

GRUPO GEA-IIT INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
(Aurelio García Cerrada)

Reunión: 22/09/2021

Web: geiser.depeca.uah.es/promint

INTRODUCCIÓN IIT y el modelado y control de microrredes inteligentes híbridas

Aspectos del trabajo realizado

- “Aprendizaje profundo por refuerzo” (Deep Reinforcement Learning) para la gestión de generación en microrredes inteligentes
[Optimización de la operación a través de una red neuronal profunda (varias capas) que sirve para aprender a base de prueba y error]
- Modelado de microrredes: dinámicas relevantes, reducción de modelos y modelado y análisis de redes desequilibradas
- Control basado en agentes en microrredes inteligentes

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro




Comunidad
de Madrid

Aprendizaje Profundo por Refuerzo

OBJETIVOS

- Minimización del coste y de la “energía no despachada” en microrredes con mix de generación variado
- Sin modelos complejos y sin predicción
- Frente a técnicas de optimización clásicas con información completa

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro




**Comunidad
de Madrid**

Aprendizaje Profundo por Refuerzo

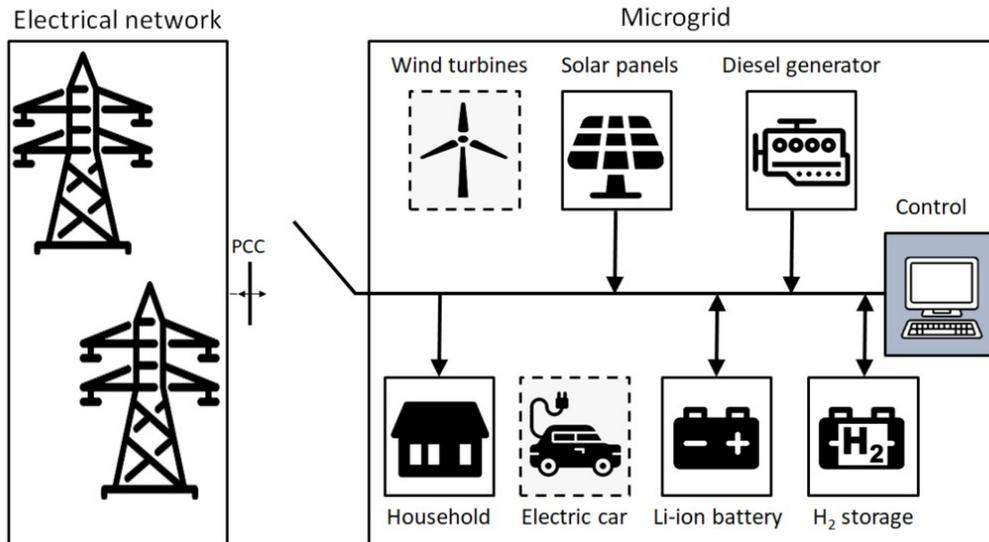
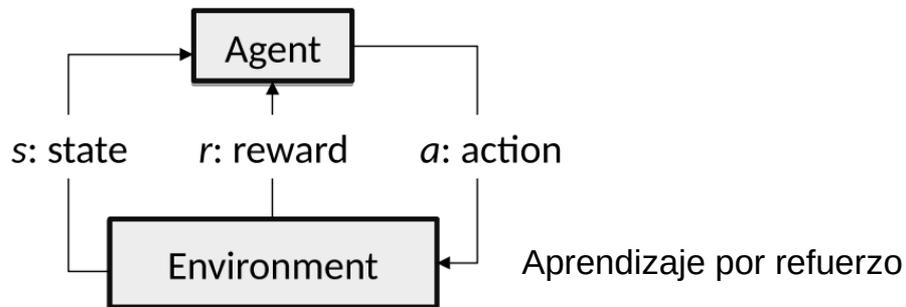
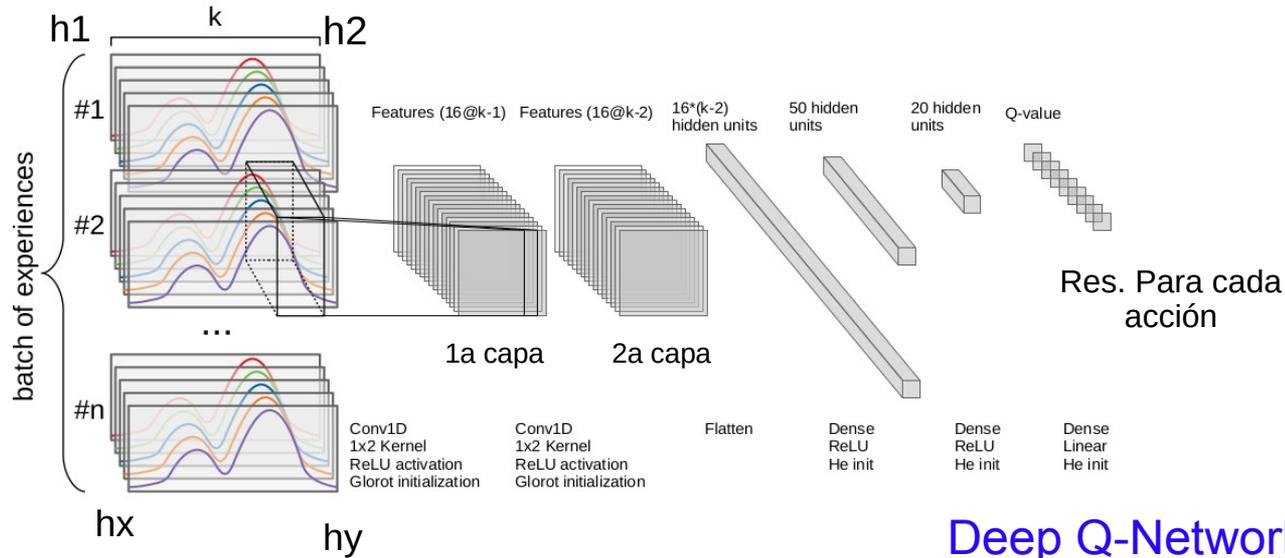


Figure 1. Schematic example of a microgrid.



