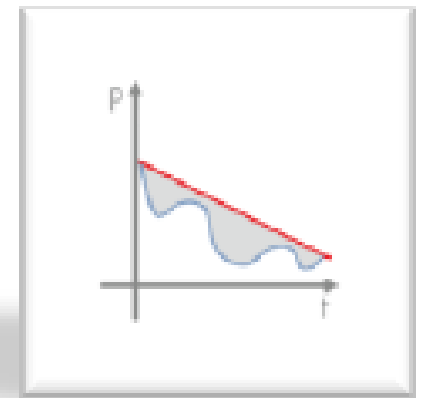
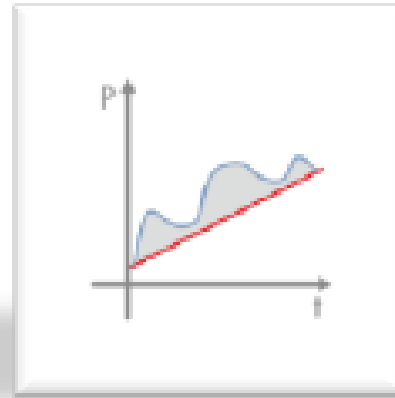
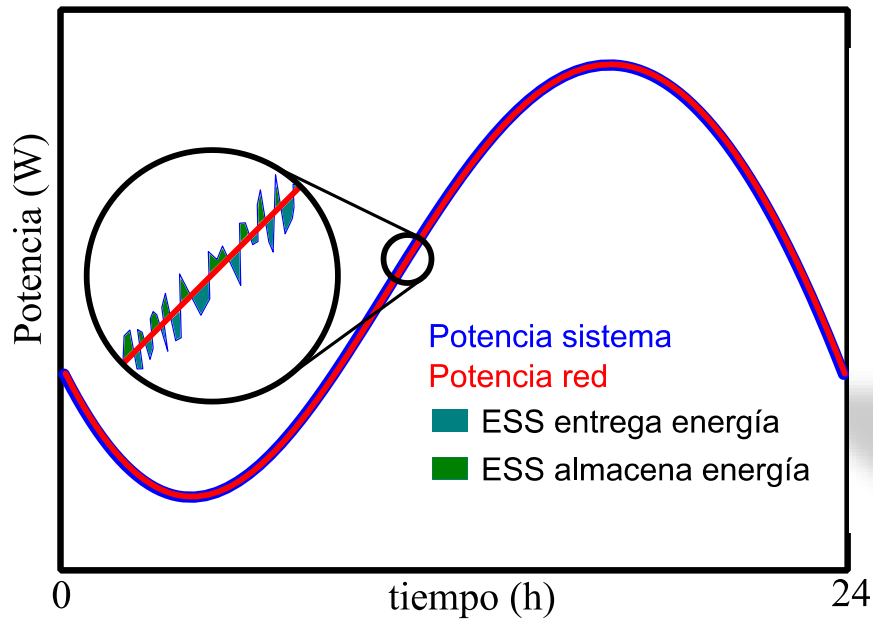


Concepto básico de reducción de picos.

# Descripción de las oportunidades de aplicación de los sistemas de acumulación en redes eléctricas

## 4. Suavizado de pendientes.

**Smoothing/ramp-rate control.** Se usa para eliminar o amortiguar las fluctuaciones momentáneas de la potencia. El resultado final tras el suavizado es un perfil de potencia con menos perturbaciones, donde las pendientes de potencia se han alisado. Esta aplicación es uno de los servicios complementarios donde el uso de ESS resulta más destacable. Se trata de una medida preventiva de regulación del desequilibrio de potencia.



Ejemplo esquemático del servicio de suavizado de pendientes.

# Descripción de las oportunidades de aplicación de los sistemas de acumulación en redes eléctricas

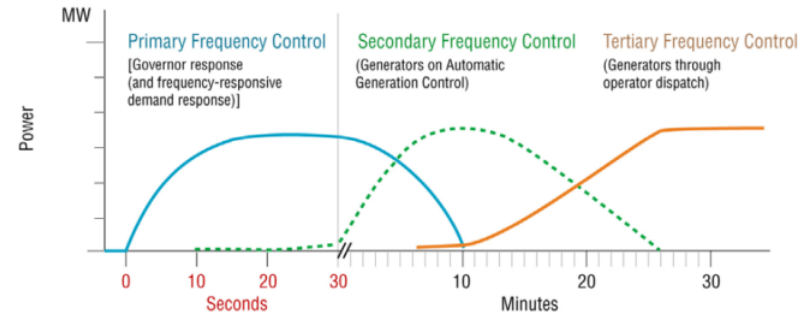
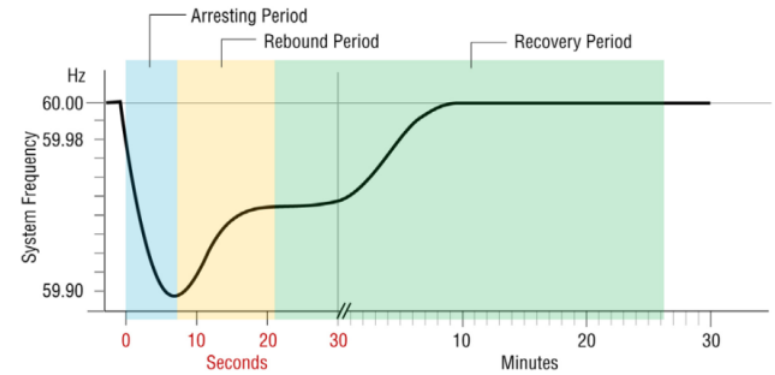
## 5. Regulación potencia-frecuencia

**Spinning/back-up.** Ante un desequilibrio entre la generación y demanda cada área de la red debe disponer de las suficientes reservas de energía. Tres tipos genéricos diferenciados fundamentalmente por el tiempo de respuesta.

**Reservas primarias, rápidas o reserva rodante:** capacidad de generación en línea y sincronizada. Medida correctiva de regulación de desbalance de potencia.

**Reservas secundarias, complementarias o no-rodantes:** reserva de capacidad no sincronizada.

**Reservas terciarias o respaldo:** actúan de sistema de respaldo a los sistemas de reservas rápidas y complementarias.



The Sequential Actions of Primary, Secondary, and Tertiary Frequency Controls Following the Sudden Loss of Generation and Their Impacts on System Frequency [BERKELEY LAB 2010]

# Descripción de las oportunidades de aplicación de los sistemas de acumulación en redes eléctricas

## 6. Emulación de inercia.

La emulación de inercia consiste en reproducir la respuesta inercial de un generador síncrono acoplado a la red, es decir, ante un desequilibrio de potencias entregar una potencia proporcional a la derivada de frecuencia.

