

Microrredes de DC: Conceptos Básicos, Control Jerárquico y Análisis de Estabilidad

J. Roldán-Pérez

Instituto IMDEA Energía, Madrid, España

www.energy.imdea.org



PARTE I: Introducción y conceptos generales

1. Introducción a las microrredes de AC y DC
2. Conceptos generales de control

PARTE II: Aplicación y Control Jerárquico

1. Descripción de la aplicación
2. Control jerárquico de microrredes
3. Implementación en un laboratorio
4. Resultados

PARTE III: Estabilidad de microrredes de DC

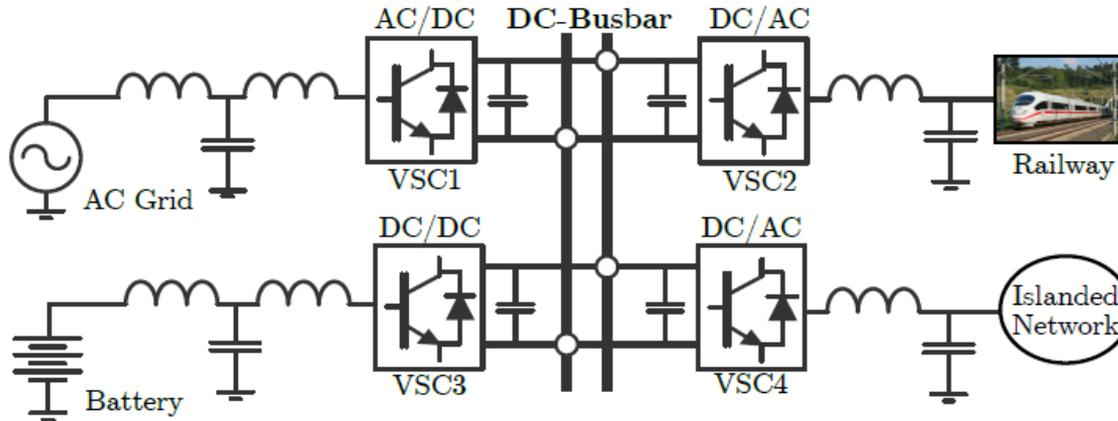
1. Descripción de la metodología
2. Derivación de las ecuaciones y análisis
3. Validación en un laboratorio



PARTE I: INTRODUCCIÓN Y CONCEPTOS GENERALES

1. Introducción (I)

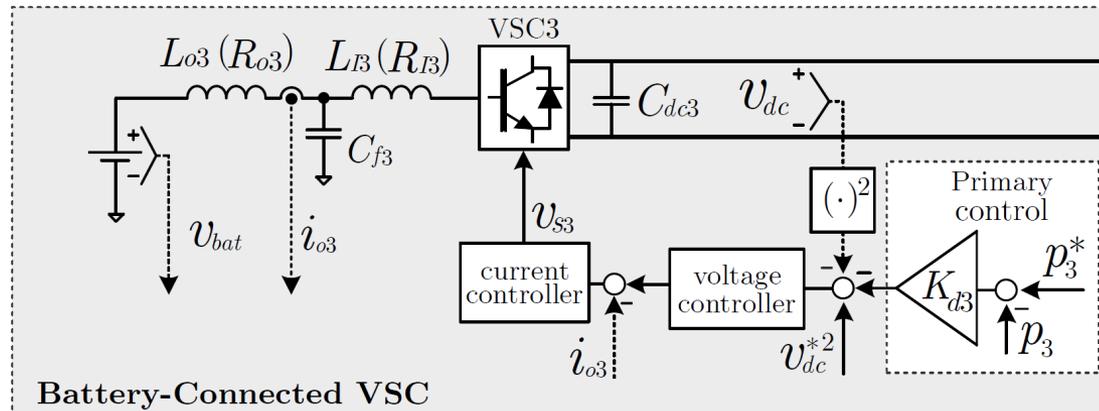
- Cada vez, se conectan a la red eléctrica más dispositivos con tecnologías de operación diferentes.
- Este incluye cargas electrónicas, baterías, generadores renovables, etc.
- La integración de estos dispositivos en una red convencional puede resultar complicado.
- Para simplificar esta tarea, se plantea el uso de microrredes de DC, como la de la figura:



- En esta microrred, todos los elementos comparten una interconexión, que se hace en corriente continua.
- Esto simplifica el control, y se acerca más al concepto plug-and-play que deseado por la mayoría de desarrolladores y fabricantes.

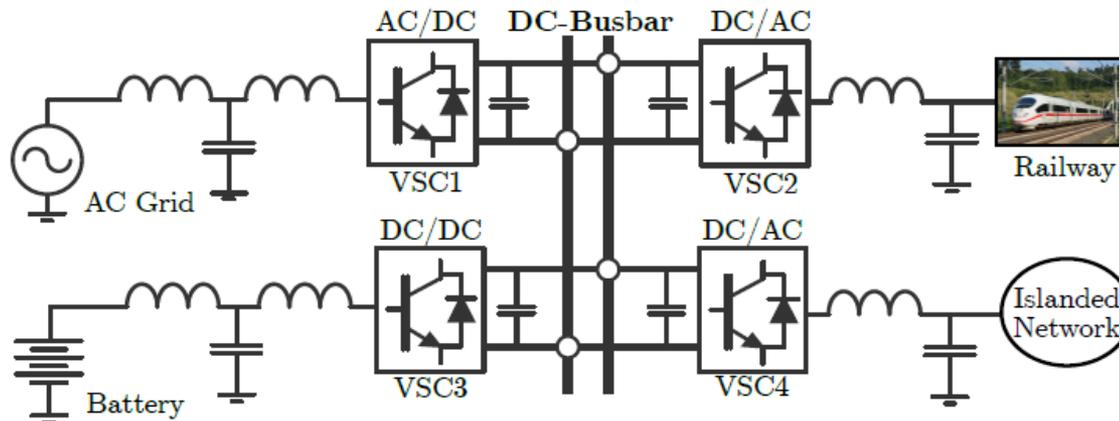
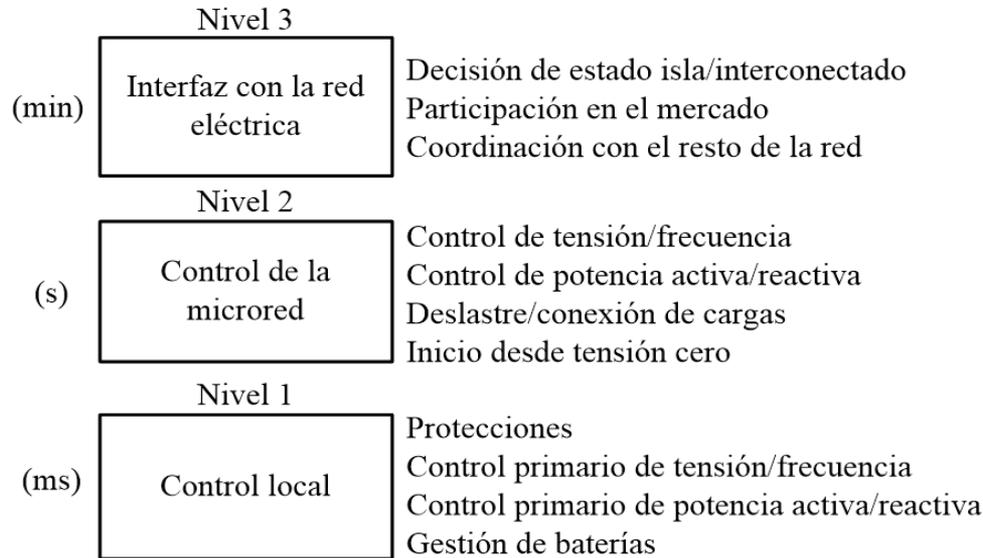
1. Introducción (II)

- Al contrario que en las redes eléctricas convencionales, las dinámicas de las microrredes suelen ser muy rápidas.
- Esto hace que los requisitos para llevar a cabo el control sean exigentes.
- Para microrredes de DC, la aportación de cada convertidor a la estabilidad del bus de DC es importante.
- Por tanto, la coordinación y el control en microrredes es un tema muy relevante.
- En esta presentación se van a abordar dos aspectos:
 - La jerarquía de control de una microrred (AC y DC).
 - La estabilidad de una microrred de DC.
- Además, a modo introductorio, se explicarán de manera simplificada algunos conceptos básicos del control de microrredes.



2. Conceptos Básicos: Jerarquía de Control (I)

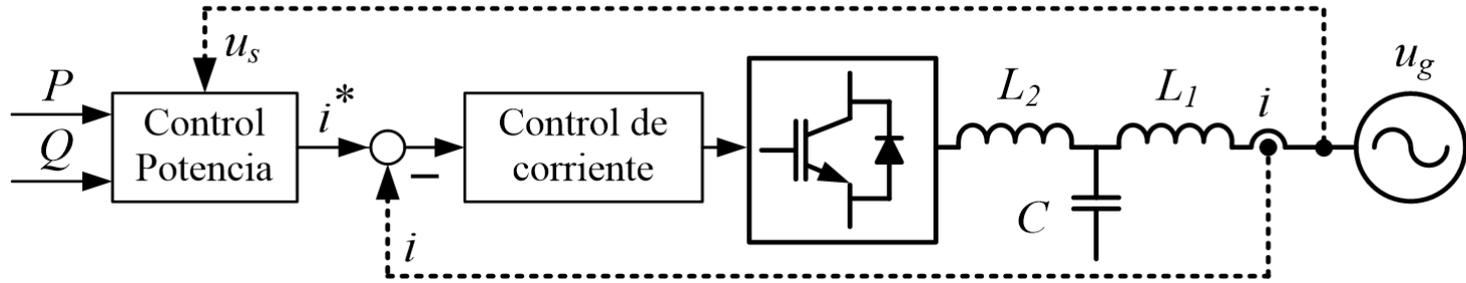
El control de una microrred (tanto AC como DC) se suele plantear de manera jerárquica:



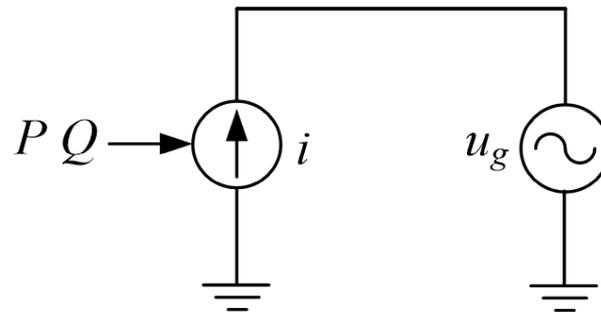
2. Conceptos Básicos: Control de Corriente AC (I)

Control en modo fuente de corriente:

El convertidor controla la corriente AC (o la potencia).



El comportamiento se puede entender de la siguiente manera:



Se utiliza para alimentar cargas (rectificadores controlados).

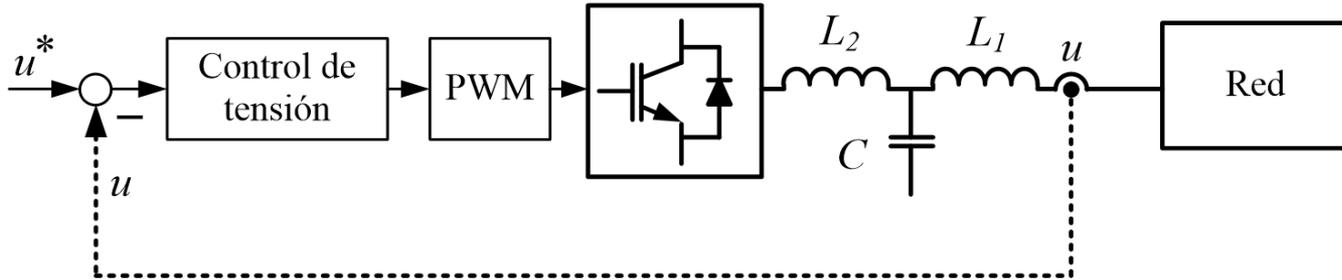
También se utiliza para el control de generadores eólicos y solares.