- Se tienen datos históricos, para renovables.
- **Alternativas:**
- “Aprender la estrategia óptima” vs “Algoritmos convencionales con *info completa*”

Aprendizaje Profundo por Refuerzo



- Se minimiza el coste y la “energía no despachada”
- Se usa una ANN para estimar la “calidad de la solución”
- En cada paso se calcula la energía suministrada por los paneles solares, la batería, la pila de hidrógeno y el generador diésel
- La producción de cada componente tiene valores continuos (frente a etapas anteriores en el proyecto)

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro

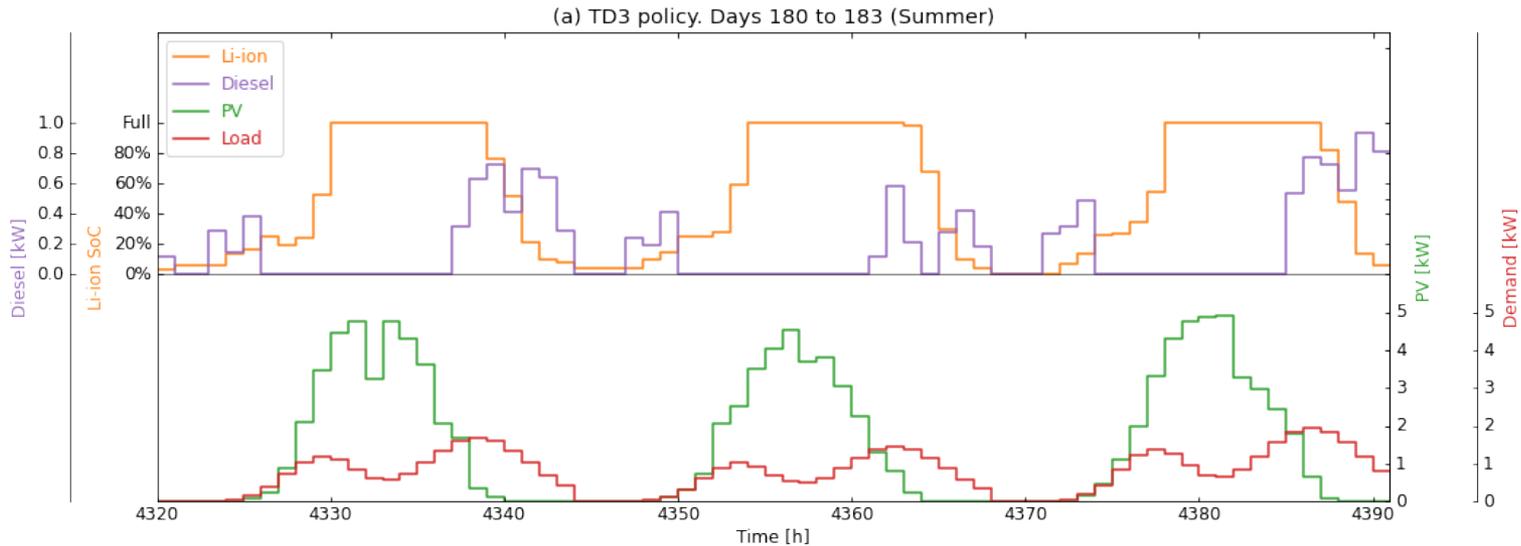


UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



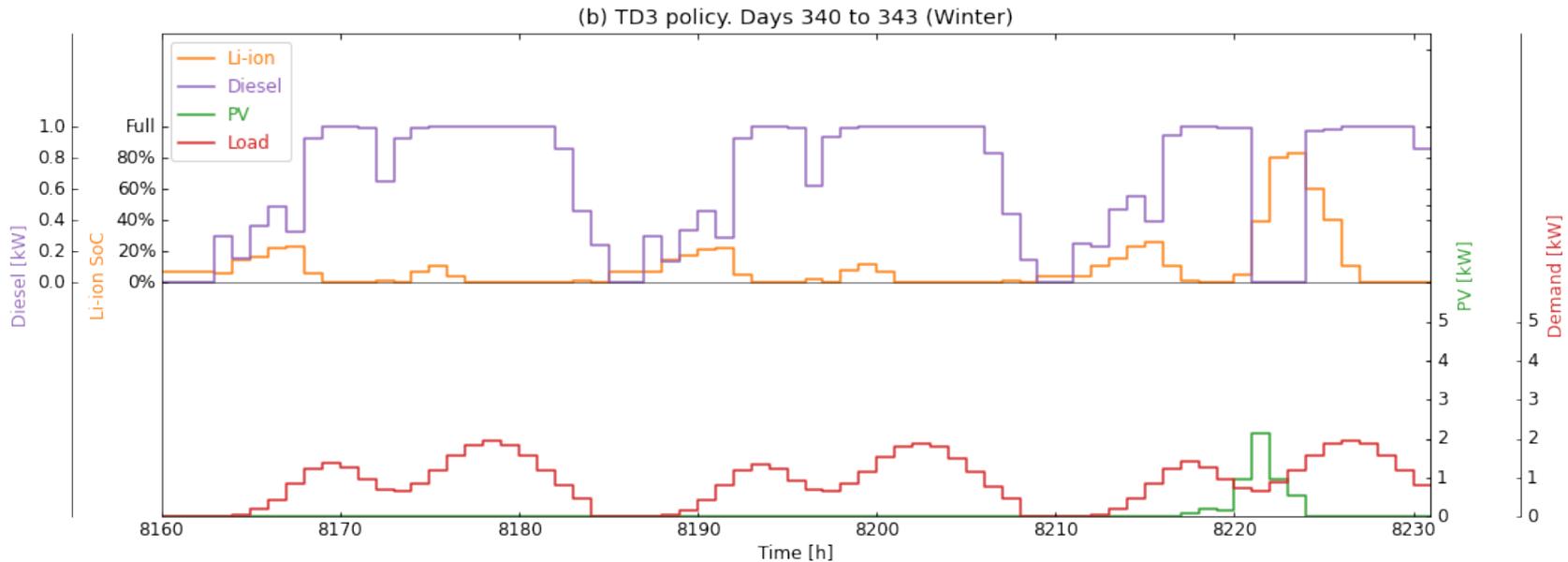
Comunidad
de Madrid

Aprendizaje Profundo por Refuerzo



- **Después de haber aprendido con un año y corregido con otro**
- Actividad en unos días de **verano** con la red entrenada
- **La batería** aprovecha para cargarse en las horas de sol
- **El diésel** genera cuando no hay **sol (PV)** para completar la energía suministrada de **la batería**