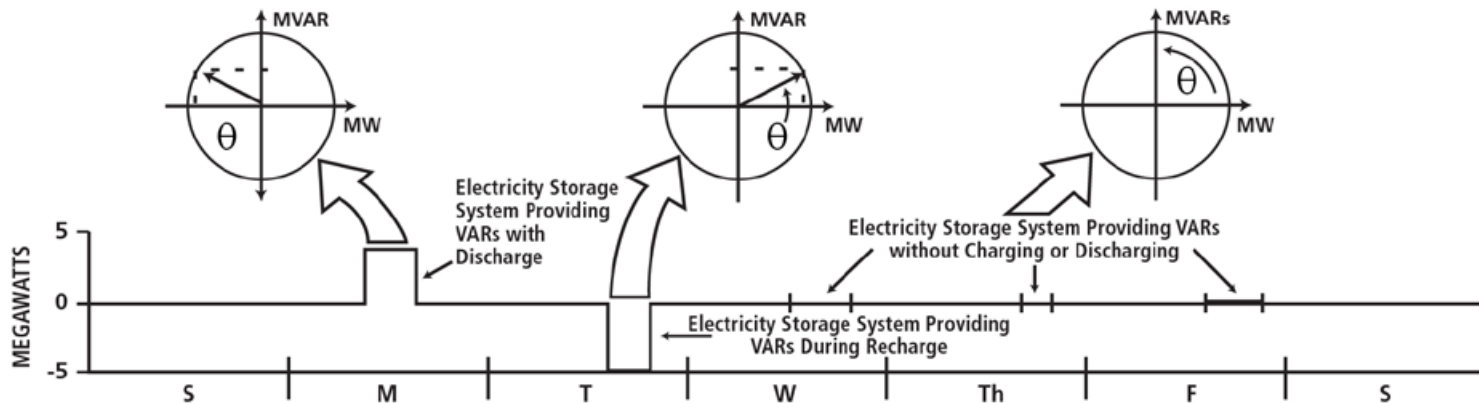
$$P_t - P_l = 2 \cdot H \frac{df}{dt} \text{ (p.u.)}$$

$$H = \frac{\frac{1}{2} J \Omega_n^2}{P_n} \text{ (s)}$$

# Descripción de las oportunidades de aplicación de los sistemas de acumulación en redes eléctricas

## 7. Control de tensión.

**Voltage support.** Se puede dar soporte al control de la tensión mediante la generación o el consumo de potencia reactiva por parte del convertidor asociado al sistema de almacenamiento. Se puede llevar a cabo en conjunto a la gestión de potencia activa.



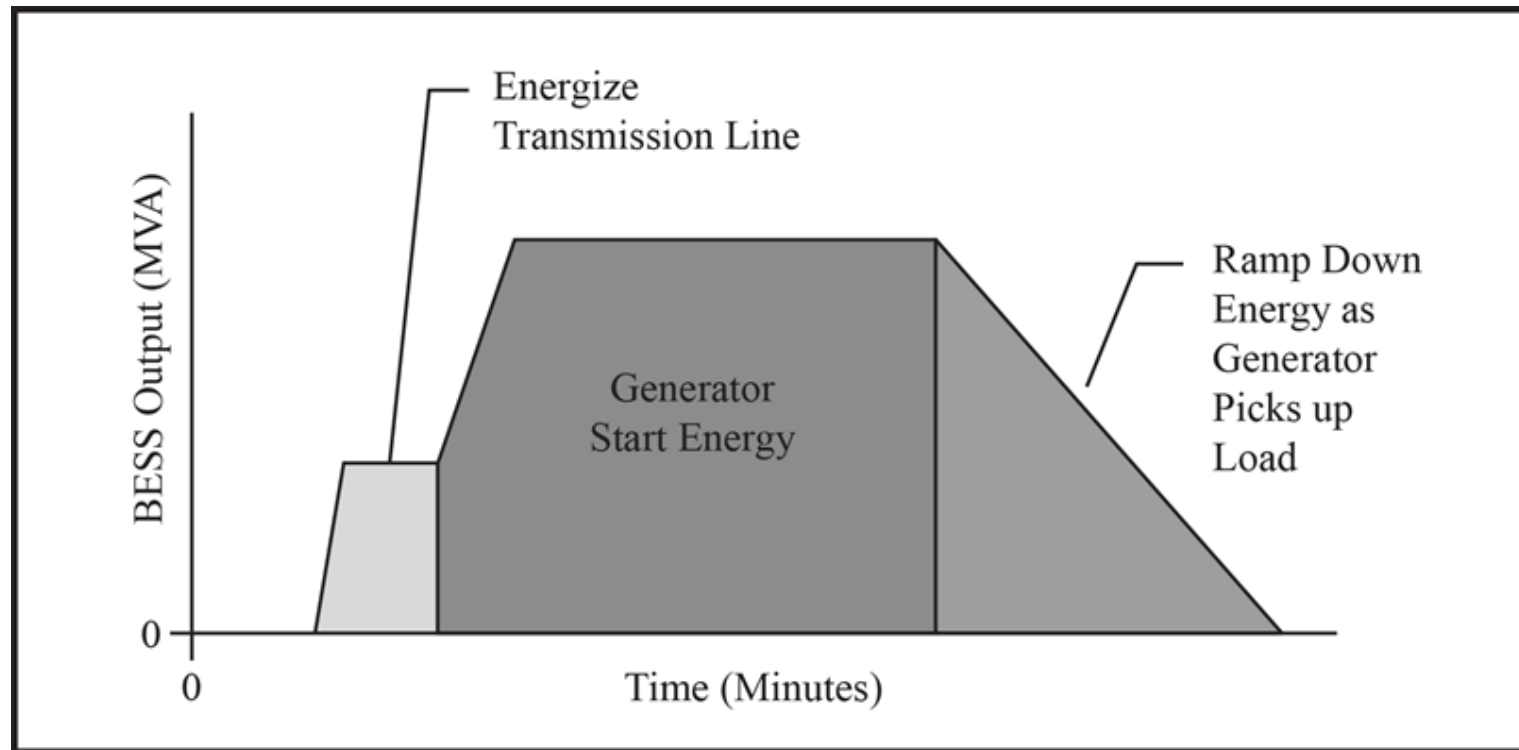
Storage for Voltage Support Service.



## Descripción de las oportunidades de aplicación de los sistemas de acumulación en redes eléctricas

### 8. Arranque autógeno.

**Black start.** El almacenamiento energético permite el proceso de restauración de la fuente de generación sin dependencia de otra fuente o red eléctrica.