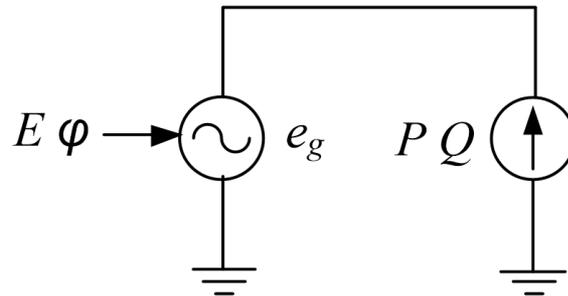
2. Conceptos Básicos: Control de Tensión AC (I)

Control en modo fuente de tensión:

El convertidor controla la tensión de AC.



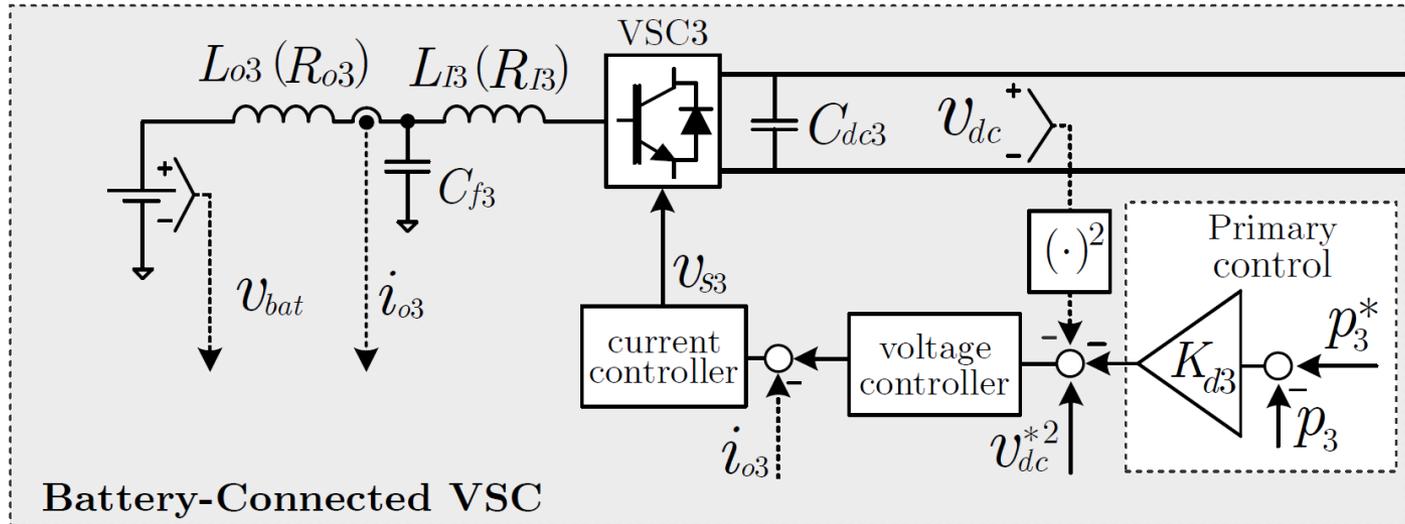
Modelo equivalente:



Se utiliza para sistemas que alimentan cargas (UPS)
Formación de una red desde cero (blackstart)

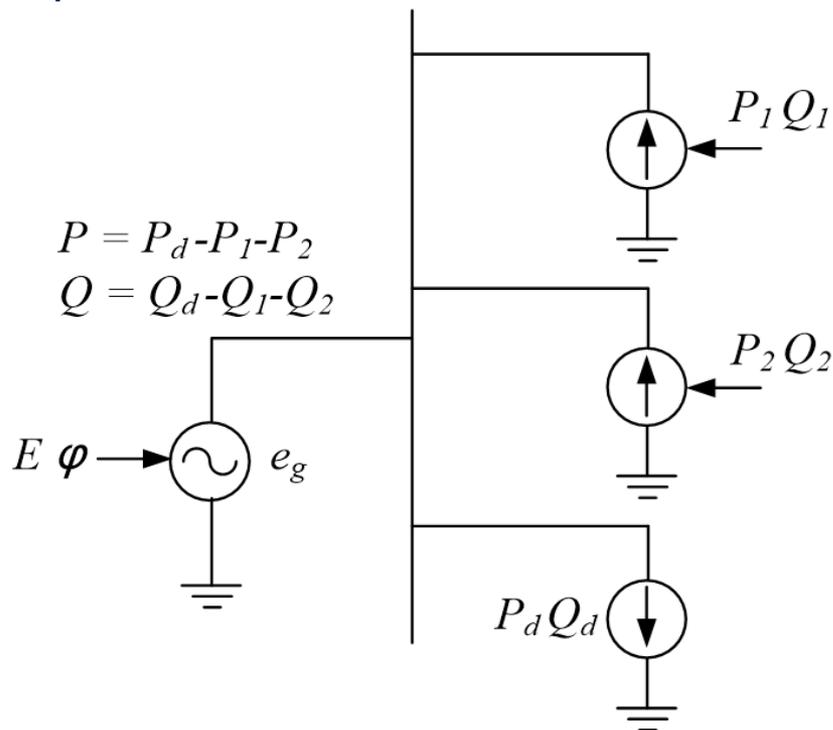
2. Conceptos Básicos: Controles en DC (I)

- Los mismos conceptos de control de tensión y control de corriente se pueden aplicar en redes de DC:
- Por ejemplo, para la conexión de una batería:



2. Conceptos Básicos: Control Slack (I)

Alternativa Slack para control de microrredes:



Ventajas: Sencillo de implementar.

Desventajas: Comunicaciones rápidas, dependencia del master.

Gestión de reservas:

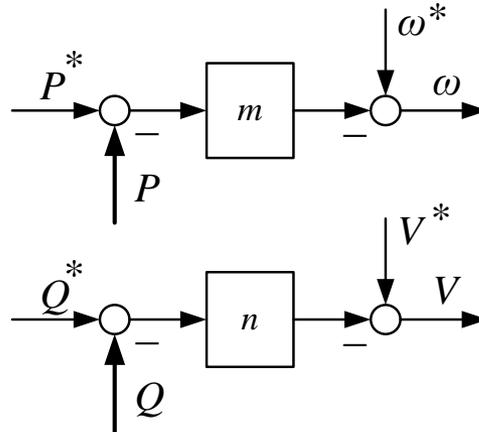
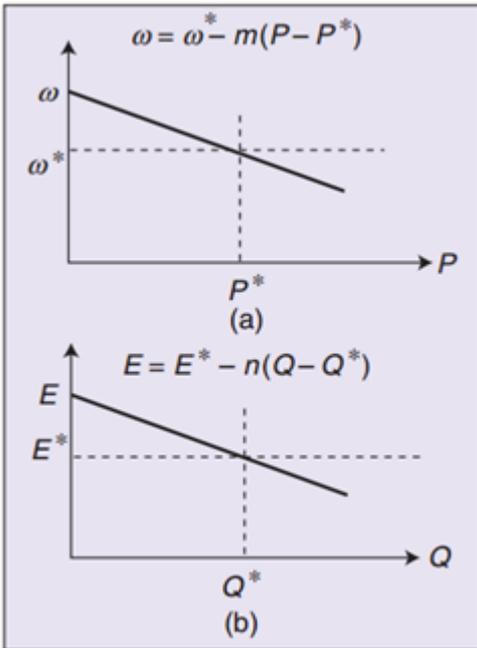
Sistemas de baterías, generación convencional, RES fuera del MPPT.

El mismo concepto de control se puede aplicar a microrredes de DC.

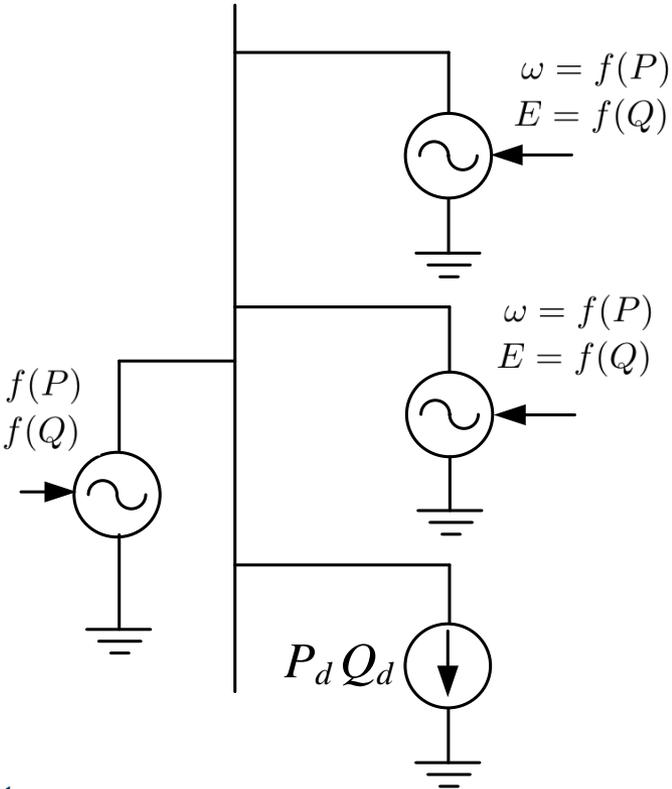


2. Conceptos Básicos: Control Droop (I)

Control local de los generadores:



$\omega = f(P)$
 $E = f(Q)$



Ventajas: No hay master, comunicaciones lentas.

Desventajas: Controladores más difíciles de ajustar.

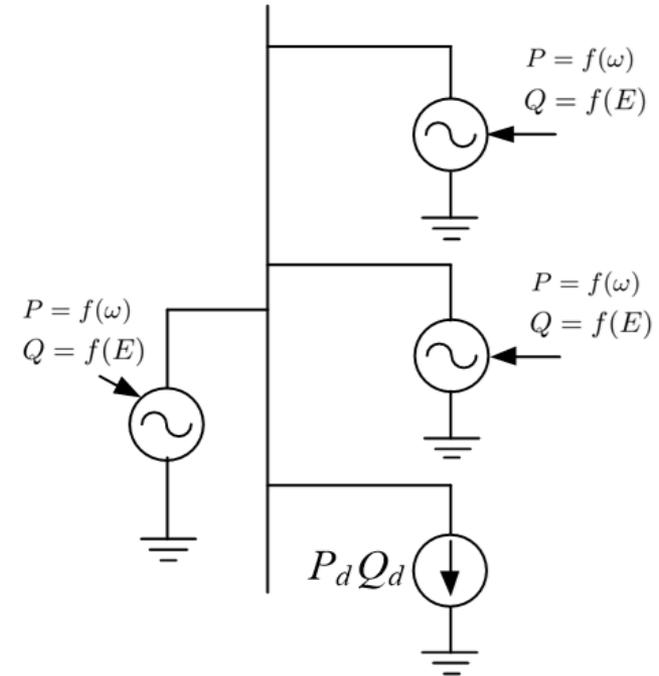
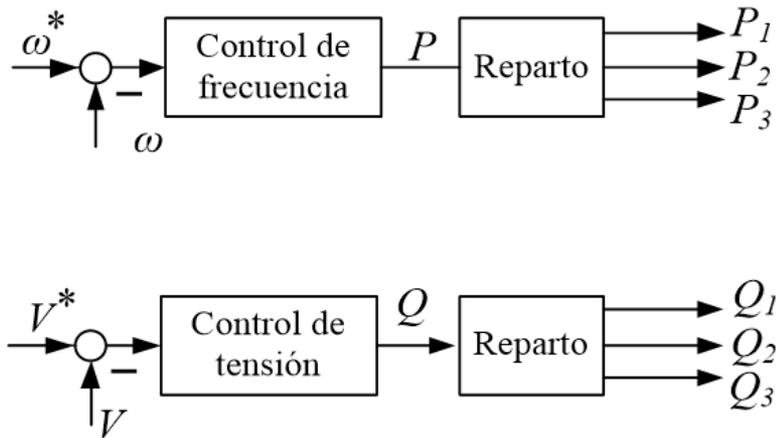
Regulación primaria y método droop:

Parte de P y Q se fija, mientras que otra parte se deja como reserva

Adaptable para microrredes de DC: Tensión DC-potencia

2. Conceptos Básicos: Control Secundario (I)

Control centralizado de los generadores:



Este control suele ser centralizado, aunque también hay alternativas distribuidas.