Aprendizaje Profundo por Refuerzo



- Actividad en unos días de **invierno** con la red entrenada
- **La batería** aprovecha para cargarse en las pocas horas de sol
- **El diésel** genera, mucho tiempo, cuando no hay **sol (PV)** para completar la energía suministrada de **la batería**

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



Comunidad
de Madrid

Aprendizaje Profundo por Refuerzo

Problem type	1st year	2nd year	3rd year
MIQP	-1310.1247	-1128.5731	-1205.1731

Tag	1st (GAP%)	2nd (GAP%)	3rd year (GAP %)
DQN (discrete out)	-1629.32 (24.4%)	-1428.51 (26.6%)	-1535.90 (27.4%)
TD3 (cont. out)	-1561.68 (19.2%)	-1363.80 (20.8%)	-1452.21 (20.5%)
DQN 24h prediction	-1492.50 (7.24%)	-1307.50 (8.22%)	-1391.40 (7.83%)
TD3 24h prediction	-1399.63 (6.53%)	-1211.92 (7.09%)	-1288.72 (6.90%)

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



Aprendizaje Profundo por Refuerzo

RESUMEN:

- Un algoritmo que gestiona una red y aprende de los errores
- No se necesita un modelo preciso
- El entrenamiento del algoritmo es importante, pero hay que evitar que sobre-aprenda sobre un conjunto limitado de escenarios
- Se ha probado en un sistema sencillo y pequeño y hay que avanzar a sistemas más realistas

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro




**Comunidad
de Madrid**



MODELADO Y CONTROL EN MICRORREDES

- Análisis modal
- Reducción de modelos
- Control multi-agente

Nota: las redes de prueba en esta presentación se han derivado de: A. Bidram, V. Nasirian, A. Davoudi, and F. L. Lewis, Cooperative synchronization in distributed microgrid control. Cham, Switzerland: Springer, 2017.

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro




**Comunidad
de Madrid**

Análisis Modal Aplicado a Microrredes

Elementos en el modelado de microrredes:

- Generación “electrónica”
- Generación/control distribuida(o)
- Estabilidad, coordinación, interferencias
- Reducción de modelos
- Desequilibrios

ANÁLISIS MODAL (fundamentos)

Park, $\mathbf{X}_{dq} = \mathbf{P}(\theta)\mathbf{X}_{abc}$

$$\frac{d\mathbf{X}_{dq}}{dt} = f(\mathbf{X}_{dq}, \mathbf{U}_{dq})$$

$$\left. \frac{d\mathbf{X}_{dq}}{dt} \right|_{\mathbf{X}_{dq,0}, \mathbf{U}_{dq,0}} = 0$$

$$\frac{d\mathbf{X}_{dq}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{X}_{dq} + \mathbf{B}\mathbf{U}_{dq}$$

$$\mathbf{Y}_{dq} = g(\mathbf{X}_{dq}, \mathbf{U}_{dq})$$

$$\mathbf{Y}_{dq,0} = g(\mathbf{X}_{dq,0}, \mathbf{U}_{dq,0})$$

$$\mathbf{Y}_{dq} = \mathbf{C}\mathbf{X}_{dq} + \mathbf{D}\mathbf{U}_{dq}$$

Sistema eléctrico (dq)
No lineal

Punto Equilibrio

Sistema eléctrico (dq)
Lineal

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro




**Comunidad
de Madrid**

Análisis Modal Aplicado a Microrredes

Modos del sistema Matriz de participaciones Sensibilidad de un modo frente a cambios en q

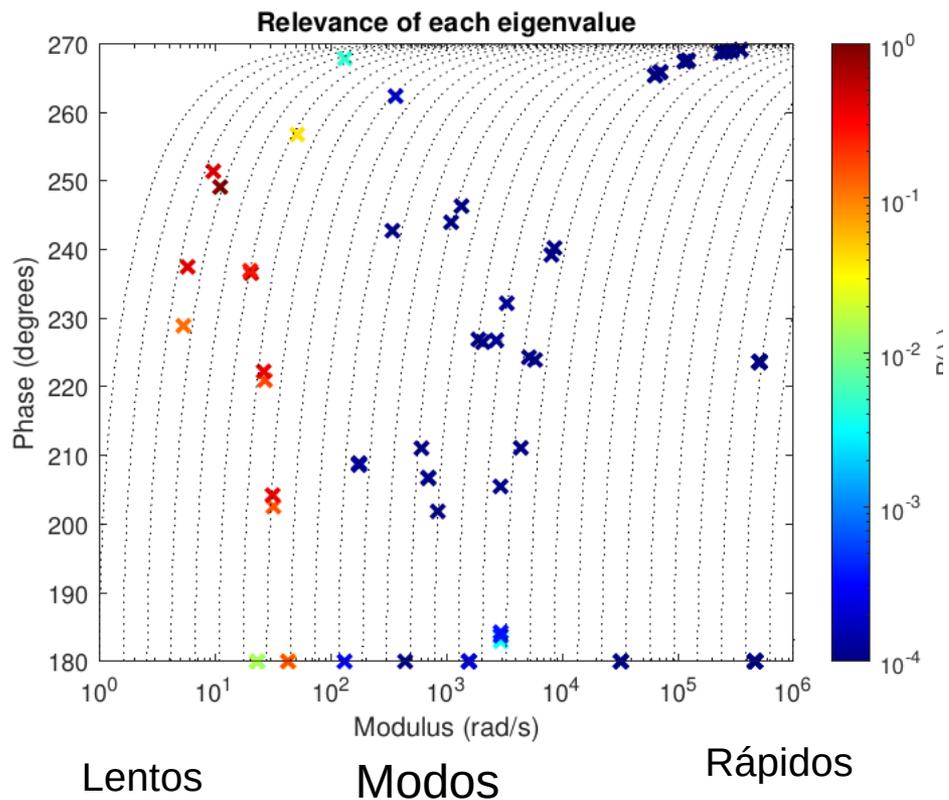
p_{ij} : Participación modo (j) en variable (i)

$$\mathbf{A}^c \Rightarrow \text{eig}(\mathbf{A}^c) \rightarrow \lambda_i$$
$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} p_{11} & p_{12} & \cdots & p_{1n} \\ p_{21} & p_{22} & \cdots & p_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ p_{n1} & p_{n2} & \cdots & p_{nn} \end{bmatrix}$$
$$\frac{\partial \lambda_i}{\partial q} = \mathbf{w}_i^T \frac{\partial \mathbf{A}^c}{\partial q} \mathbf{v}_i$$