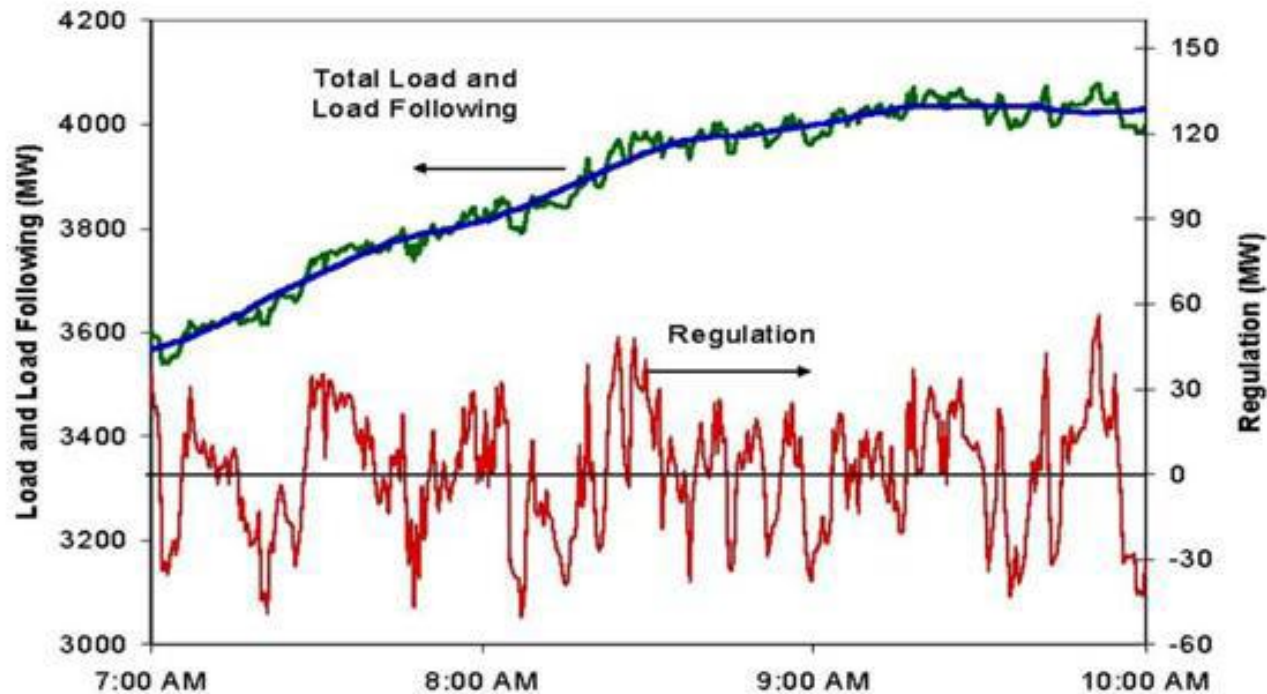


Black Start Service by Storage [EPRI 2013].

## Descripción de las oportunidades de aplicación de los sistemas de acumulación en redes eléctricas

### 9. Seguimiento de carga.

**Load-following.** La regulación y el seguimiento de carga mantienen el balance entre generación y consumo. La regulación en tiempos de respuesta de segundos a minutos, el seguimiento de carga de minutos a horas haciendo un balance hora a hora a lo largo del día. El balance de potencia es una de las cuestiones más críticas en las redes aisladas. Servicio muy adecuado para amortiguar la variabilidad de sistemas eólicos y fotovoltaicos.

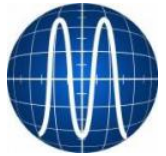


[EPRI 2003].

# Descripción de las oportunidades de aplicación de los sistemas de acumulación en redes eléctricas

## 10. Calidad de potencia.

**Power quality.** Compensa perturbaciones de corta duración que afectan a la calidad de potencia. Algunas de las manifestaciones de mala calidad pueden ser: variaciones en la magnitud de la tensión y frecuencia, factor de potencia bajo, armónicos e interrupción del servicio (desde fracciones de segundo hasta varios segundos).



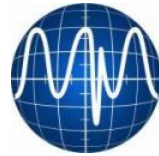
Power Surge



Over-voltage



Power Failure



Switching Transient



Power Sag



Line Noise



Frecuency Variation



Under-voltage



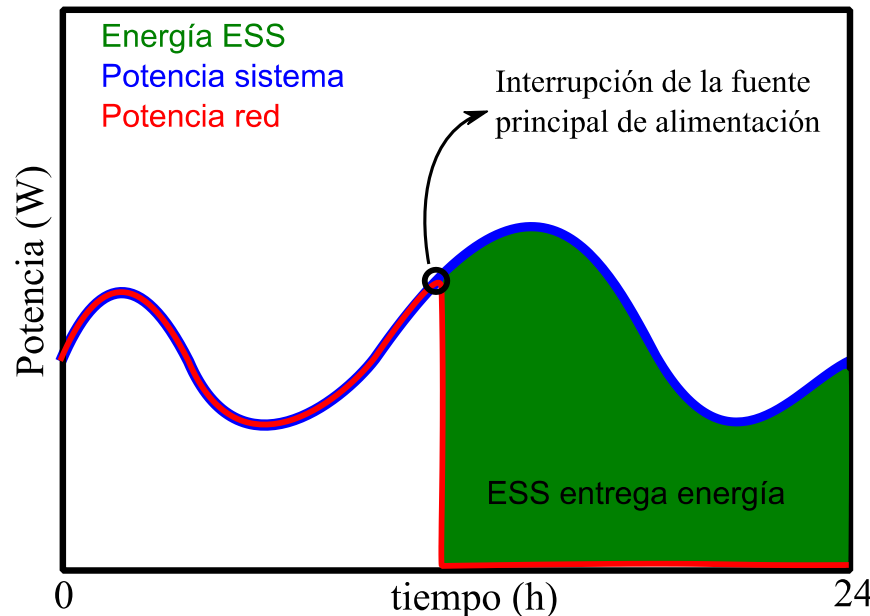
Harmonic Distortion

Power line problems [Eaton Power].

# Descripción de las oportunidades de aplicación de los sistemas de acumulación en redes eléctricas

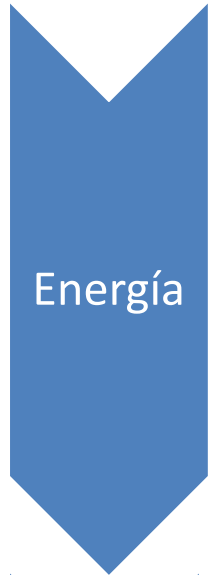
## 11. Seguridad de suministro.

**Supply reliability.** El sistema de almacenamiento debe ser capaz de asegurar el abastecimiento del cliente incluso si es necesario trabajar en isla hasta la re-sincronización con la fuente principal de generación. El acumulador debe trabajar como un sistema de alimentación interrumpida (**UPS, uninterruptible power supply**).



Ejemplo esquemático del servicio de seguridad de abastecimiento.

## Aplicaciones de energía y de potencia



- Arbitraje.
- Nivelación de carga.
- Regulación secundaria de potencia-frecuencia
- Seguridad de abastecimiento.
- Laminado de picos.
- Arranque autógeno.



- Suavizado de pendientes.
- Regulación primaria de potencia-frecuencia.
- Seguimiento de carga.
- Calidad de potencia.
- Emulación de inercia.

De minutos  
a horas

Tiempo de respaldo  
requerido

De  
milisegundos  
a minutos

# Perspectiva de utilidad de los sistemas de almacenamiento en redes eléctricas

## Aplicaciones maduras

- Sistemas de alimentación interrumpida.
- Seguimiento de carga en sistemas aislados con generación renovable no gestionable (fotovoltaica y eólica).



## Aplicaciones en desarrollo

- Suavizado de pendientes (smoothing).
- Emulación de inercia.
- Regulación potencia-frecuencia.
- Desplazamiento de carga (load-leveling).
- Laminado de picos (peak-shaving).



## Normativa

- P.O.3.7: Recuperación de la energía no integrable en el sistema.
- Borrador P.O. 12.2: Requisitos de regulación potencia frecuencia.



## Impulso de las aplicaciones en desarrollo

- Aumento del coste en los picos de demanda.
- La inversión para aumentar la seguridad de la red.
- La integración de fuentes de energías renovables.
- Normativa

Procedimientos de  
Operación de Red  
Eléctrica de España

# Suavizado de generación eólica con sistemas de acumulación

## Caso de estudio



RED



Parque eólico



ESS

El viento como causa de variaciones de la potencia generada.