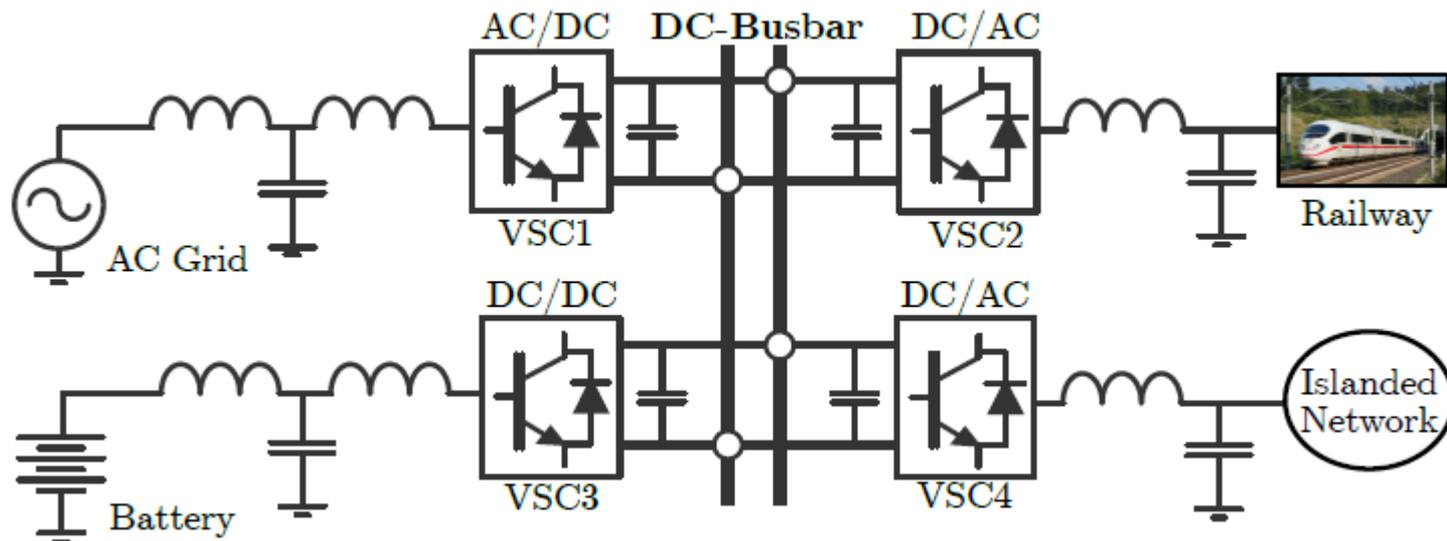
También adaptable para microrredes de DC.



PARTE II: APLICACIÓN Y CONTROL JERÁRQUICO

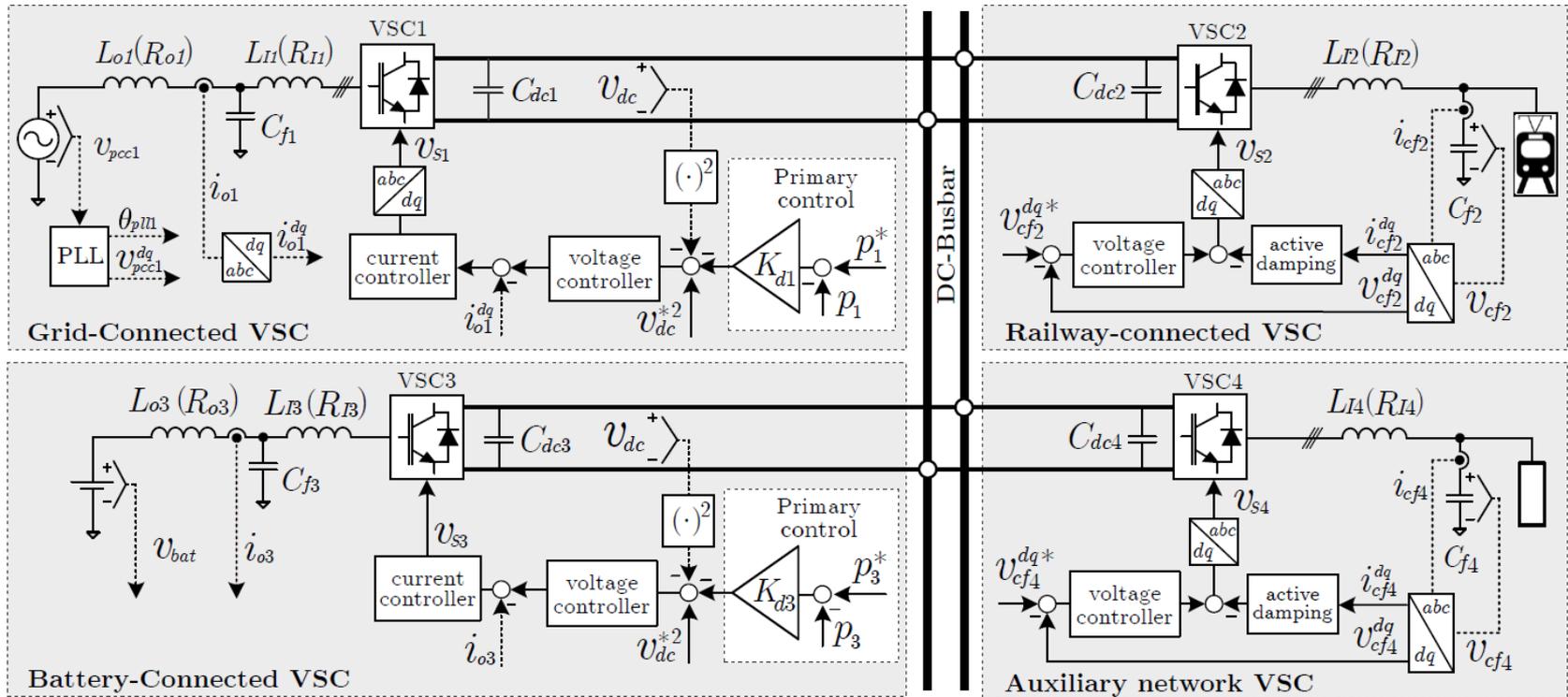
3. Aplicación (I)

- La aplicación es un sistema de alimentación de trenes:
 - Hay una conexión a la red principal.
 - También se puede alimentar el sistema mediante baterías.
 - El tren tiene un perfil de carga y descarga, ya que puede realizar frenado regenerativo.
 - Además, hay una red de alimentación de sistemas auxiliares.
 - Todo está interconectado por una red de DC.
- El objetivo es minimizar el coste de la energía.



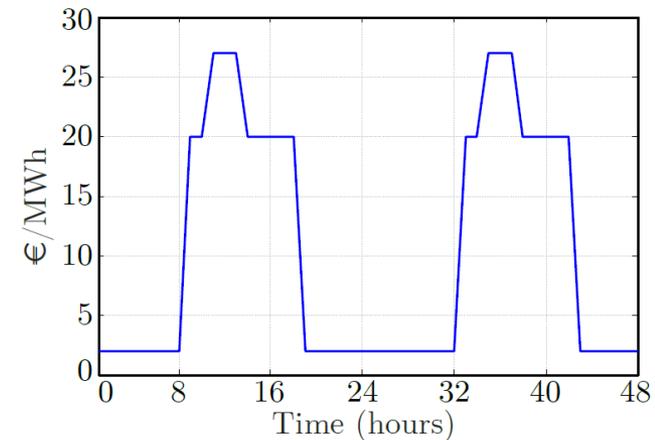
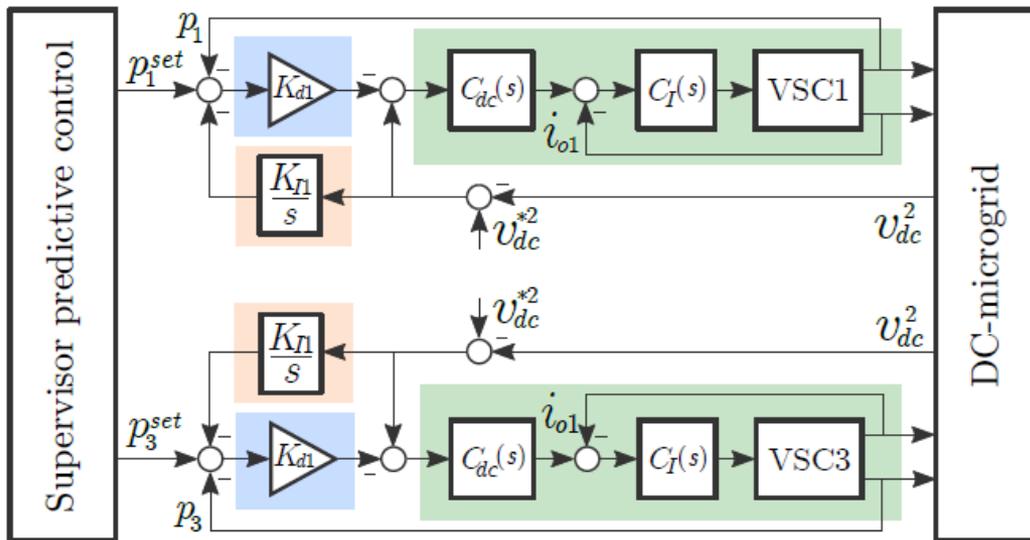
3. Aplicación (II)

- Cada uno de los convertidores tiene sus lazos de control:
 - VSC1 controla la corriente ac y la tensión DC, con droop.
 - VSC2 y VSC4 se controlan en tensión de las cargas.
 - VSC3 es la batería, y se controla la corriente de la batería, y la tensión de DC. Se utiliza un droop de DC.



3. Aplicación (III)

- En la aplicación, se utilizan las tres capas de control:
 - Los VSC1 y VSC3 utilizan un control droop de tensión.
 - Después, un regulador secundario garantiza que la tensión de DC vuelve a su valor nominal.
 - Finalmente, el control terciario manda las referencias.



4. Control: Primario (I)

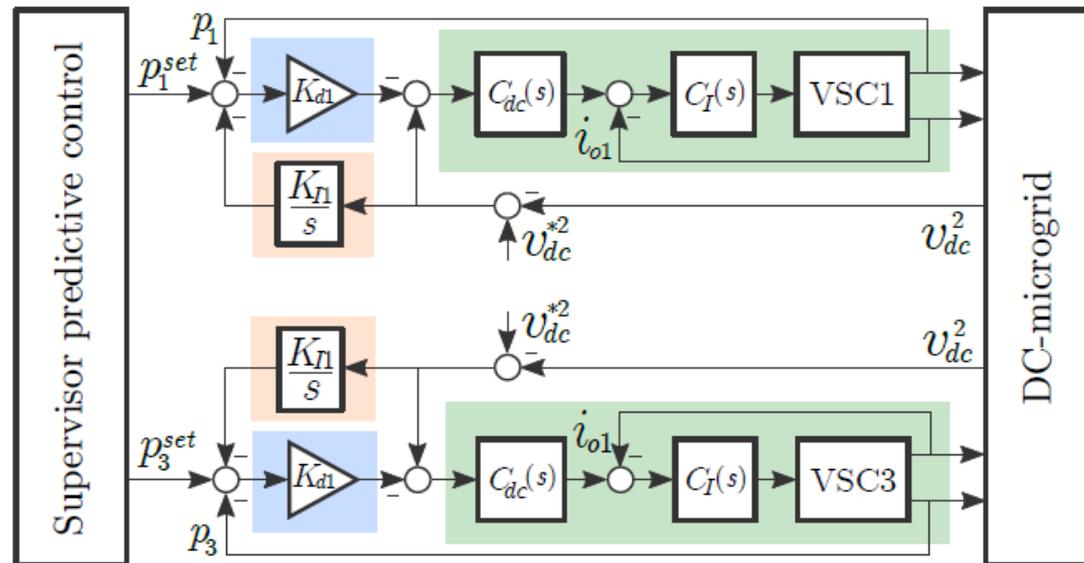
- Se utilizan controles de corriente, tensión AC y tensión DC:

$$C_I(s) = K_P^I + \frac{K_I^I}{s}, \quad C_V(s) = K_P^V + \frac{K_I^V}{s}, \quad C_{dc}(s) = K_P^{dc} + \frac{K_I^{dc}}{s},$$