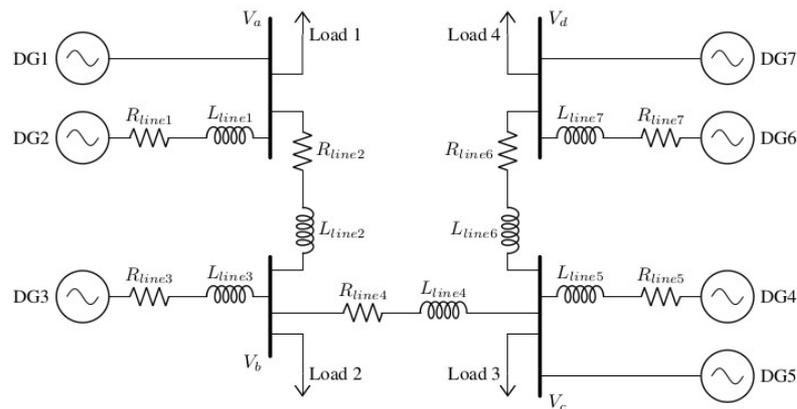
λ_i $\left\{ \begin{array}{l} \mathbf{v}_i : \text{Vector propio por la derecha} \\ \mathbf{w}_i : \text{Vector propio por la izquierda} \end{array} \right.$

- Los modos del sistema permiten discutir la estabilidad de pequeña perturbación y entender las dinámicas presentes.
- Las participaciones nos ayudan a descubrir interacciones y acoplamientos.
- Las sensibilidades nos ayudan a diseñar reguladores (a menudo suplementarios) para corregir modos peligrosos.

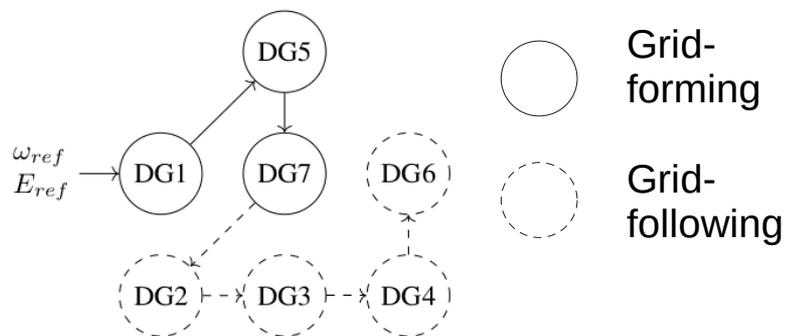
Análisis Modal Aplicado a Microrredes: explorando los modos del sistema



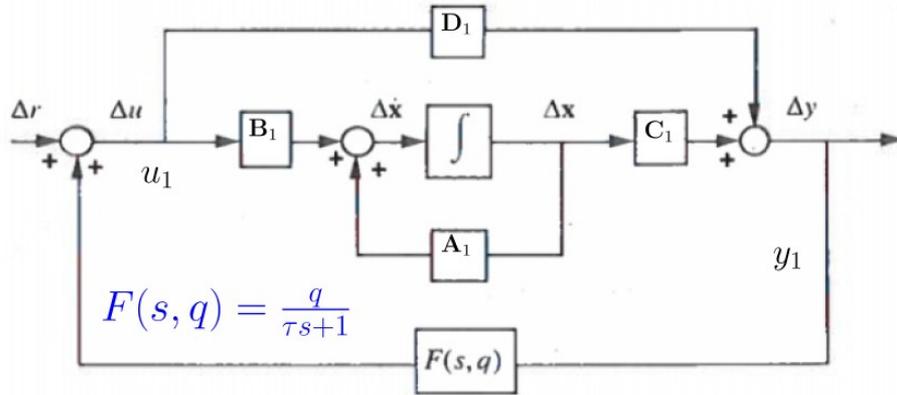
..... Misma cte de tiempo



Sistema



Análisis Modal Aplicado a Microrredes: Ejemplo del uso de las sensibilidades de los modos



$$\frac{d\mathbf{X}_1}{dt} = \mathbf{A}_1\mathbf{X}_1 + \mathbf{B}_1u_1$$

$$y_1 = \mathbf{C}_1\mathbf{X}_1 + \mathbf{D}_1u_1$$

Sistema

$$\frac{d\mathbf{X}_2}{dt} = \mathbf{A}_2\mathbf{X}_2 + \mathbf{B}_2y_1$$

$$y_2 = \mathbf{C}_2\mathbf{X}_2 + \mathbf{D}_2y_1$$

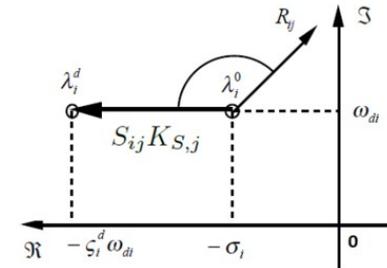
con $u_1 = \Delta r + y_2$

Regulador

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\mathbf{X}^c}{dt} &= \mathbf{A}^c\mathbf{X}^c + \mathbf{B}^c\Delta\mathbf{r} \\ \mathbf{y}_1 &= \mathbf{C}^c\mathbf{X}^c + \mathbf{D}^c\Delta\mathbf{r} \end{aligned} \right\} \rightarrow \frac{\partial\lambda_i}{\partial q} = \mathbf{w}_i^T \frac{\partial\mathbf{A}^c}{\partial q} \mathbf{v}_i$$

Sensibilidad de un modo

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial\lambda_i}{\partial q} &= \mathbf{w}_{i,1}^T \mathbf{B}_1 \left. \frac{\partial F(s)}{\partial q} \right|_{s=\lambda_i} \mathbf{C}_1 \mathbf{v}_{i,1} = \\ &= \mathbf{w}_i^T \mathbf{B}^c \left. \frac{\partial F(s)}{\partial q} \right|_{s=\lambda_i} \mathbf{C}^c \mathbf{v}_i \\ &(\mathbf{D}_1 = 0) \end{aligned} \right\}$$



PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



Comunidad
de Madrid

Análisis Modal Aplicado a Microrredes: Reducción de modelos

Reducción de modelos:

$$\frac{d\mathbf{X}}{dt} = \mathbf{A}\mathbf{X} \text{ con } \mathbf{X} = \begin{bmatrix} \mathbf{x}_r \\ \mathbf{x}_{lr} \end{bmatrix} \text{ y } \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_r \\ \mathbf{x}_{lr} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_{11}^{r \times r} & \mathbf{A}_{12}^{r \times m} \\ \mathbf{A}_{21}^{m \times r} & \mathbf{A}_{22}^{m \times m} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{x}_r \\ \mathbf{x}_{lr} \end{bmatrix}$$