# Reducción de picos de potencia con sistemas de acumulación

## Caso de estudio: Reducción de picos de potencia

### Redox Flow Batteries for the Stable Supply of Renewable Energy

Toshikazu SHIBATA\*, Takahiro KUMAMOTO, Yoshiyuki NAGAOKA, Kazunori KAWASE and Keiji YANO

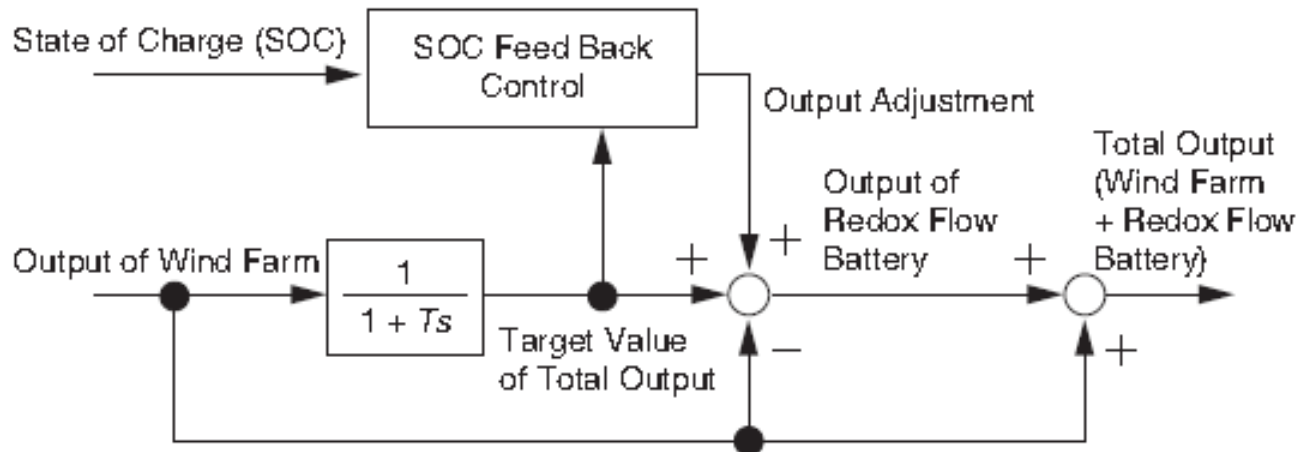


Fig. 8. Flowchart for stabilizing the fluctuations in output of a wind farm using a redox flow battery system



# Reducción de picos de potencia con sistemas de acumulación

## Caso de estudio: Reducción de picos de potencia

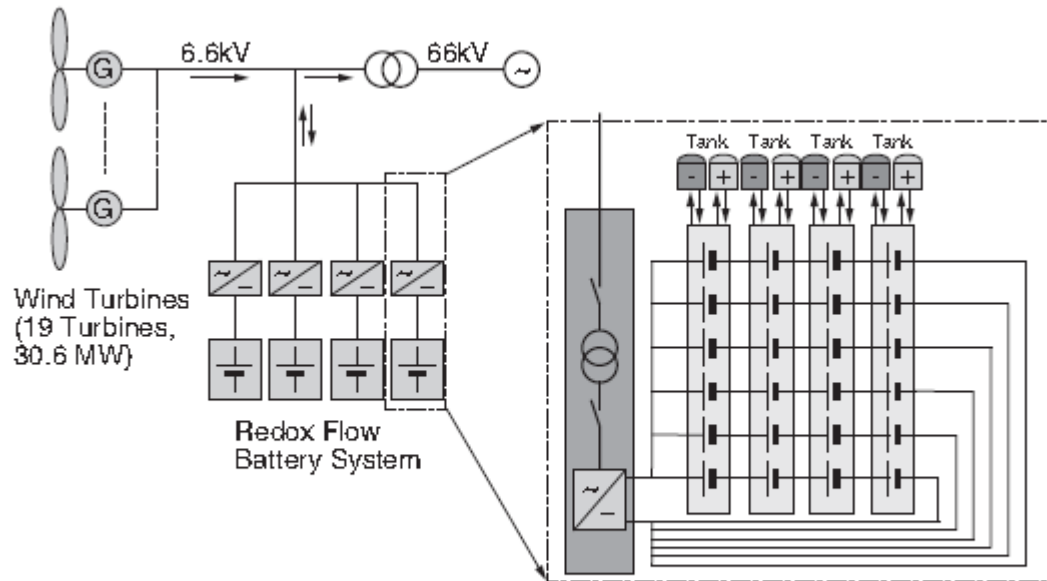


Fig. 11. The circuit configuration of a 6 MWh redox flow battery system

Maximum AC Output	Power Conditioner : 1,500kVA × 4 Banks Battery(Cell-stacks) : 1,000kW × 4 Banks
Discharge Capacity	6,000kWh

Tomamae Winvilla demonstration project: “Development of Technologies for Stabilization of Wind Power in Power Systems”