- Sobre los lazos internos, se utiliza un controlador tipo droop:

$$v_{dc1}^{*2} = v_{dc}^{*2} - K_{d1}(p_1^* - p_1),$$

$$V_{dc2}^{*2} = v_{dc}^{*2} - K_{d3}(p_3^* - p_3),$$



4. Control: Secundario (II)

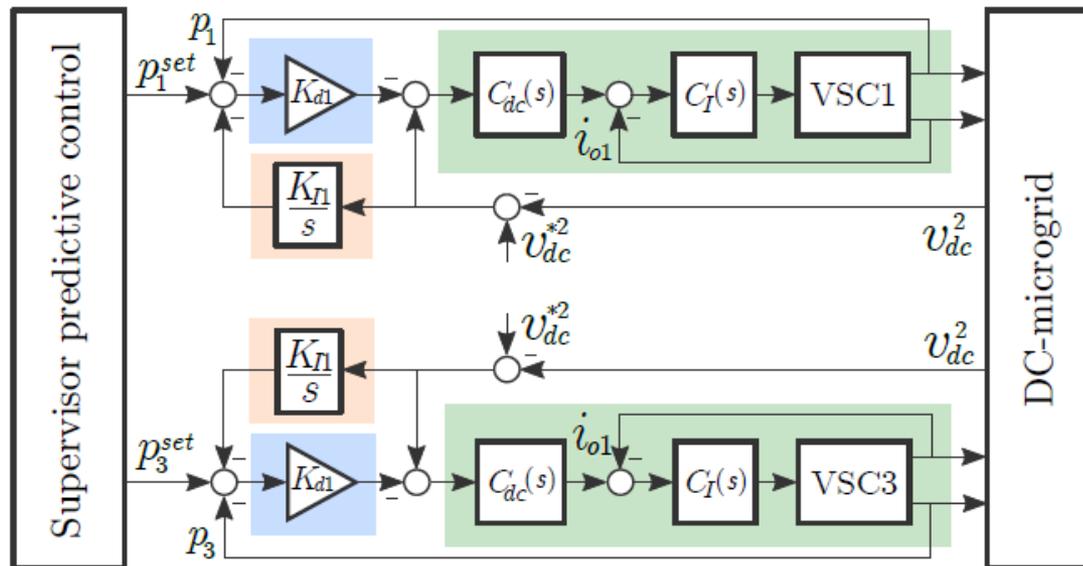
- El control secundario se realiza con un control integral:

$$p_1^* = p_1^{set} - K_{I1}e_v,$$

$$p_3^* = p_3^{set} - K_{I3}e_v,$$

- La integral se calcula en único dispositivo:

$$e_v = \int v_{dc}^{*2} - v_{dc}^2 dt.$$



4. Control: Terciario (III)

- Para el control terciario, se plantea una optimización (Control MPC).
- La función a minimizar es el coste de la energía:

$$\begin{aligned}
 J &= \min \left(\sum_{k=1}^{N_p} p(k) \cdot P_{AC}(k) \right) = \\
 &= \max \left(\sum_{k=1}^{N_p} p(k) \cdot (P_{bat}(k) + P_{train}(k) + P_{load}(k) + \delta) \right),
 \end{aligned}$$

- Además, se tienen las siguientes restricciones de operación:

$$\begin{aligned}
 E_{min} &\leq E_{bat}(k) \leq E_{max}, \\
 P_{bat,min} &\leq P_{bat}(k) \leq P_{bat,max}, \\
 \sum_{k=1}^{\alpha} E_{bat}(k) &= \Phi, \quad \alpha \leq N_p.
 \end{aligned}$$

$$E(k+1) = E(k) + \mu \cdot P_{bat}(k) \cdot T, \quad \forall k,$$

- Limitaciones de energía, potencia y almacenamiento en un periodo.

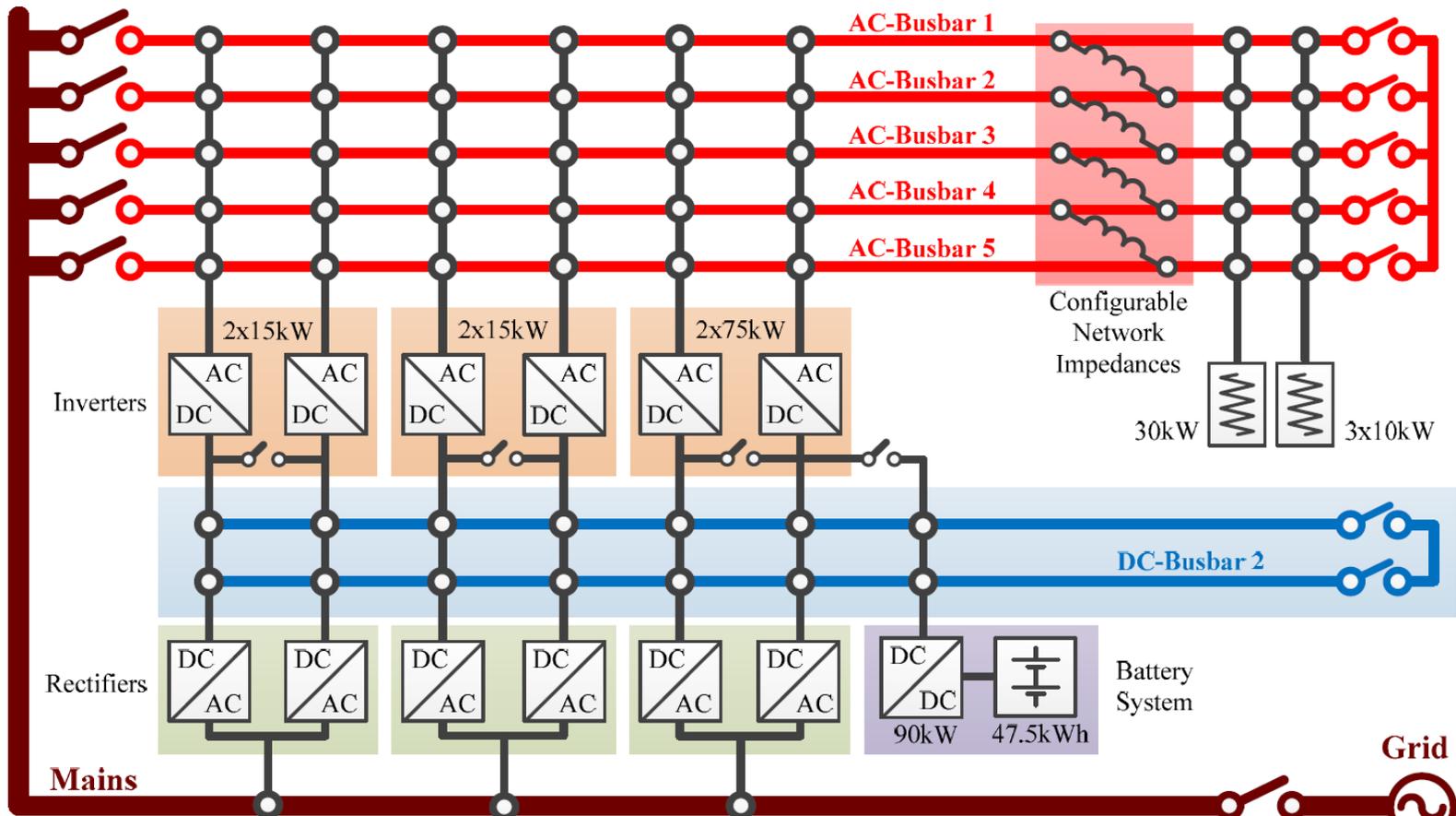


5. Implementación en un Laboratorio (I)

Diagrama eléctrico de las instalaciones:

Convertidores AC/DC y DC/DC de diferentes potencias.

Diferentes líneas, buses de AC y DC, cargas y una batería.



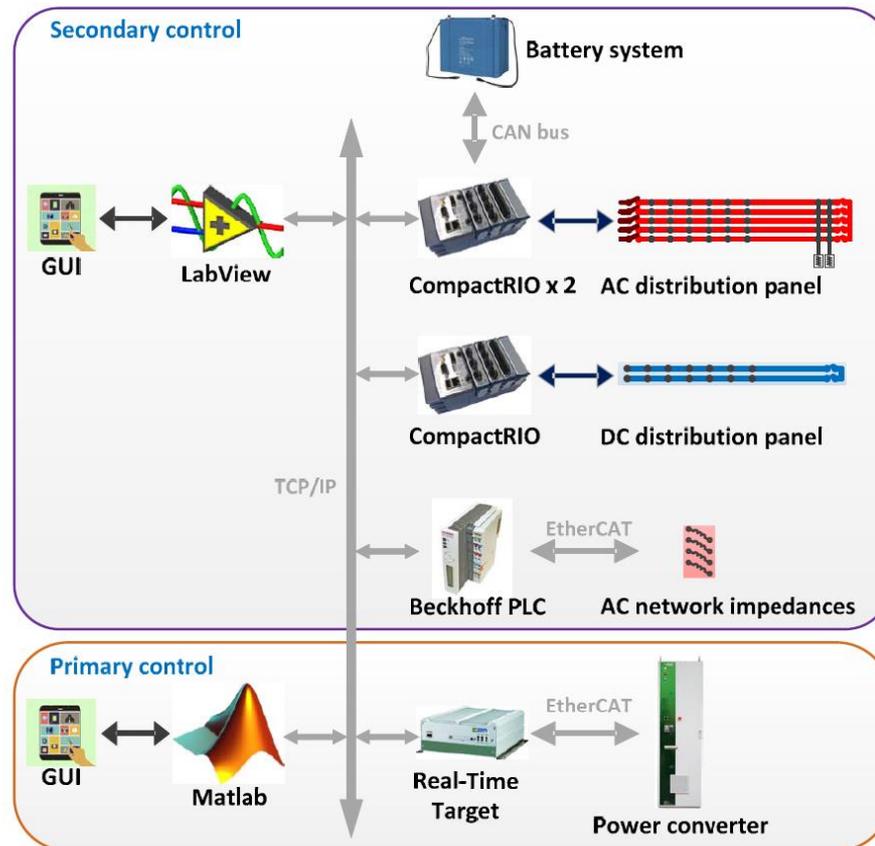
5. Implementación en un Laboratorio (II)

Implementación en tiempo real y medidas:

Los convertidores se controlan mediante Simulink.

Los cuadros de AC y DC, mediante CompactRIO y LabView.