Algunas alternativas ad-hoc

(1*) $\frac{d\mathbf{x}_{lr}}{dt} = 0$ Las dinámicas rápidas, ecuaciones algebraicas

(2*) $\frac{d^2\mathbf{x}_{lr}}{dt^2} = 0$

(3) $\frac{d\mathbf{x}_r}{dt} = (\mathbf{A}_{11} + \mathbf{M})\mathbf{x}_r, \lambda_r \in \{\text{eig}(\mathbf{A}_{11} + \mathbf{M})\}$ El modelo reducido tiene los “modos relevantes” λ_r

(*) Y. Ojo, J. Watson and I. Lestas. "A review of reduced-order models for microgrids: simplifications vs accuracy" arXiv:2003.04923v1 [math.OC] 10 Mar 2020. pp 1-13.

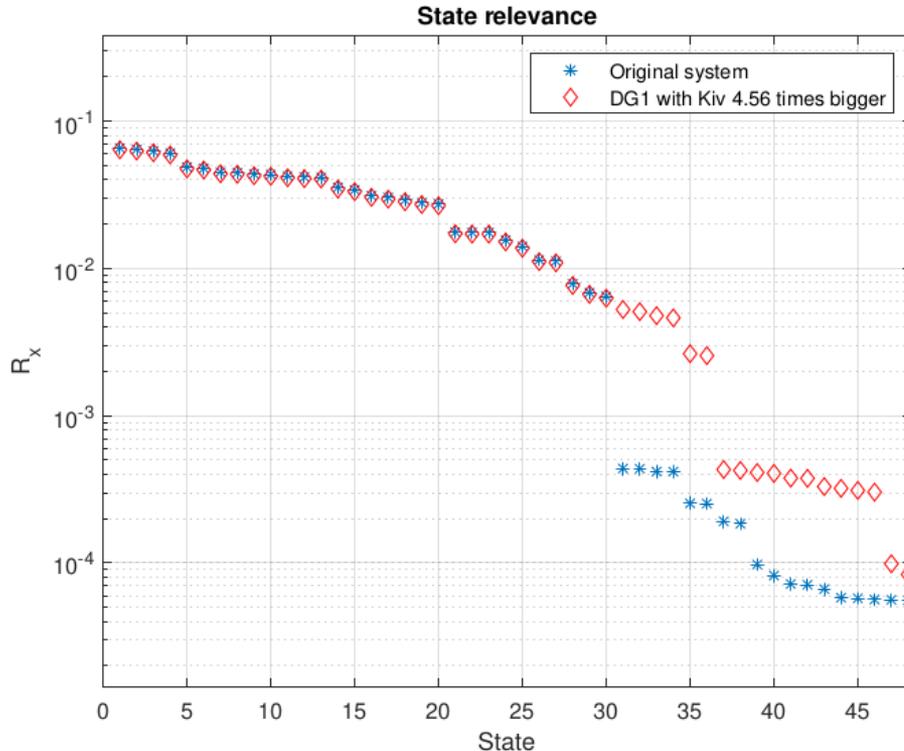


Análisis Modal Aplicado a Microrredes: Propuesta para la reducción de modelos

- Se estudian los estados con más energía en la salida: “Hankel Singular Values” destacan esos estados en un sistema equilibrado (“balanced”).
- Se relacionan esos estados con los modos del sistema que tienen más participación en ellos.
- Se estudia en que estados del sistema original, tienen más participación esos modos.
- Se puede calcular un número para cuantificar la “relevancia de cada uno de los estados del sistema original”
- Así es más fácil determinar el conjunto de estados y los modos relevantes que determinan el orden del sistema.
- El sistema de orden reducido debe reproducir las dinámicas de interés.



Análisis Modal Aplicado a Microrredes: Reducción de modelos y relevancia de los estados



- Representamos la “relevancia” de los estados de una microrred para dos reguladores distintos en uno de los VSC
- Un salto brusco en ese valor, sugiere qué variables de estado pueden omitirse.
- No todas las líneas podrían despreciarse en el estudio de la dinámica del sistema.
- No todos los controles nivel0 de los convertidores pueden despreciarse en el estudio de la dinámica del sistema.

- En el caso más desfavorable, los controles de nivel 0 y el filtro de salida del convertidor VSC1, deben modelarse en detalle

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



Comunidad
de Madrid

Análisis Modal Aplicado a Microrredes: Sistemas desequilibrados

ANÁLISIS MODAL (de fundamentos)

Park, $\mathbf{X}_{dq} = \mathbf{P}(\theta)\mathbf{X}_{abc}$

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{X}_{dq}}{dt} &= f(\mathbf{X}_{dq}, \mathbf{U}_{dq}) \\ \mathbf{Y}_{dq} &= g(\mathbf{X}_{dq}, \mathbf{U}_{dq}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \left. \frac{d\mathbf{X}_{dq}}{dt} \right|_{\mathbf{X}_{dq,0}, \mathbf{U}_{dq,0}} &= 0 \\ \mathbf{Y}_{dq,0} &= g(\mathbf{X}_{dq,0}, \mathbf{U}_{dq,0}) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{d\mathbf{X}_{dq}}{dt} &= \mathbf{A}\mathbf{X}_{dq} + \mathbf{B}\mathbf{U}_{dq} \\ \mathbf{Y}_{dq} &= \mathbf{C}\mathbf{X}_{dq} + \mathbf{D}\mathbf{U}_{dq} \end{aligned}$$

Sistema eléctrico (dq)
No lineal

Punto Equilibrio

Sistema eléctrico (dq)
Lineal

SISTEMAS DESEQUILIBRADOS (un elemento): ¡Park no es suficiente!

$$\begin{bmatrix} \mathbf{x}_{dqo}^+ \\ \mathbf{x}_{dqo}^- \end{bmatrix} = \hat{\mathbf{T}}(t) \cdot \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{abc}(t) \\ \mathbf{x}_{abc}(t - \tau) \end{bmatrix}; \quad \mathbf{x}_{dqo}^+ \in \mathbf{R}_{3 \times 1} \text{ and } \mathbf{x}_{dqo}^- \in \mathbf{R}_{3 \times 1}$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{dqo}^+ \\ \mathbf{x}_{dqo}^- \end{bmatrix} = 0 \text{ Régimen Permanente, } \mathbf{X} \text{ ctes}$$