## Reducción de picos de potencia con sistemas de acumulación

### Caso de estudio: Reducción de picos de potencia

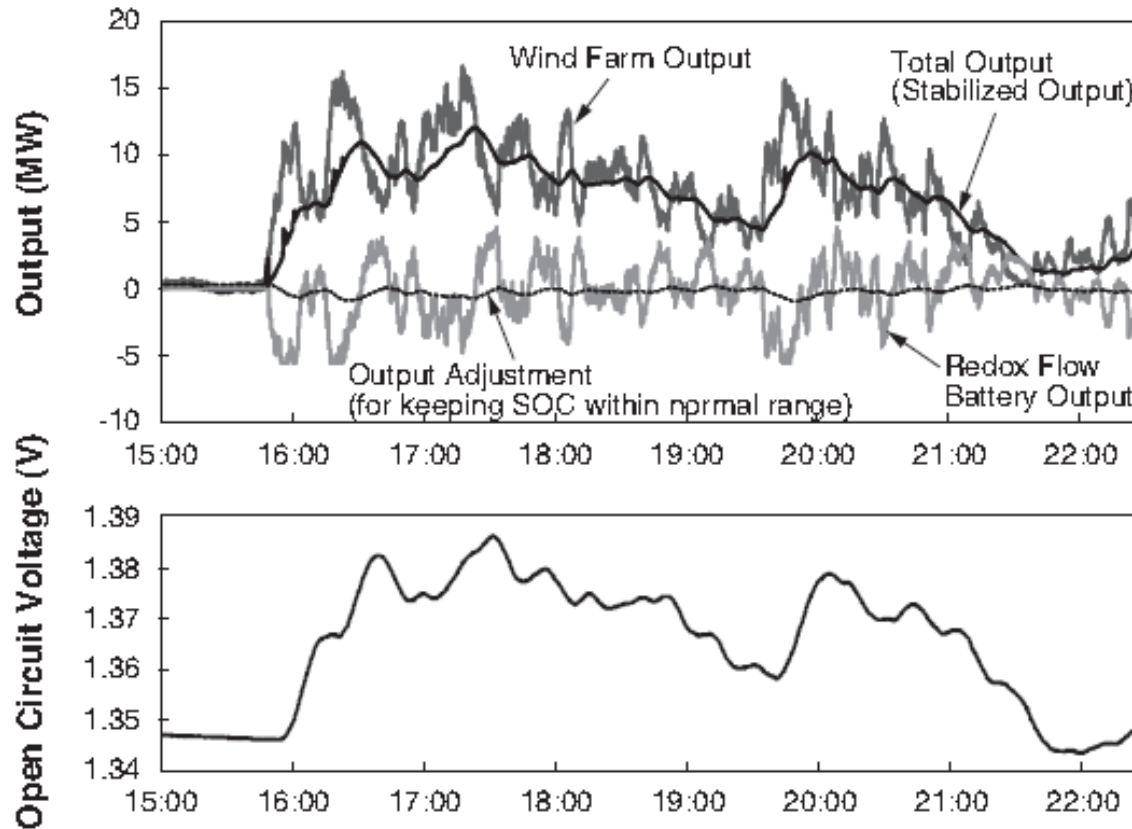
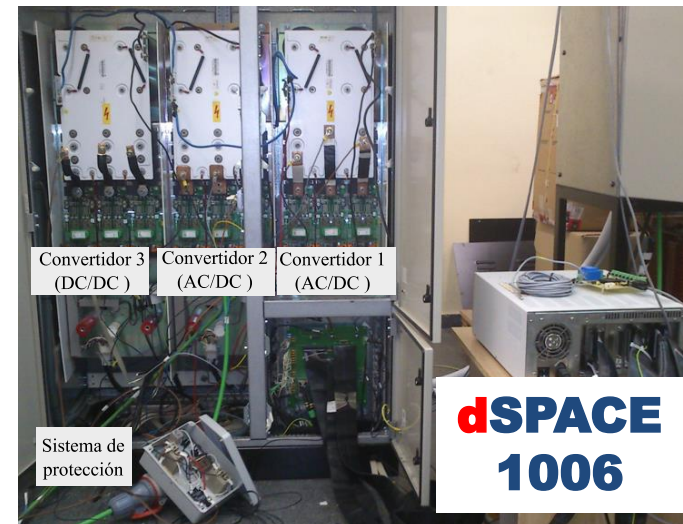
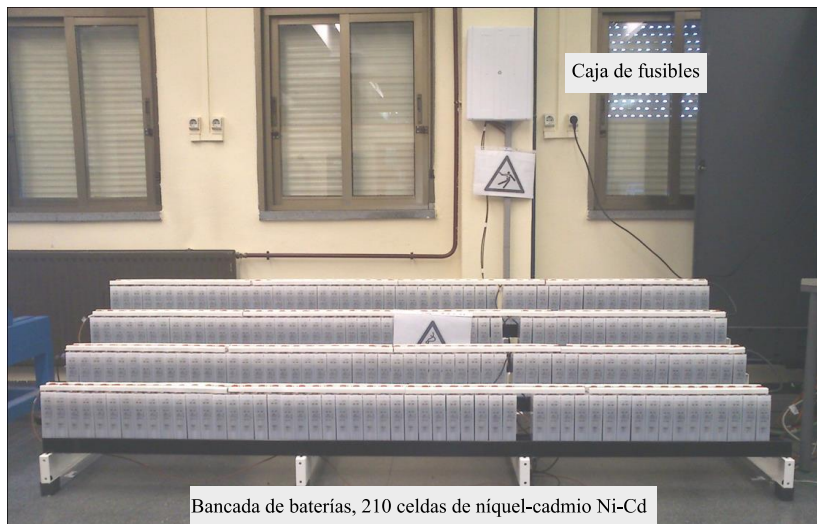
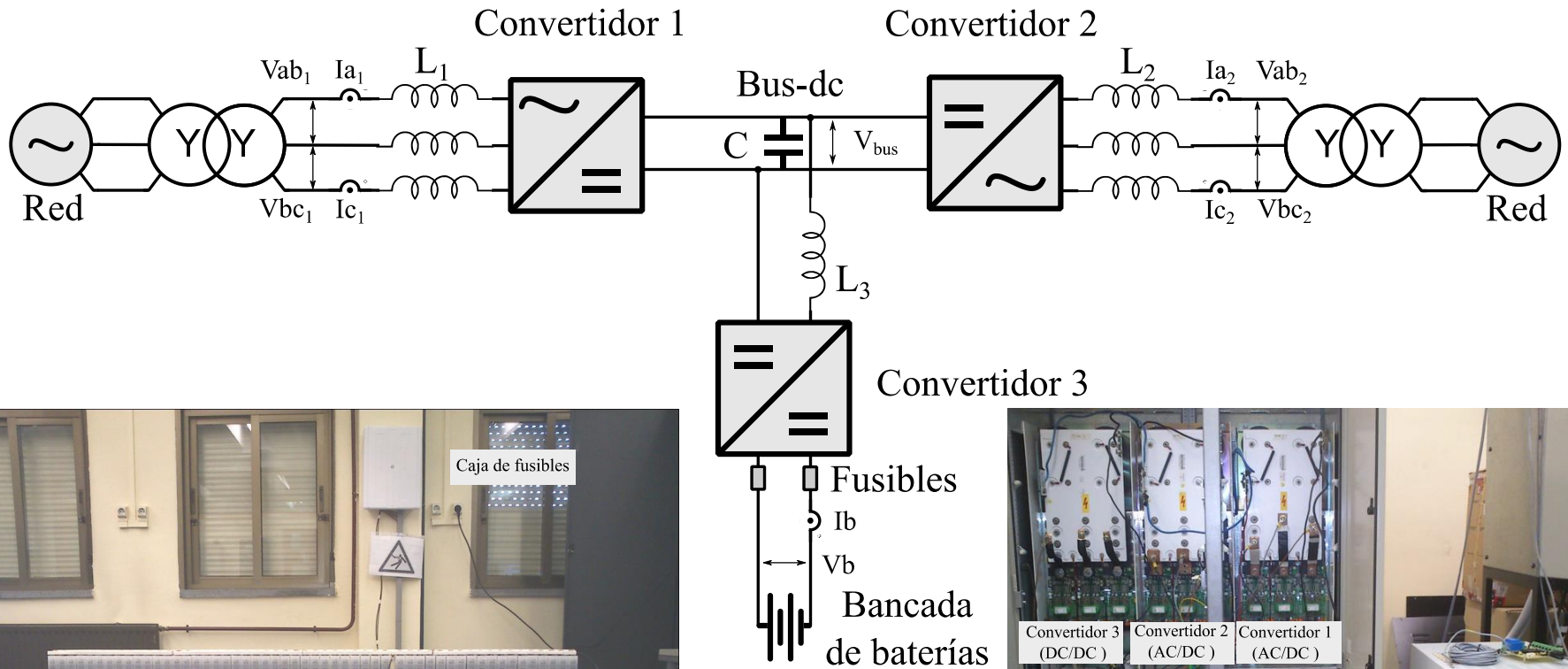


Fig. 9. Output waveform stabilized by a redox flow battery system

# Suavizado de generación con sistemas de acumulación

Caso de estudio: Montaje eléctrico utilizado en laboratorio del Grupo de Control de Potencia de la UC3M.



# Suavizado de generación fotovoltaica con sistemas de acumulación

## Tipos de algoritmo de suavizado

La compensación de la potencia del generador eólico ( $P_v$ ) se realiza mediante la potencia de la batería ( $P_b$ ) para obtener la potencia deseada, que será inyectada a la red de conexión ( $P_g$ ).

$$P_g = P_v + P_b$$

### Principales estrategias de suavizado

- **Control de media móvil (moving average control)**
- Control de rampas (ramp-rate control).

La media móvil necesita una batería con menor capacidad pero tiene más pérdidas y mayor envejecimiento que el sistema basado en el control de rampas.