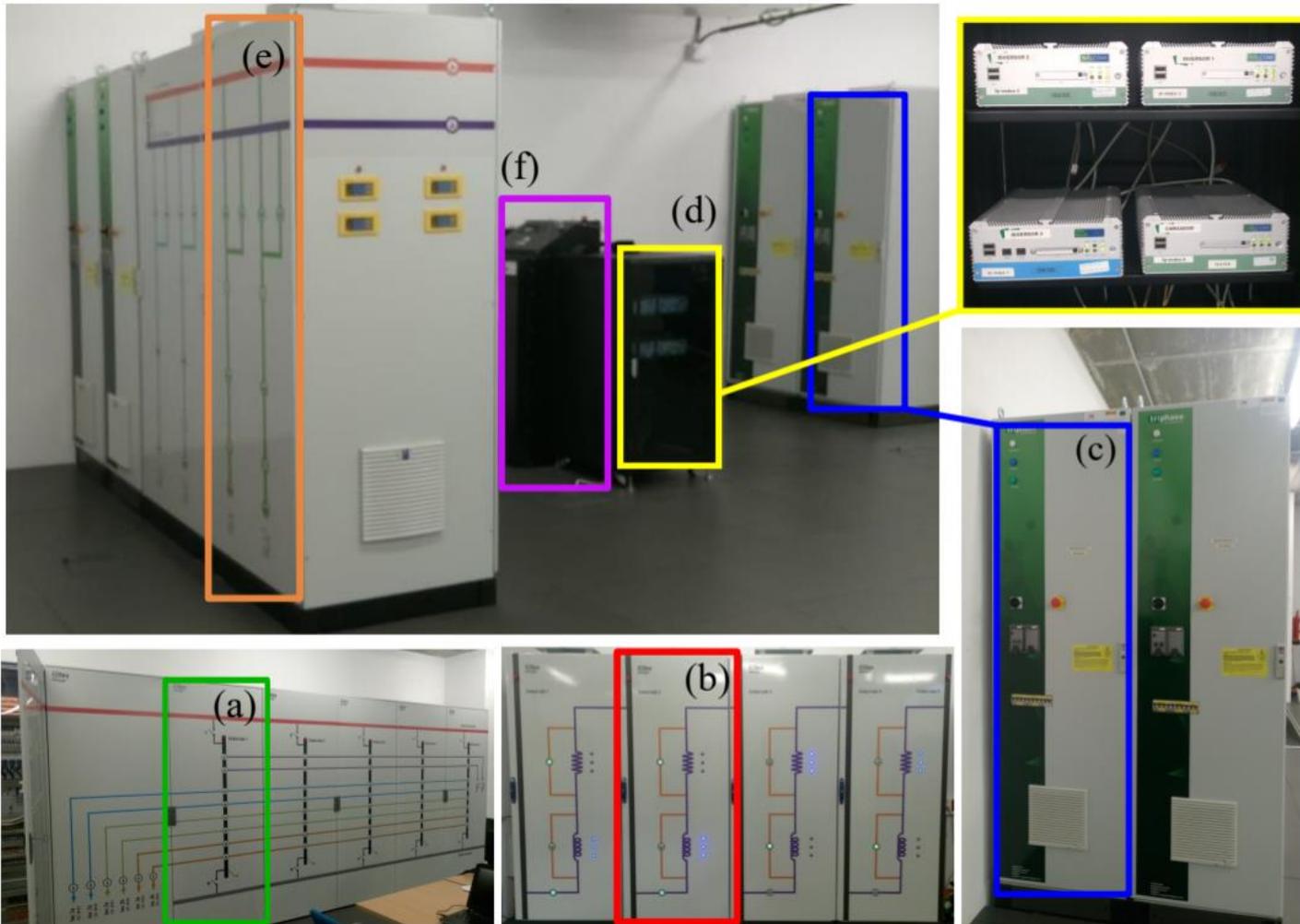
El control terciario se realiza en un ordenador externo.





5. Implementación en un Laboratorio (III)

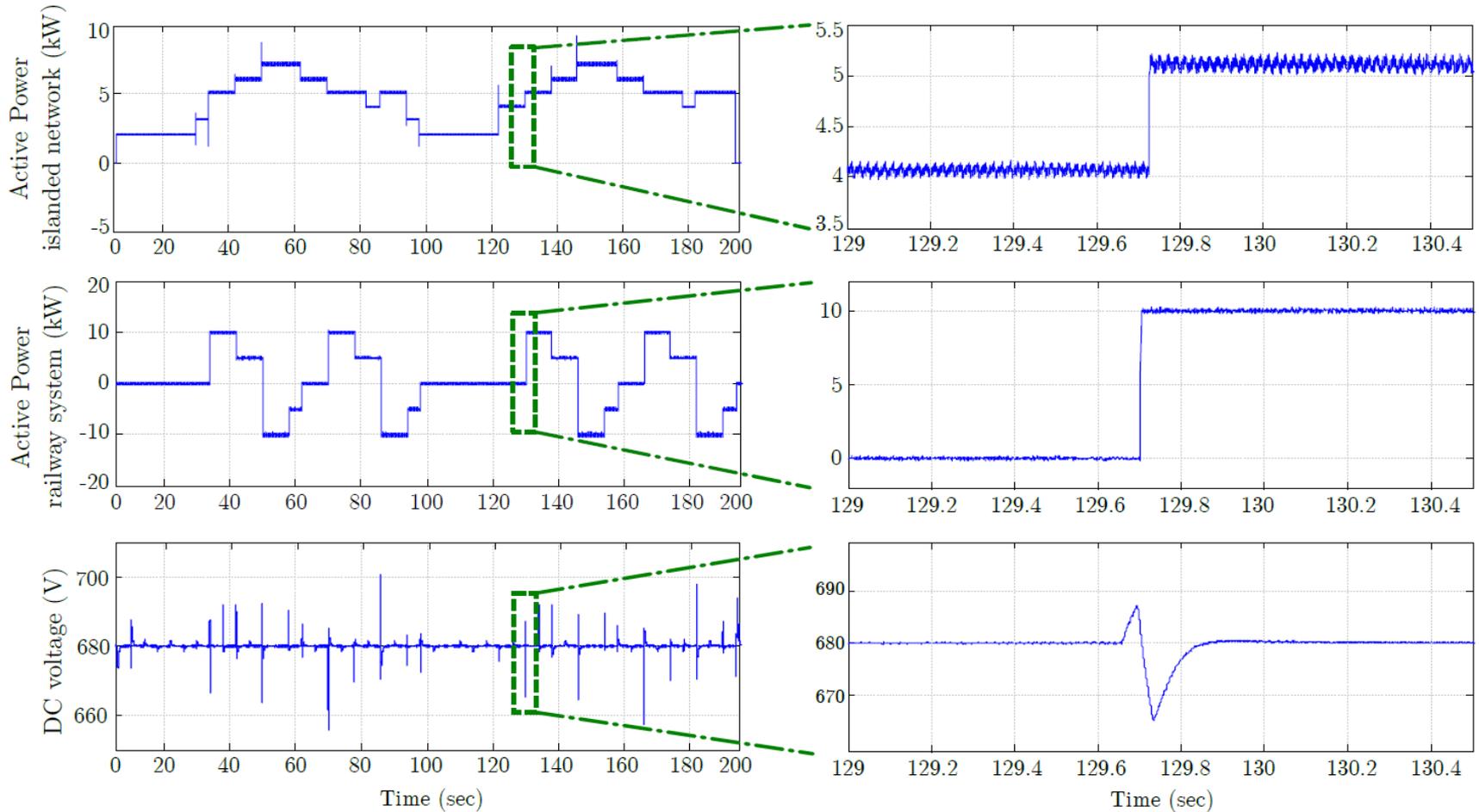
Fotografías de los elementos del laboratorio:





6. Resultados Experimentales (I)

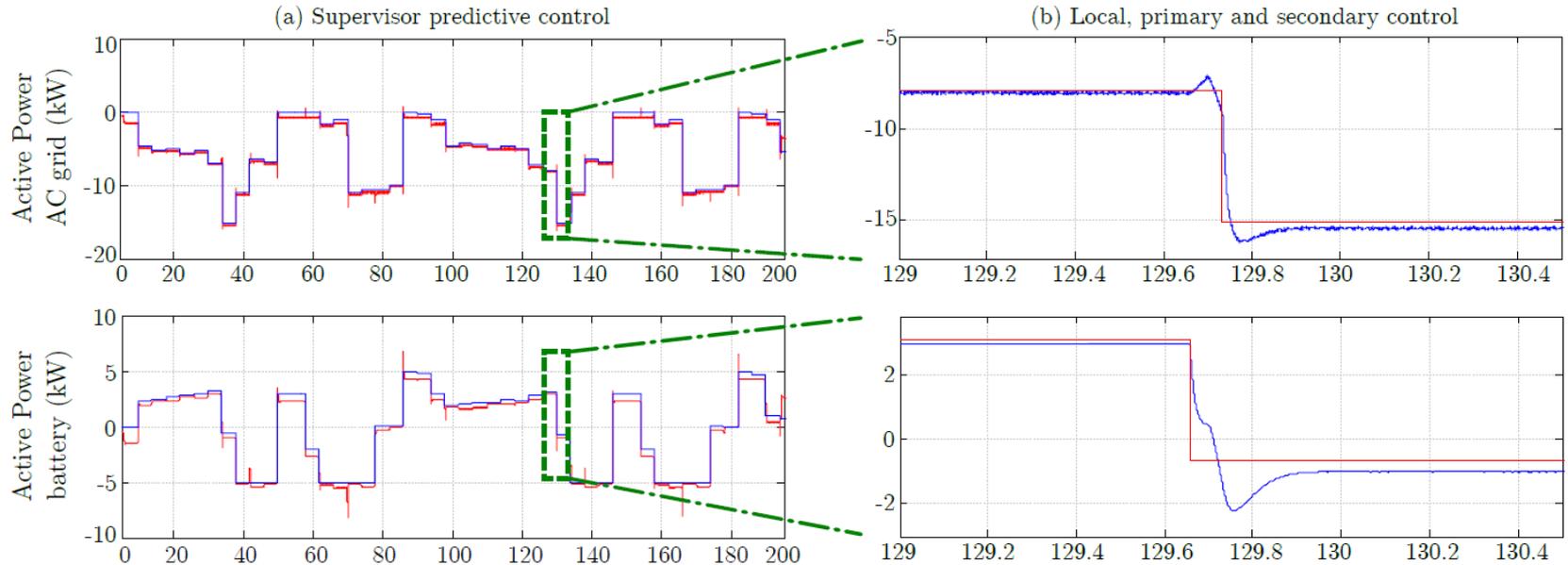
- Resultados experimentales durante un periodo de operación:





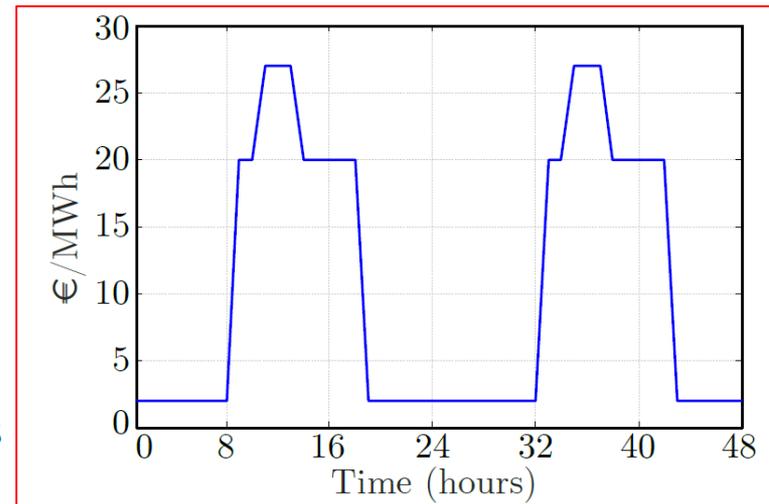
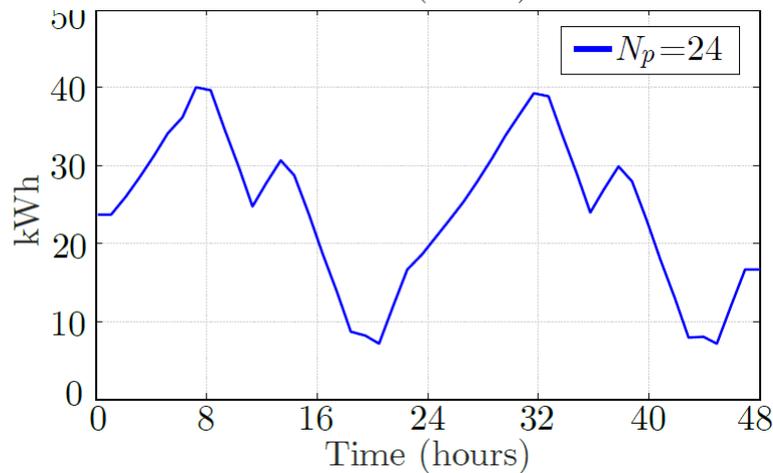
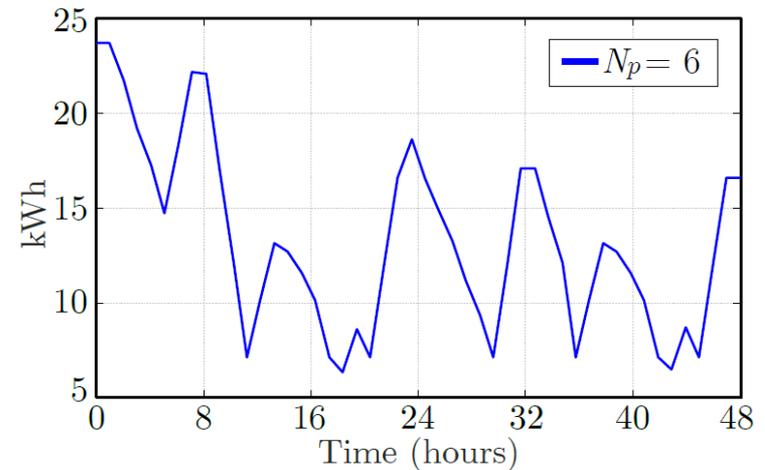
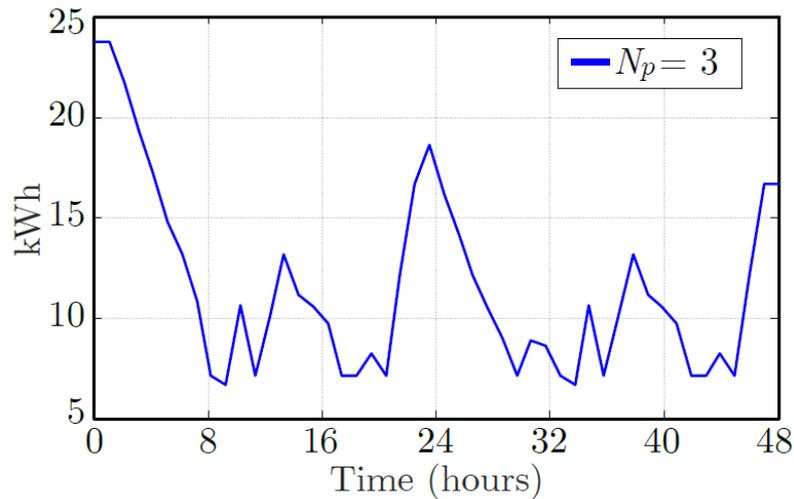
6. Resultados Experimentales (II)