REDUCCIÓN DE MODELOS



PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



Comunidad
de Madrid

Análisis Modal Aplicado a Microrredes: Sistemas desequilibrados

Resumen:

- Los modos del sistema nos hablan de las dinámicas presentes
- Las participaciones nos explican qué influye dónde
- Las sensibilidades nos ayudan a diseñar controles
- La relevancia nos permite proponer reducción de modelos de forma sistemática

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro

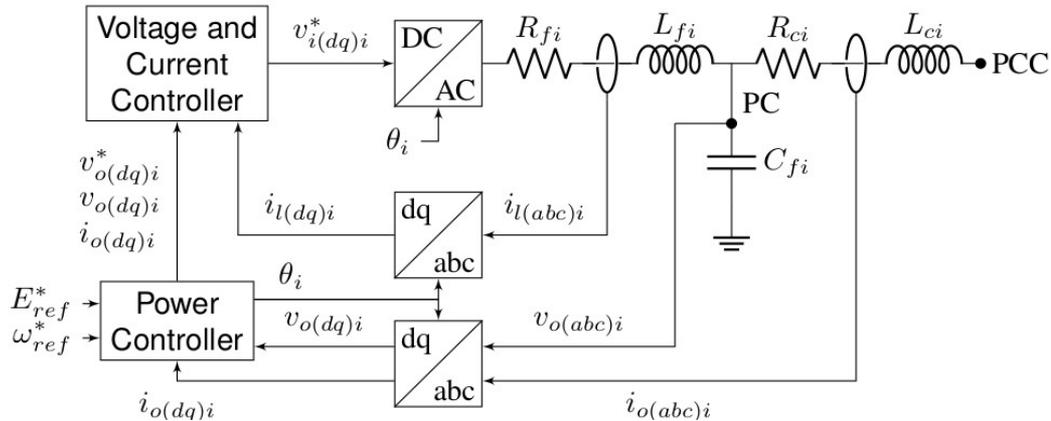


UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro

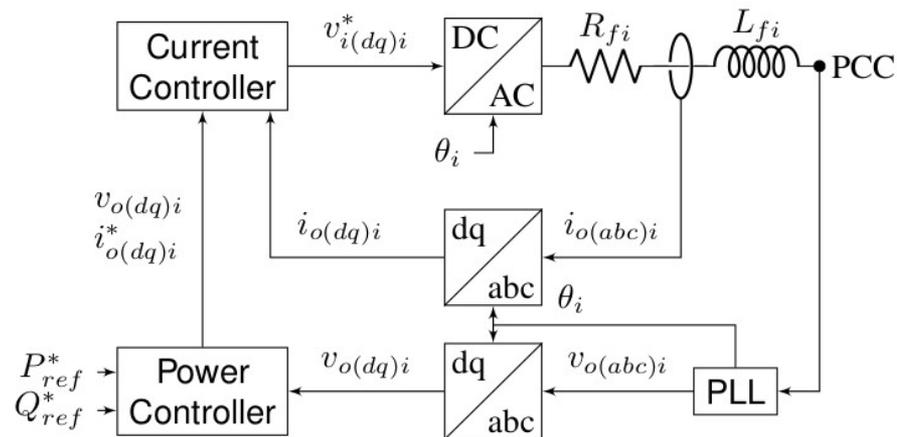



**Comunidad
de Madrid**

Control Multi-agente en Microrredes: Elementos generadores



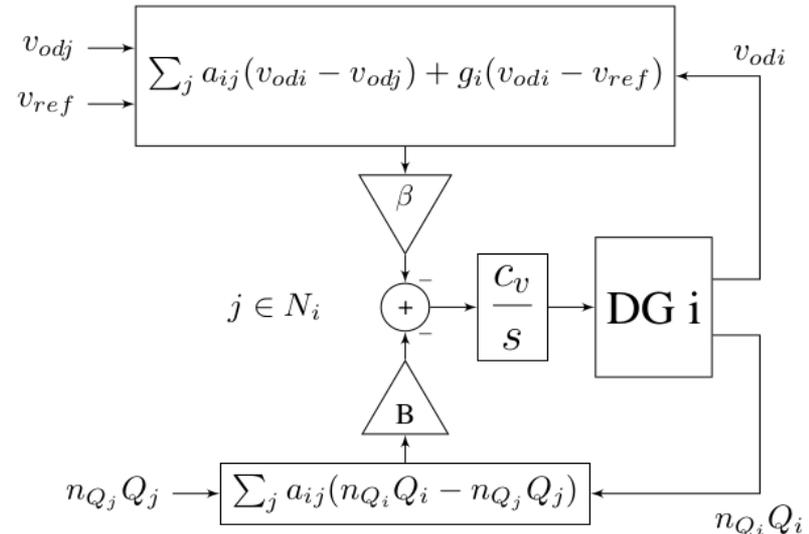
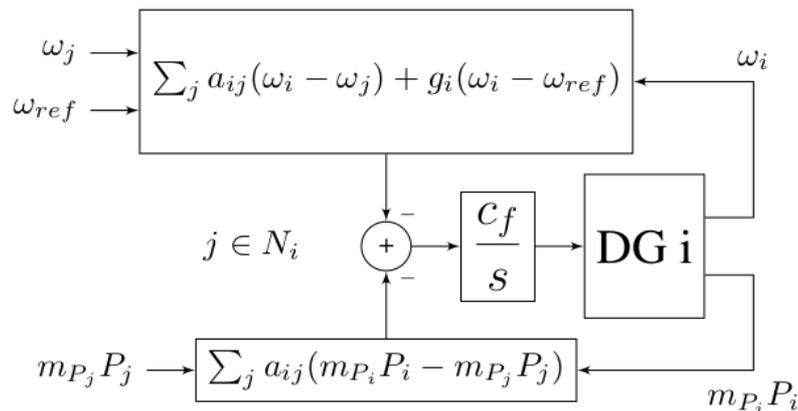
VCVSC: Grid-forming



CCVSC: Grid-following

Figuras de: A. Bidram, A. Davoudi and F.L. Lewis. "A multiobjective distributed control framework for islanded AC microgrids." IEEE Trans. On Industrial Informatics. Vol. 10, no. 3. pp 1785-1798. 2014

Control Multi-agente en Microrredes: Consenso en frecuencia y reparto de potencias



- Si todos VCVSC, se alcanza el consenso en frecuencia y en el reparto de potencia activa, sin compromiso.
- Hay que alcanzar un compromiso entre el consenso para seguir la referencia de tensiones o para el reparto de reactiva.