## Suavizado de generación con sistemas de acumulación

### Control de media móvil (moving average control).

El algoritmo utilizado es el descrito por Hund.

$$P_b = \bar{P} + P_{SOC} - P_V$$

$$P_g = \bar{P} + P_{SOC}$$

$$\bar{P} = \text{media móvil}(P_V)$$

$$P_{SOC} = (SOC_{ref} - SOC) \cdot K$$

#### Parámetros

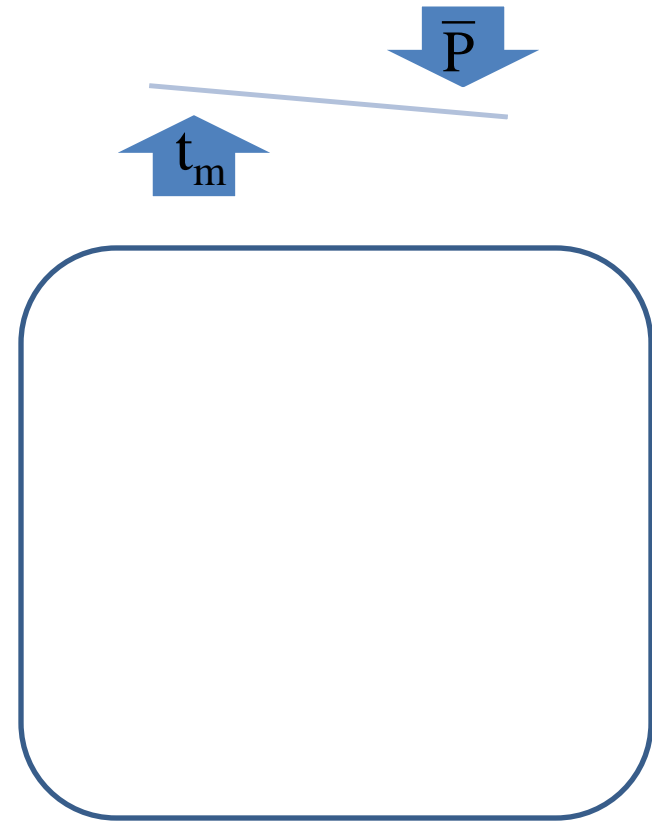
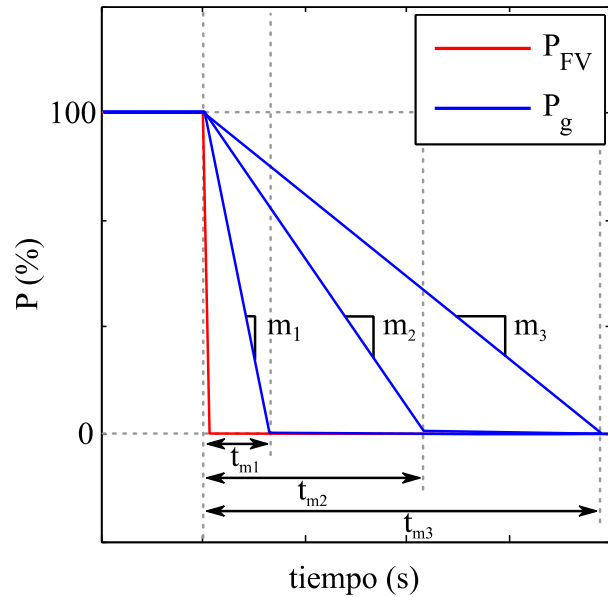
- Tiempo de promediado: 10 minutos.
- Tiempo de muestreo: 1 segundo.
- SOCref=50%.
- K=0.48.

[Hund, T.D. and Gonzalez, S. and Barrett, K., "Grid-Tied PV system energy smoothing" (2010), 002762--002766.]

# Suavizado de generación con sistemas de acumulación

## Caso de estudio: Suavizado de pendientes.

### Ensayos de evaluación



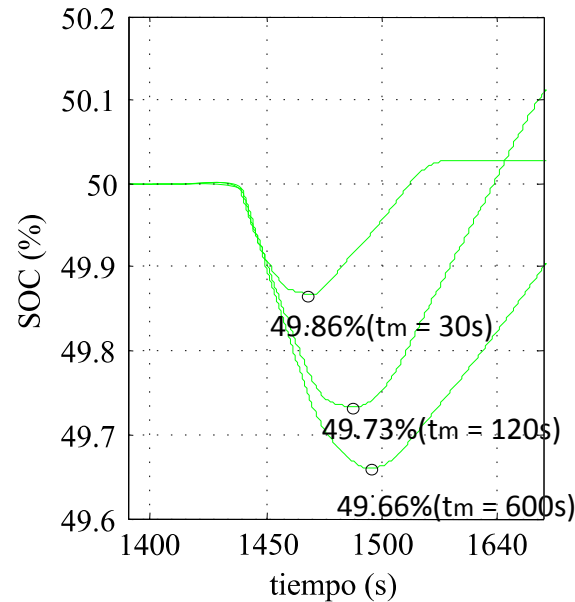
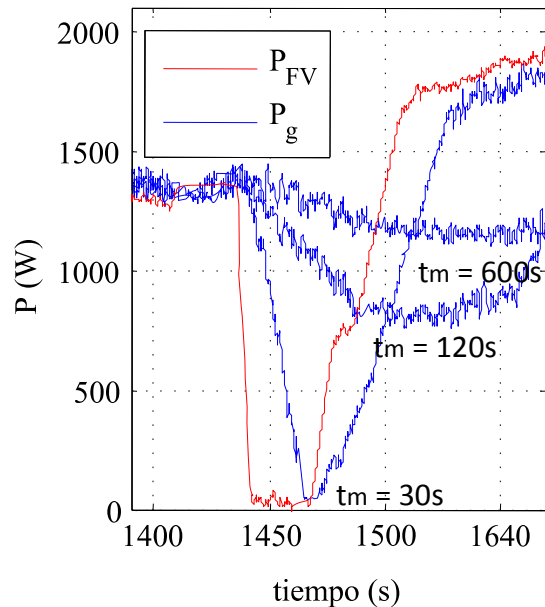
«Pendiente de potencia dependiente del tiempo de promediado»