- Resultados experimentales durante un periodo de operación:



6. Resultados Experimentales (III)

- Energía almacenada en la batería, y precio, para diferentes horizontes de predicción:





6. Resultados Experimentales (IV)

- Coste total de la operación durante el periodo:

Case	Cost
Without optimisation	3.71 €
With optimisation, $N_p = 3$ hours	3.51 €
With optimisation, $N_p = 6$ hours	2.99 €
With optimisation, $N_p = 24$ hours	2.33 €

- Claramente, el precio es inferior cuando se tiene una mejor predicción de los eventos futuros.

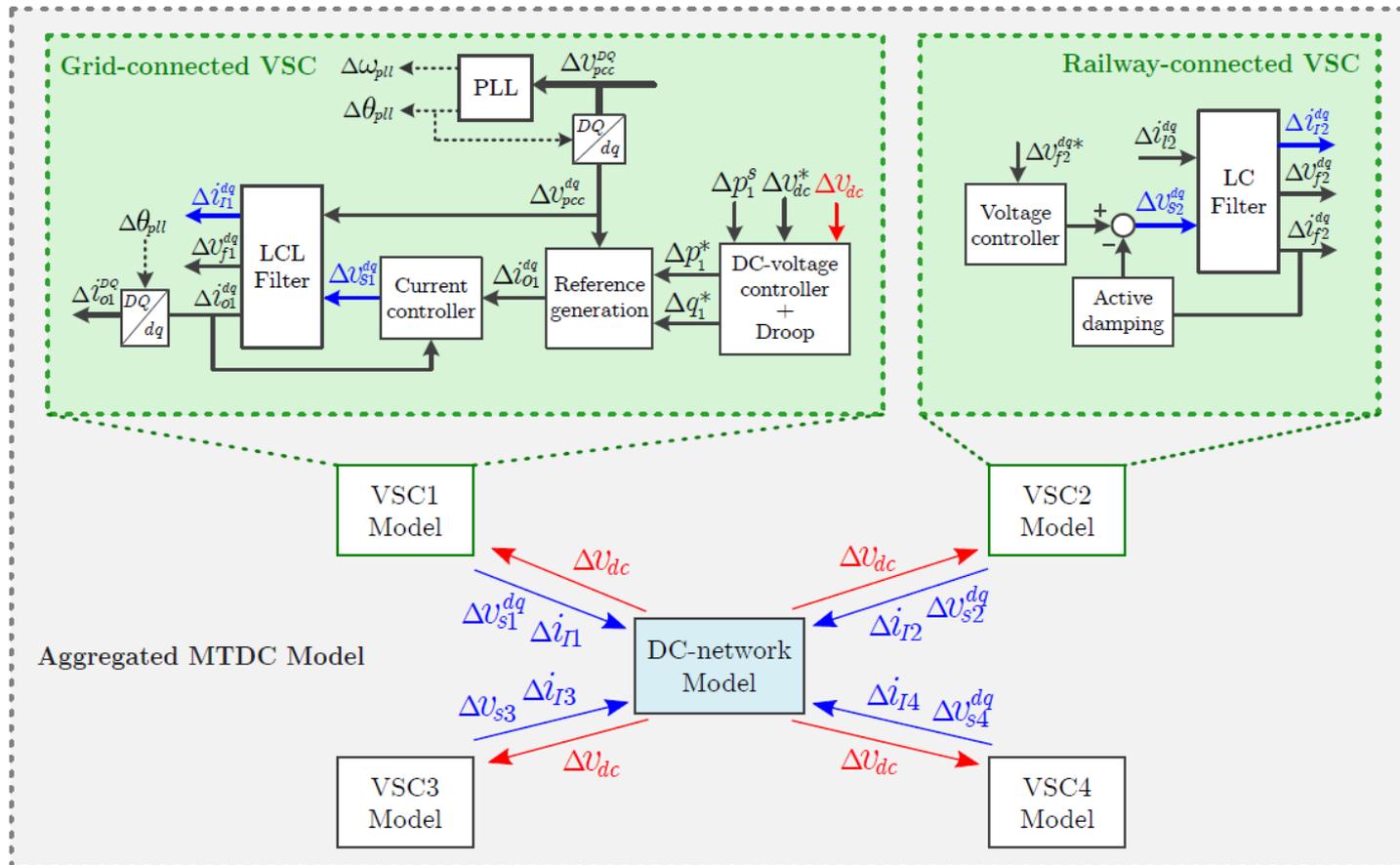


PARTE III: ANÁLISIS DE ESTABILIDAD



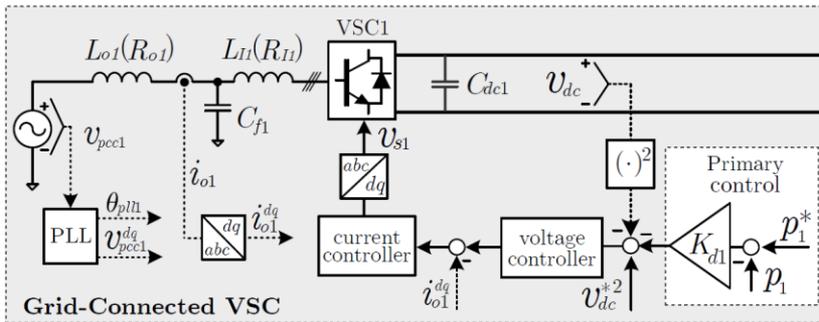
7. Análisis de Estabilidad: Metodología (I)

- Se realizará un análisis de modal (pequeña señal).
- Por tanto, se estudia la posición de los autovalores del sistema.
- Gracias a ello, se pueden diseñar los valores de los droops.

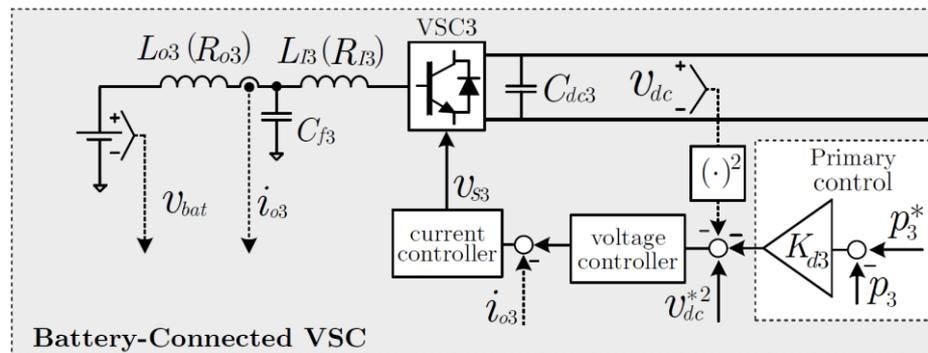


8. Derivación de Ecuaciones (I)

- Cada uno de los componentes se modela por separado.
- Se linealiza el sistema, y se organiza como un espacio de estados.
- Para el VSC1 (conexión a red) y el VSC3 (batería), se tiene:



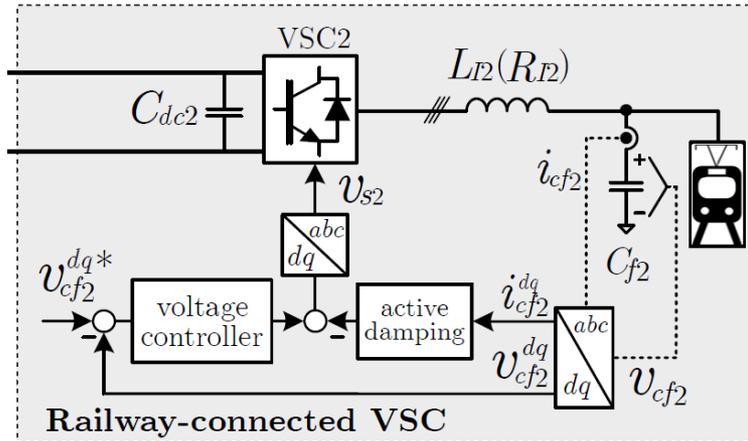
$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta x_1 &= A_1 \Delta x_1 + B_1^{pcc} \Delta v_{pcc1}^{DQ} + B_1^P \Delta p_1^{sp} + B_1^Q \Delta q_1^{sp} + \\ &\quad + B_1^{V^*} \Delta v_{dc}^{*2} + B_1^V \Delta v_{dc}^2 + B_1^I \Delta i_{o1}^{dq} + B_1^\omega \Delta w_s, \\ \Delta v_{s1}^{dq} &= C_1 \Delta x_1 + D_1^{pcc} \Delta v_{pcc1}^{DQ} + D_1^P \Delta p_1^{sp} + D_1^Q \Delta q_1^{sp} + \\ &\quad + D_1^{V^*} \Delta v_{dc}^{*2} + D_1^V \Delta v_{dc}^2 + D_1^I \Delta i_{o1}^{dq} + D_1^\omega \Delta w_s, \end{aligned}$$



$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \Delta x_3 &= A_3 \Delta x_2 + B_3^{bat} \Delta v_{bat3} + B_3^P \Delta p_3^{sp} + B_3^{V^*} \Delta v_{dc}^{*2} + B_3^V \Delta v_{dc}^2 + B_3^I \Delta i_{o3}, \\ \Delta v_{s3} &= C_3 \Delta x_2 + D_3^{bat} \Delta v_{bat3} + D_3^P \Delta p_3^{sp} + D_3^{V^*} \Delta v_{dc}^{*2} + D_3^V \Delta v_{dc}^2 + D_3^I \Delta i_{o3}, \end{aligned}$$