Figuras de: E. A. A. Coelho, D. Wu, J. M. Guerrero, J. C. Vasquez, T. Dragičević, Č. Stefanović, and P. Popovski, "Small-Signal Analysis of the Microgrid Secondary Control Considering a Communication Time Delay," IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 63, no. 10, pp. 6257–6269, 2016 y A. Bidram, F. L. Lewis, and A. Davoudi, "Distributed Control Systems for Small-Scale Power Networks," IEEE Control systems Magazine, vol. 34, no. 6, pp. 56–77, 2014.

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro

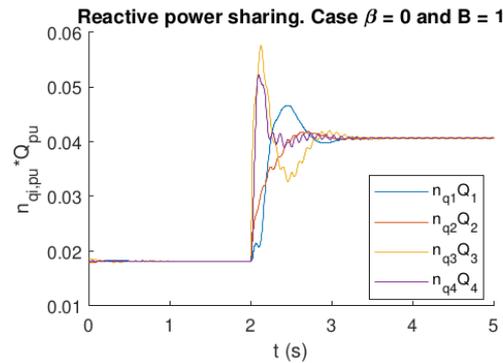
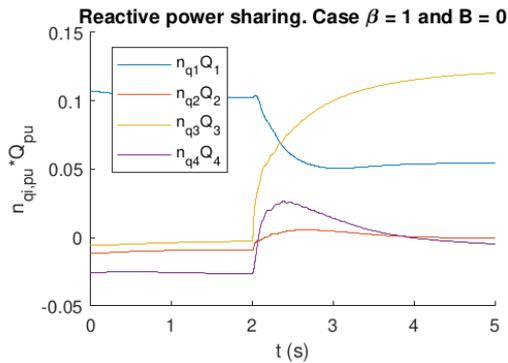


UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro

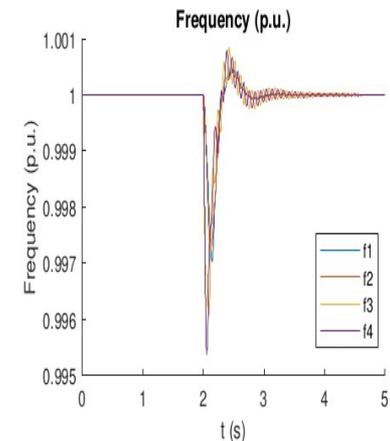
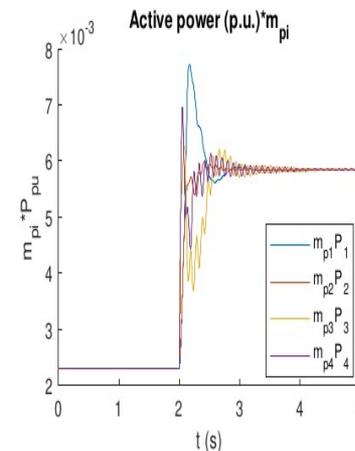
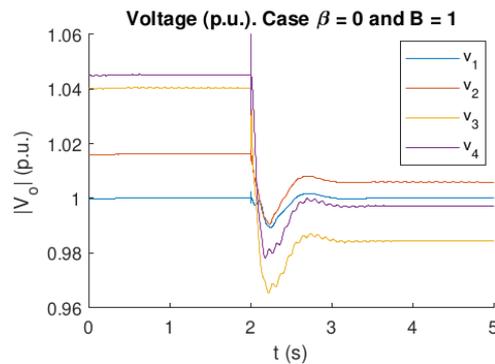
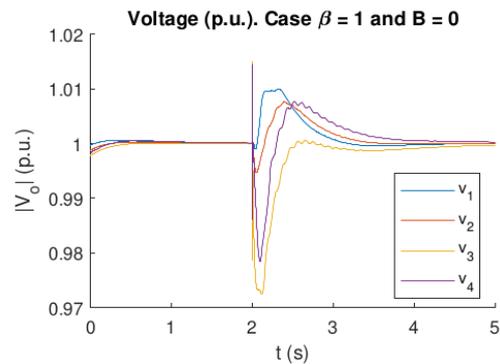
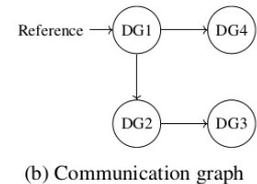
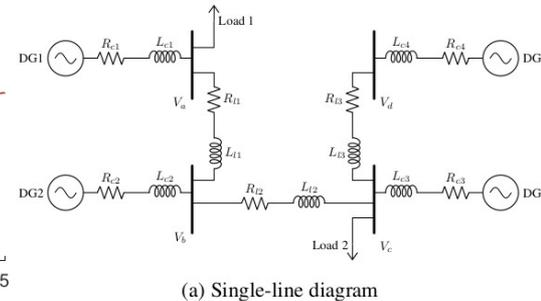


**Comunidad
de Madrid**

Control Multi-agente en Microrredes: Consenso en frecuencia y reparto de potencias