# Suavizado de generación con sistemas de acumulación

## Caso de estudio: Suavizado de pendientes.

### Ensayos de evaluación

$\%P=35\%$ ,  $10s$ ,  $m=3,5\%/s$



$t_m=30s$



$m=1,16\%/s$



$\Delta SOC$   
0,14%

$t_m=120s$



$m=0,29\%/s$



$\Delta SOC$   
0,27%

$t_m=600s$



$m=0,05\%/s$

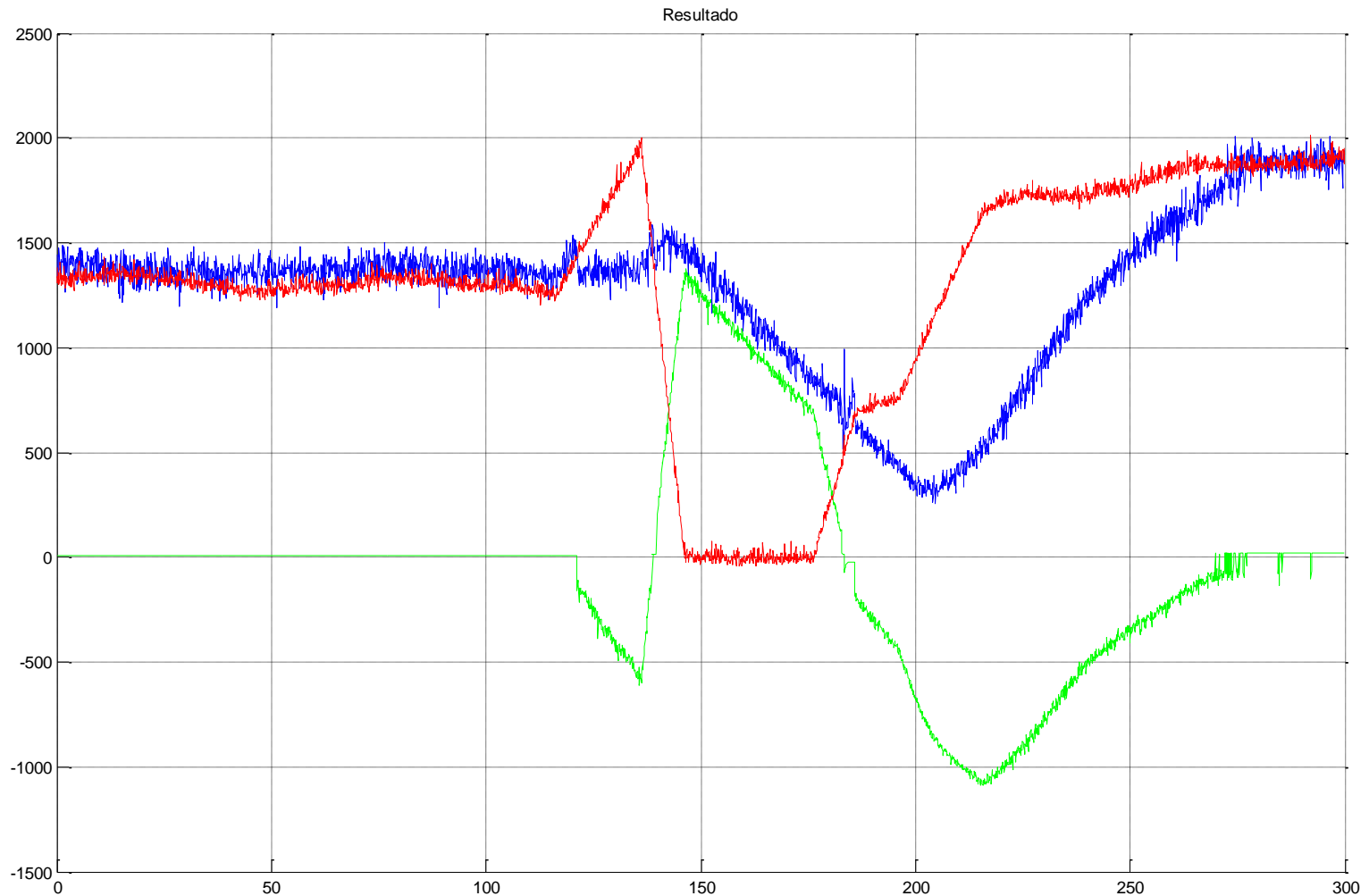


$\Delta SOC$   
0,34%

«Ensayo de suavizado de pendiente de generación para diferentes tiempos de media»

# Suavizado de generación con sistemas de acumulación

Caso de estudio: Cinco minutos de ensayo.