8. Derivación de Ecuaciones (II)

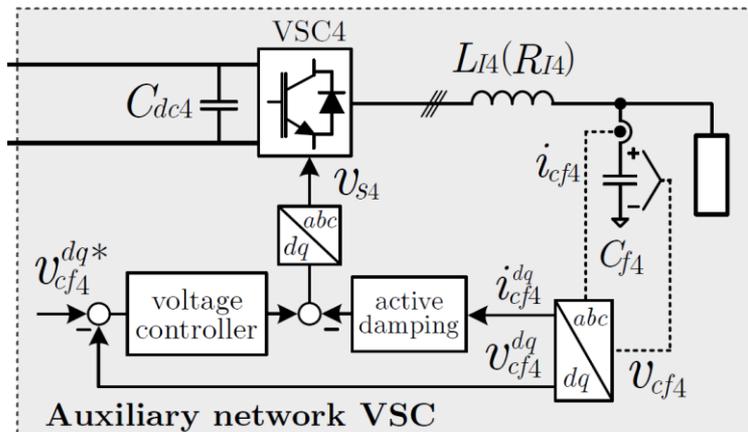
- El VSC2, que alimenta al tren, se modela de la siguiente manera:



$$\frac{d}{dt} \Delta x_2 = A_2 \Delta x_2 + B_2^V \Delta v_{cf2}^{dq} + B_2^{V*} \Delta v_{cf2}^{dq*} + B_2^I \Delta i_{cf2}^{dq},$$

$$v_{s2}^{dq} = C_2 \Delta x_2 + D_2^V \Delta v_{cf2}^{dq} + D_2^{V*} \Delta v_{cf2}^{dq*} + D_2^I \Delta i_{cf2}^{dq}.$$

- El VSC4, que alimenta las cargas auxiliares, tiene el mismo modelo:



$$\frac{d}{dt} \Delta x_2 = A_2 \Delta x_2 + B_2^V \Delta v_{cf2}^{dq} + B_2^{V*} \Delta v_{cf2}^{dq*} + B_2^I \Delta i_{cf2}^{dq},$$

$$v_{s2}^{dq} = C_2 \Delta x_2 + D_2^V \Delta v_{cf2}^{dq} + D_2^{V*} \Delta v_{cf2}^{dq*} + D_2^I \Delta i_{cf2}^{dq}.$$

8. Derivación de Ecuaciones (III)

- La ecuación del bus de DC se utiliza para juntar los modelos:

$$\frac{C_{dc}}{2} \frac{d}{dt} v_{dc}^2 = -(p_{dc1} + p_{dc2} + p_{dc3} + p_{dc4}),$$

$$C_{dc} = C_{dc1} + C_{dc2} + C_{dc3} + C_{dc4},$$

- Cada una de las potencias se puede escribir y linealizar:

$$p_{s1} = v_{s1}^d i_{I1}^d + v_{s1}^q i_{s1}^q,$$

$$\Delta p_{s1} = V_{s1}^{dq} \Delta i_{I1}^{dq} + I_{s1}^{dq} \Delta v_{s1}^{dq},$$

$$p_{s2} = v_{s2}^d i_{I2}^d + v_{s2}^q i_{s2}^q,$$

$$\Delta p_{s2} = V_{s2}^{dq} \Delta i_{I2}^{dq} + I_{s2}^{dq} \Delta v_{s2}^{dq},$$

$$p_{s3} = v_s i_{I3},$$

$$\Delta p_{s3} = V_{s3} \Delta i_{I3} + I_{I3} \Delta v_{s3},$$

$$p_{s4} = v_{s4}^d i_{I4}^d + v_{s4}^q i_{s4}^q.$$

$$\Delta p_{s4} = V_{s4}^{dq} \Delta i_{I4}^{dq} + I_{s4}^{dq} \Delta v_{s4}^{dq}.$$

- Al sustituir estas expresiones en la ecuación del condensador:

$$\frac{C_{dc}}{2} \frac{d}{dt} \Delta v_{dc}^2 = -(V_{s1}^{dq} \Delta i_{I1}^{dq} + I_{s1}^{dq} \Delta v_{s1}^{dq} + V_{s2}^{dq} \Delta i_{I2}^{dq} + I_{s2}^{dq} \Delta v_{s2}^{dq} + V_{s3} \Delta i_{I3} + I_{I3} \Delta v_{s3} + V_{s4}^{dq} \Delta i_{I4}^{dq} + I_{s4}^{dq} \Delta v_{s4}^{dq}).$$

8. Derivación de Ecuaciones (IV)

- Finalmente, sustituyendo todas las ecuaciones y reorganizando el sistema, se puede llegar a la representación de estado:

$$\frac{d}{dt}\Delta x_{DC} = A_{DC}\Delta x_{DC} + B_{DC}\Delta r^* + B_{DC}^d\Delta d,$$

$$x_{DC} = \begin{bmatrix} x_M & x_1 & x_2 & x_3 & x_4 \end{bmatrix}^T,$$

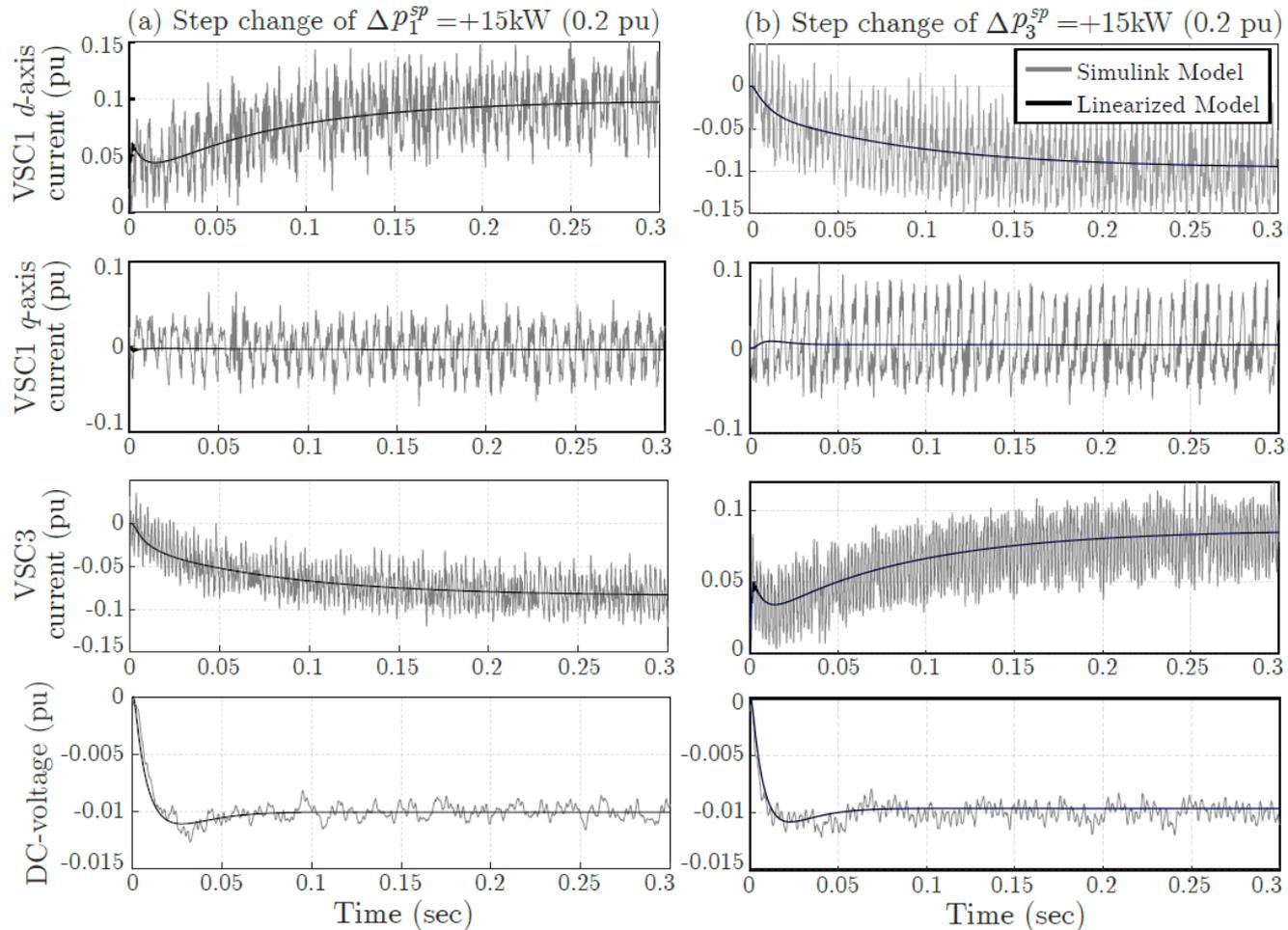
$$d = \begin{bmatrix} v_{pcc1}^{dq} & v_{bat} & i_{l2}^{dq} & i_{l4}^{dq} \end{bmatrix}^T,$$

$$r^* = \begin{bmatrix} p_1^{sp} & p_3^{sp} & v_{dc}^{*2} & v_{cf2}^{dq*} & v_{cf4}^{dq*} \end{bmatrix}^T.$$

- Esta representación de estado permite analizar la estabilidad global del sistema
- Servirá para analizar los valores de los droops, y para buscar interacciones entre los convertidores.

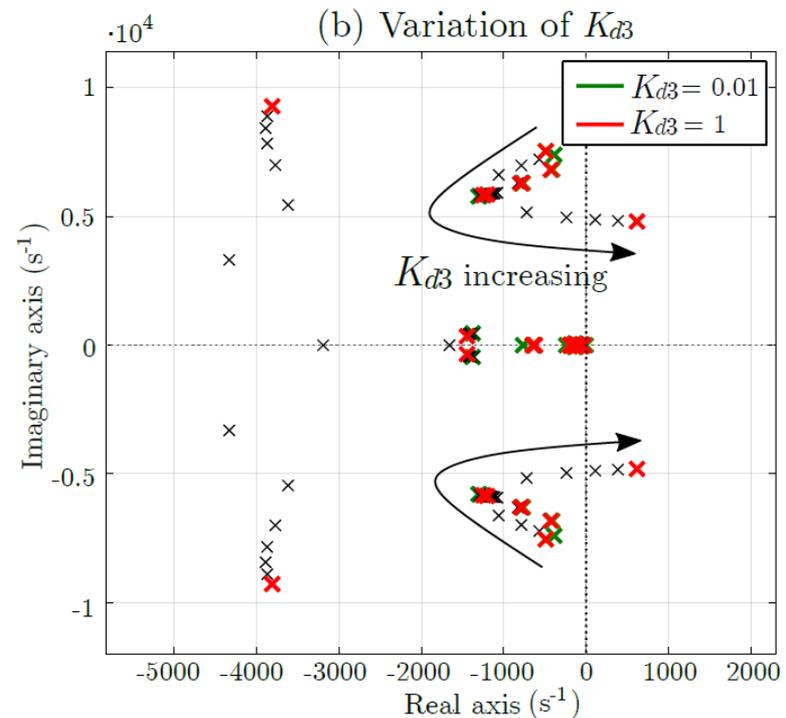
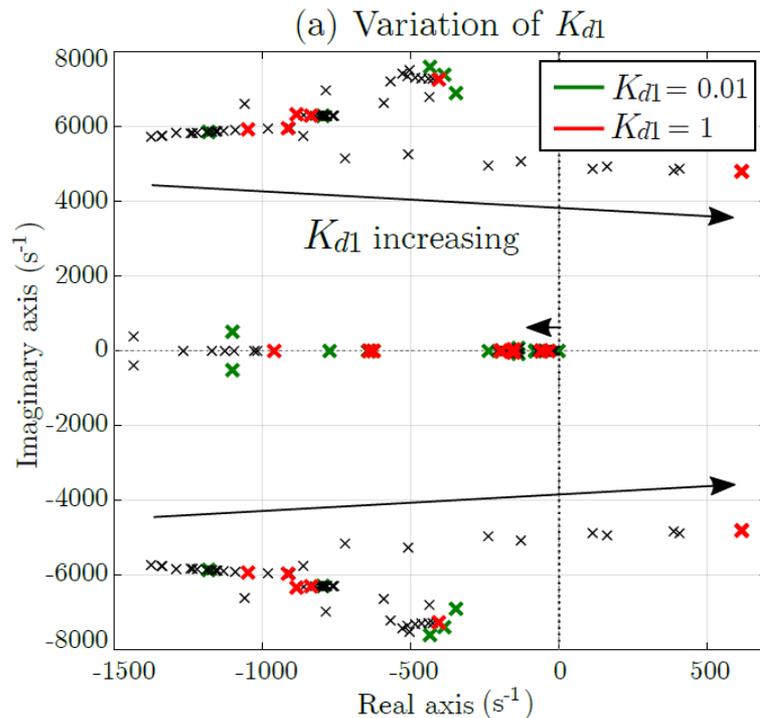
9. Validación del Modelo (I)

- Para verificar el modelo, se compara su dinámica con una simulación.
- La simulación se ha desarrollado en SimPowerSystems.