Todos grid-forming



Seguindo ref. V

Consenso en reparto de Q

Consenso en reparto de P y frecuencia

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro

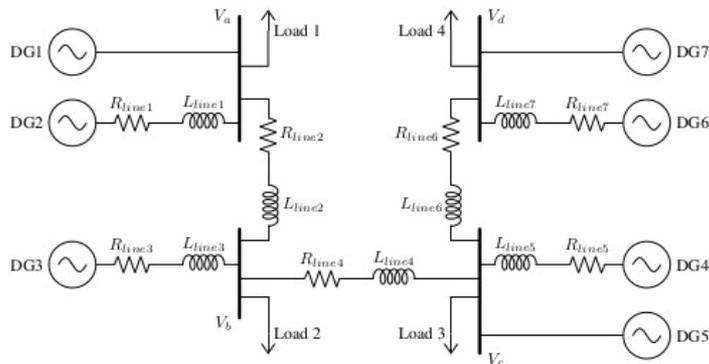


UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro

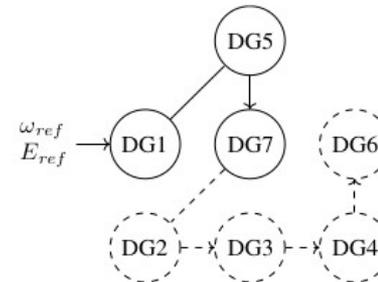


Comunidad
de Madrid

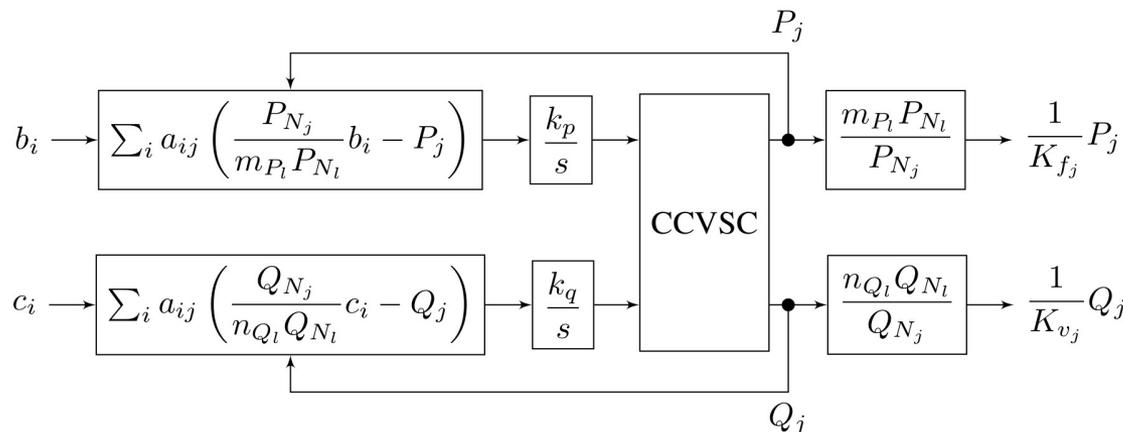
Control Multi-agente en Microrredes: Consenso en frecuencia y reparto de potencias



(a) Single-line diagram



(b) Communication graph



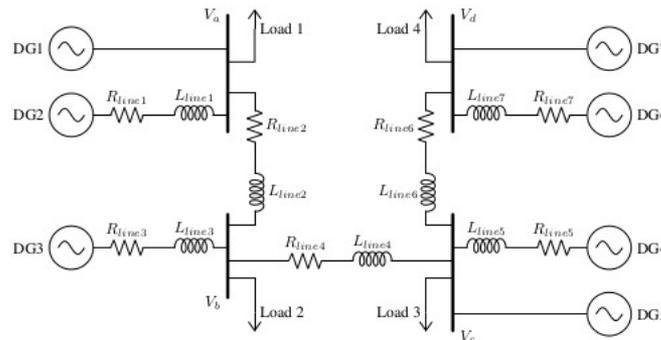
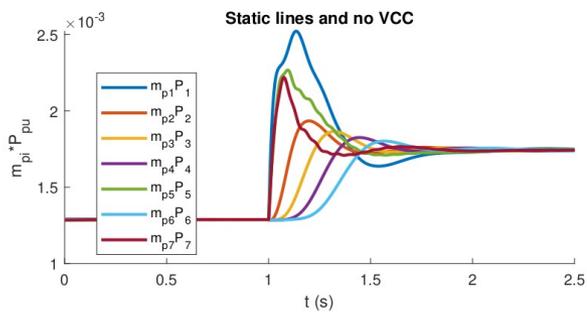
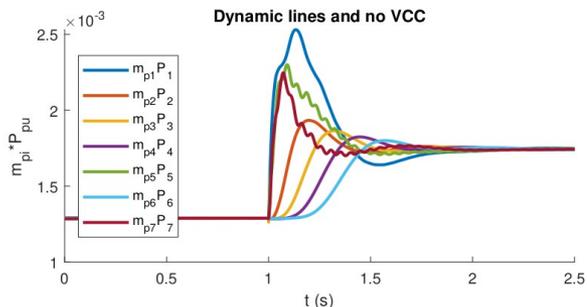
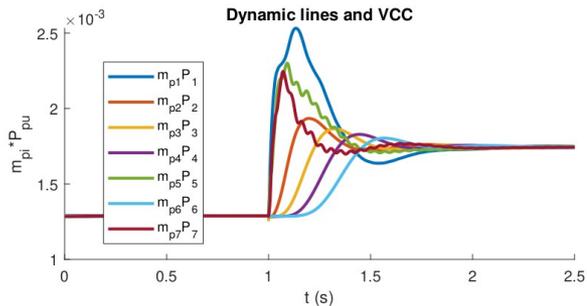
$$b_i = m_{P_i} P_i \text{ and } c_i = n_{Q_i} Q_i \text{ if } i \text{ is VCVSC}$$

$$b_i = P_i / K_{f_i} \text{ and } c_i = Q_i / K_{v_i} \text{ if } i \text{ is CCVSC}$$

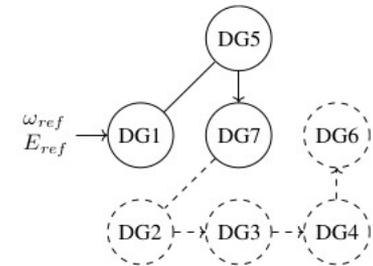
l : one VCVSC

El consenso en P y Q en CCVSC

Control Multi-agente en Microrredes: Consenso en frecuencia y reparto de potencias



(a) Single-line diagram



(b) Communication graph

Ejemplo de resultados: Consenso en P

Control Multi-agente en Microrredes: Consenso en frecuencia y reparto de potencias

Resumen:

- Es posible controlar la frecuencia en una microrred haciendo uso del consenso, sin comunicaciones centralizadas (*)
- También es posible repartir P cuando se produce un cambio inesperado en las condiciones de carga o generación (**)
- Y se puede repartir la Q (**) o mantener el valor de las tensiones (*)
- Hay que estudiar, en profundidad, el efecto del retardo en las comunicaciones

(*) En VCVSC

(**) En VCVSC y CCVSC

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro




**Comunidad
de Madrid**

¡Gracias por su atención!

Área de modelado de sistemas de energía:

<https://www.iit.comillas.edu/area-investigacion/sadse>

Área de redes inteligentes y sostenibles:

<https://www.iit.comillas.edu/area-investigacion/redes>

Área de modelado, análisis y control:

<https://www.iit.comillas.edu/area-investigacion/mac>

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro




**Comunidad
de Madrid**