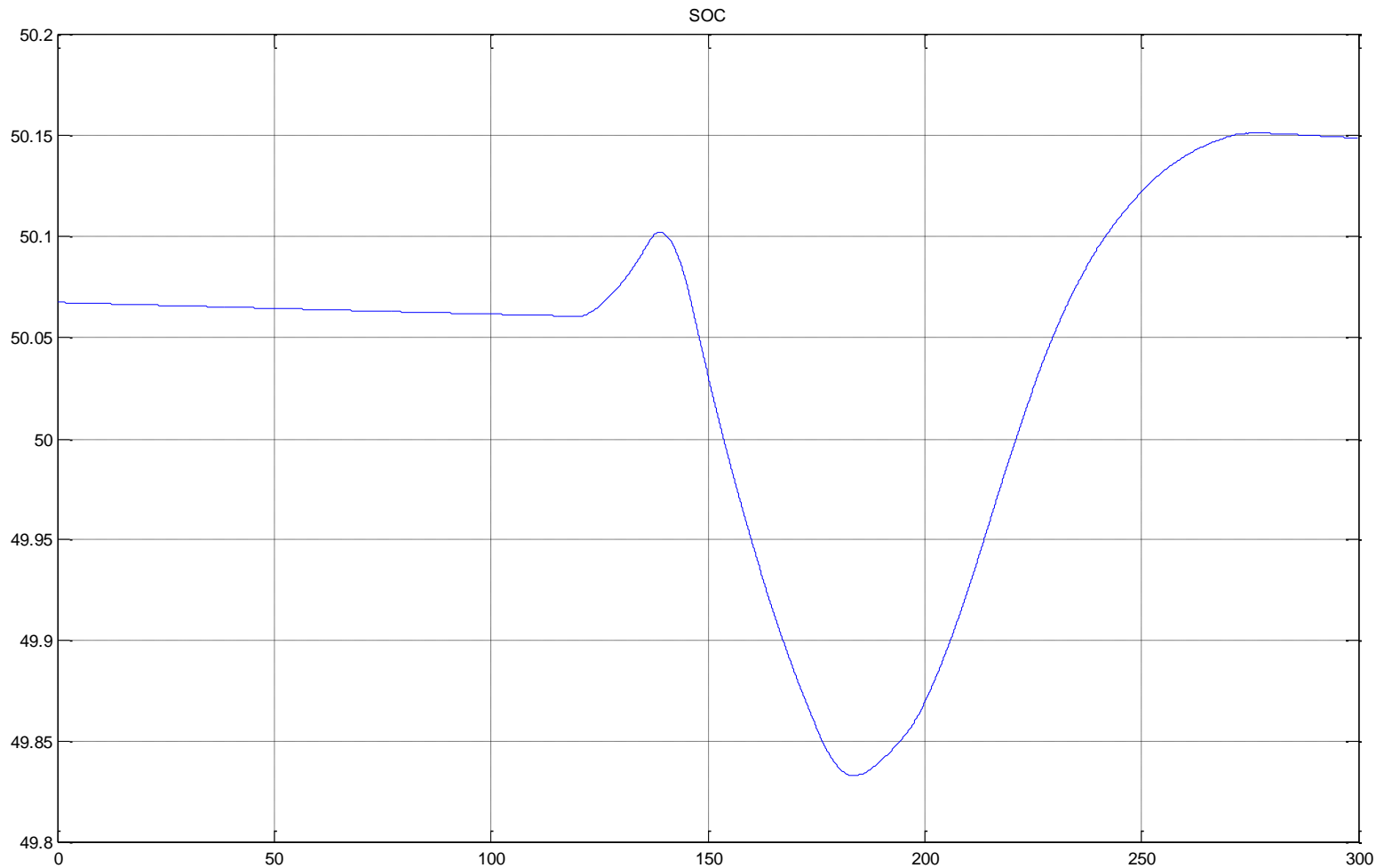


Pv  
Pg  
Pb



# Suavizado de generación con sistemas de acumulación

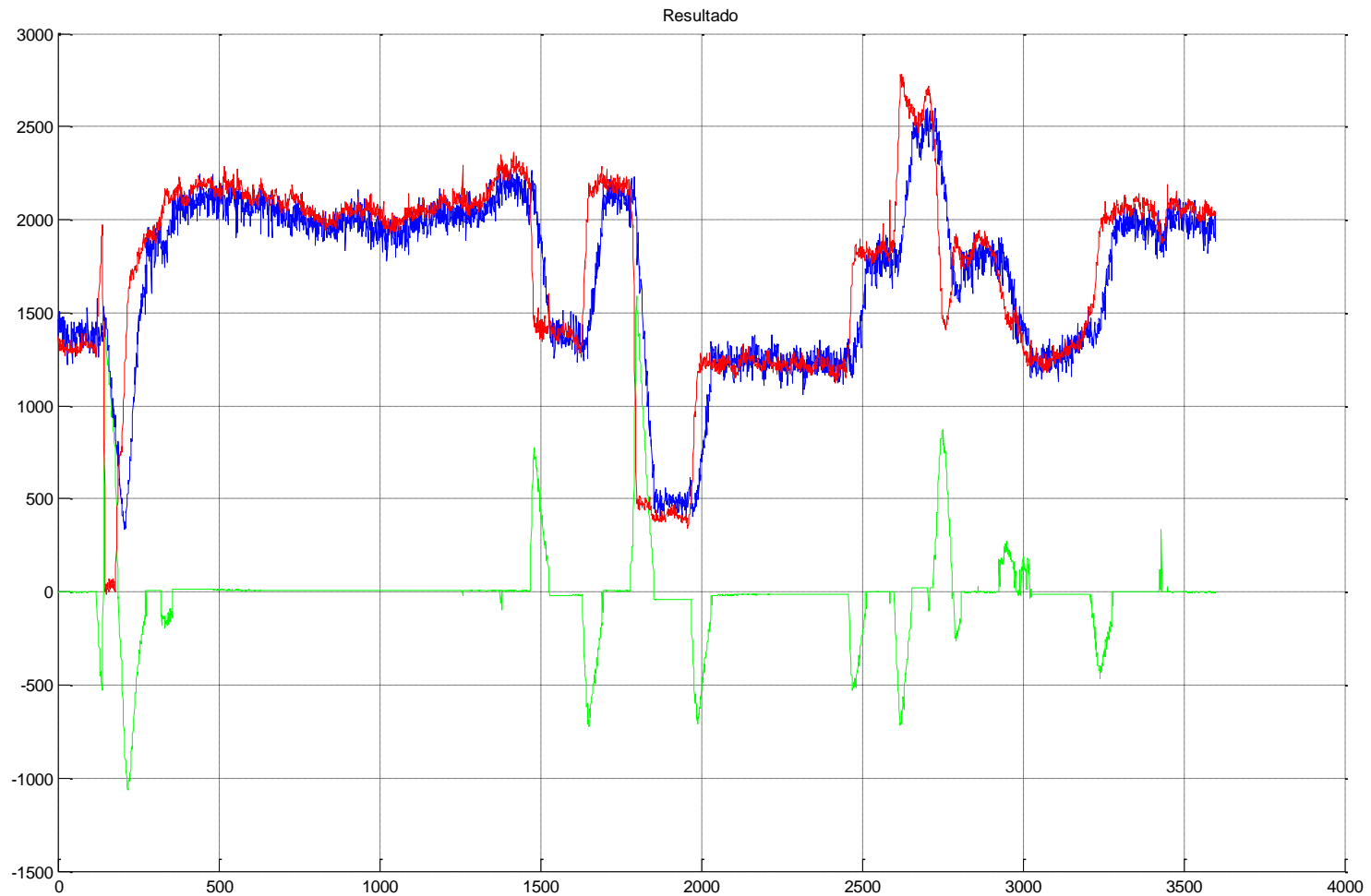
Caso de estudio: Cinco minutos de ensayo.



SOC

# Suavizado de generación con sistemas de acumulación

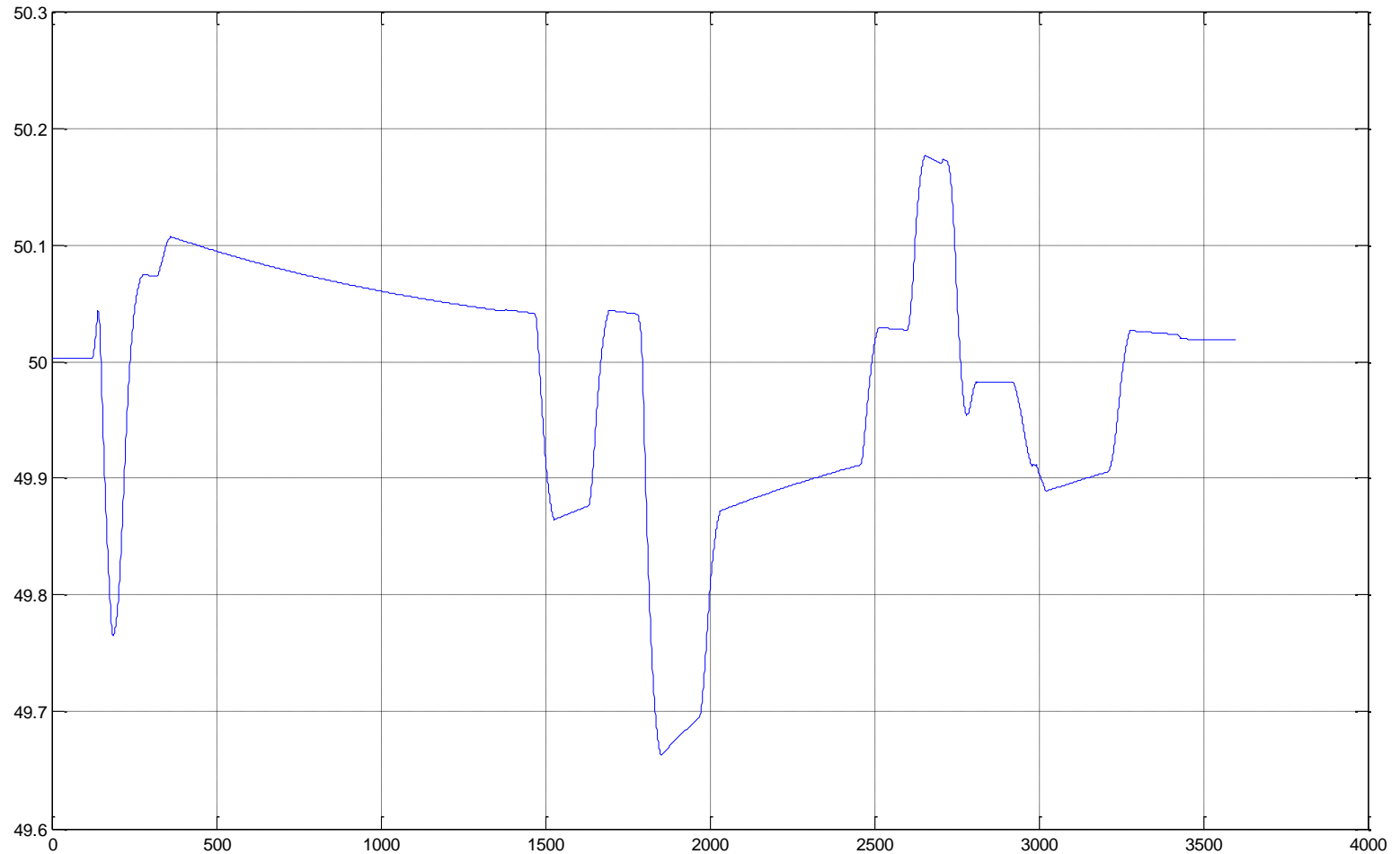
Caso de estudio: Una hora de ensayo.



Pv  
Pg  
Pb

# Regulación de generación con sistemas de acumulación

## Caso de estudio: Una hora de ensayo.



SOC