10. Análisis de Estabilidad (I)

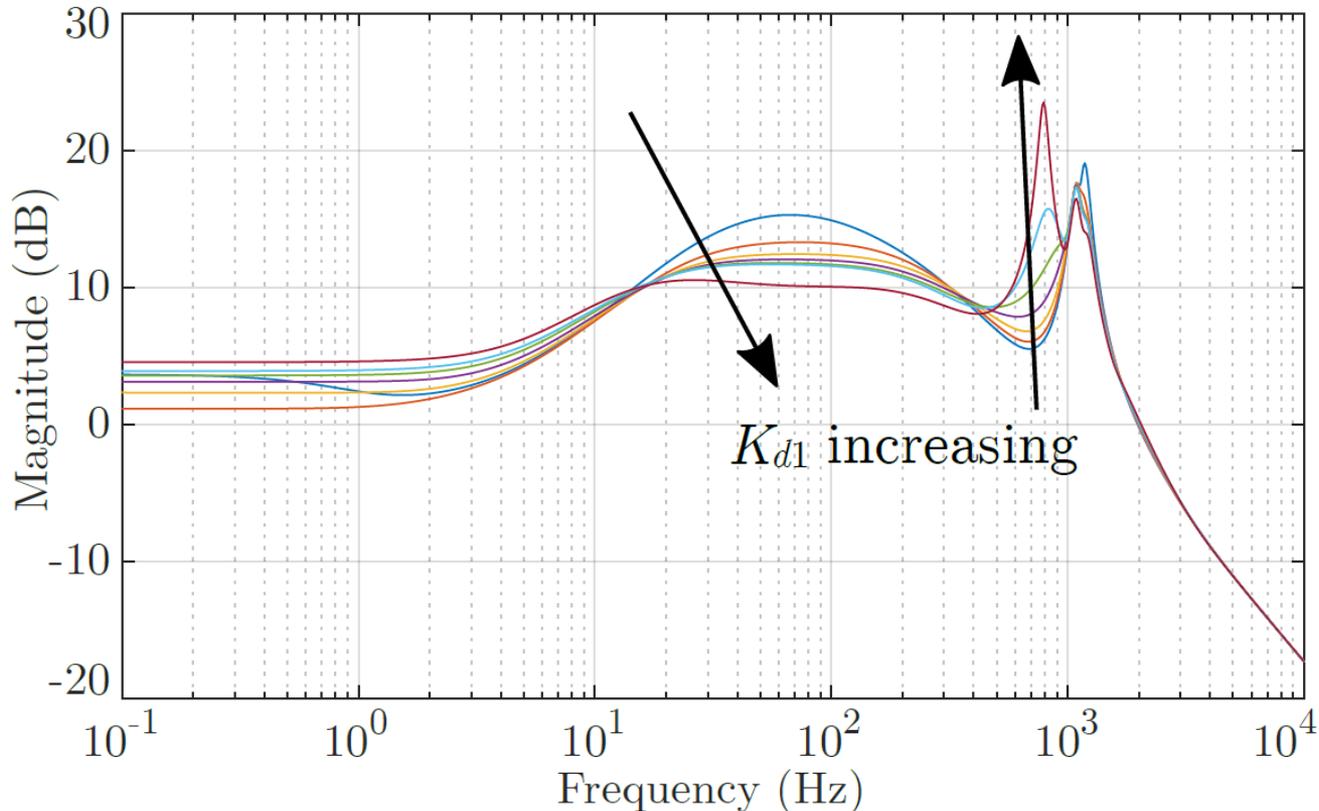
- Se obtienen los autovalores del sistema, variando algún parámetro de interés.
- Por ejemplo, se puede modificar el valor de los droops, y pintar la traza.
- Variando los valores de los droops, se observan los límites del ajuste:





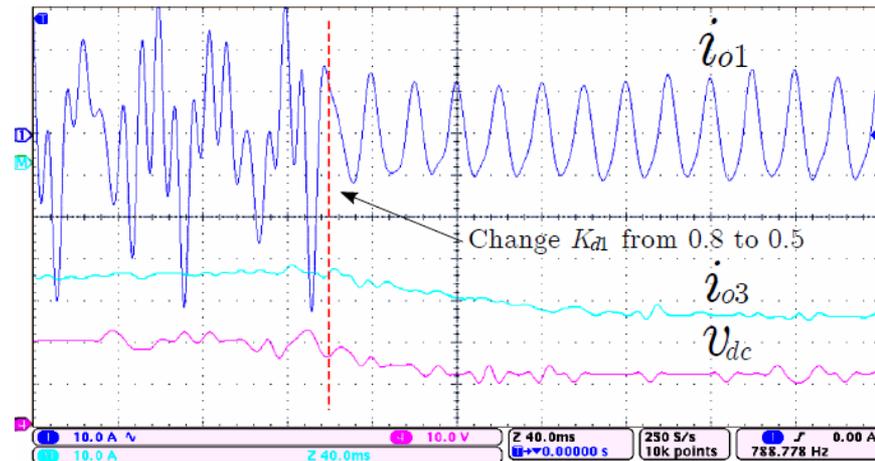
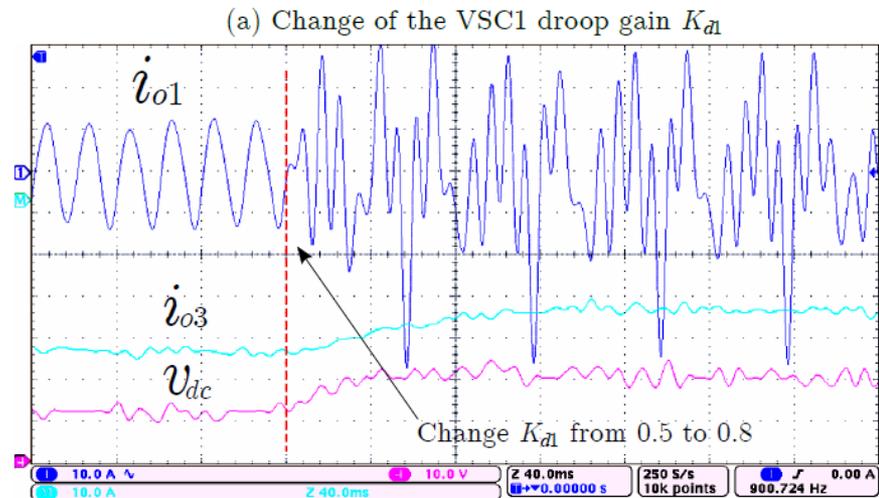
10. Análisis de Estabilidad (II)

- Se pueden utilizar otras herramientas de análisis de sistemas lineales, como los valores singulares.
- Por ejemplo, esta gráfica, se puede ver en que rangos de frecuencia afecta más el ajuste de uno de los droops.



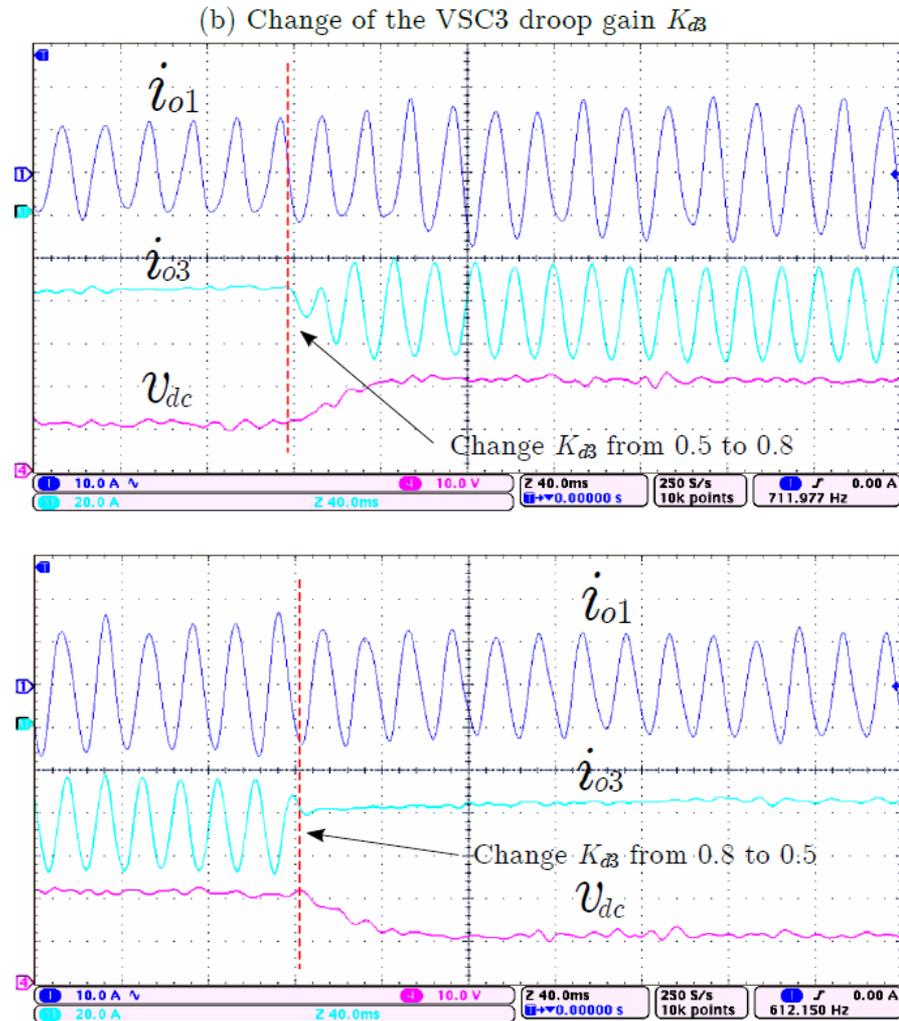
11. Validación en el Laboratorio (I)

- Se validaron los valores máximos de los droops en el laboratorio:



11. Validación en el Laboratorio (II)

- Se validaron los valores máximos de los droops en el laboratorio:





CONCLUSIONES



11. Conclusiones (I)

- Las microrredes de DC son una solución para la integración de diferentes tecnologías.
- La estructura de control jerárquico permite un control flexible de la microrred.
- En primer lugar, los lazos internos garantizan la seguridad de cada dispositivo.
- Además, el control primario permite distribuir la carga entre los convertidores, sin necesidad de comunicaciones rápidas.
- Una vez estabilizada la MG, el control secundario permite restaurar la tensión y la frecuencia.
- Finalmente, con los lazos de control terciario, se puede optimizar el funcionamiento en el largo plazo.



11. Conclusiones (II)

- En esta presentación, se ha descrito una aplicación, y se ha planteado un sistema de control jerárquico.
- En particular, se ha utilizado un controlador tipo MPC para optimizar el funcionamiento desde un punto de vista económico.
- Todas las capas de control se han implementado en un laboratorio, y se ha verificado que el sistema puede operar correctamente.
- Además, se ha verificado que, cuanto más datos tenga el sistema MPC, más se podrá minimizar el coste de operación del sistema.
- Se ha realizado el análisis de estabilidad de una MG.
- Para el ejemplo visto en el control jerárquico, se ha construido un modelo de pequeña señal.
- Se ha verificado que este modelo es capaz de captar las dinámicas del sistema completo.
- Además, el modelo de pequeña señal se ha utilizado para ver el efecto de los droops en la estabilidad del sistema global.
- Finalmente, se ha verificado en un laboratorio que los límites de estabilidad calculados son realistas.



Datos de contacto:

Javier Roldán Pérez

Email: Javier.roldan@imdea.org

Instituto IMDEA Energía, Madrid, España