

GRUPO GEA-IIT INSTITUTO DE INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA

UNIVERSIDAD PONTIFICIA COMILLAS
(Aurelio García Cerrada)

Reunión: Abril 2023

Web: geiser.depeca.uah.es/promint

EN ESTE DOCUMENTO: Resultados IIT Comillas

Aspectos del trabajo realizado:

- Ob1. Diseño, simulación y **evaluación** de la capa de comunicaciones para sistemas **energéticos distribuidos**
- Ob2. **Modelado, control** y gestión de energía en **redes inteligentes híbridas CC/CA**
- Ob3. **Recuperación energética en redes de transporte ferroviario** y su integración en microrredes urbanas.

Con participaciones derivadas de lo anterior en,

- Ob4. **Diseño** e implementación de un **sistema de gestión de energía para sistemas híbridos de generación renovable y almacenamiento en baterías**.
- Ob5. **Aprendizaje máquina** a microrredes, vehículo eléctrico y **gestión energética**
- Ob6. **Difusión y explotación de resultados**

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**

INTRODUCCIÓN IIT y el modelado y control de microrredes inteligentes híbridas (Ob1 y Ob2)

Resumen del trabajo realizado

- **Control coordinado de sistemas HVDC multiterminal:** (a) Estrategias suplementarias para la mejora de la estabilidad transitoria y de pequeña perturbación en redes híbridas de CA/CC, (b) Efecto de la latencia de las comunicaciones entre estaciones convertidoras.
- **Modelado de microrredes:** (a) Herramienta para la simulación y análisis de microrredes, (b) **análisis modal**, (c) **búsqueda de dinámicas relevantes**, (d) reducción de modelos y (e) modelado y análisis de **redes desequilibradas**
- **Control basado en agentes** (distribuido) en microrredes inteligentes: consenso en la frecuencia y en el reparto de potencias (P y Q); sincronización y arranque “*en negro*”.

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

INTRODUCCIÓN IIT y el modelado y control de microrredes inteligentes híbridas (Ob1 y Ob2)

- **Sistemas para la gestión de la energía: “Aprendizaje profundo por refuerzo”** (Deep Reinforcement Learnig) 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]

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro

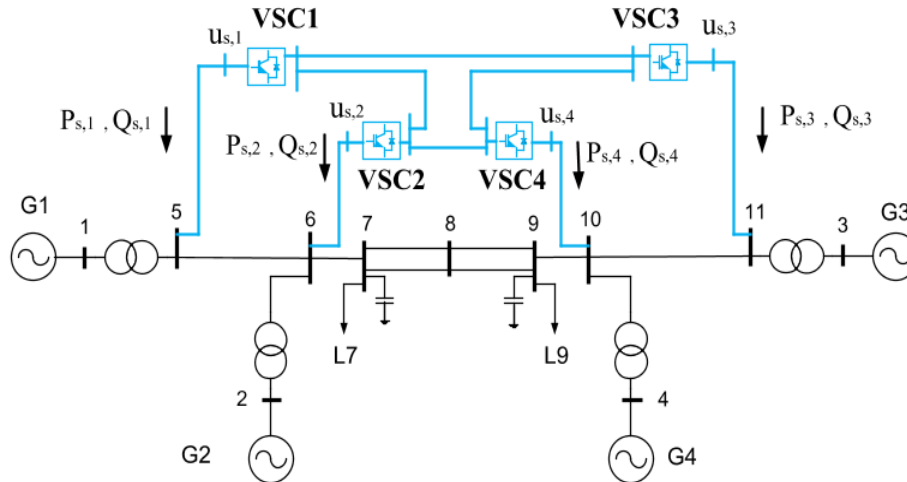


UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro




Comunidad
de Madrid

Control coordinado de sistemas HVDC multiterminal



- Hemos estudiado la mejora de la estabilidad transitoria en sistemas híbridos CC/CA como el de la figura coordinando el control de las estaciones
- Hay muchas ventajas en el uso de medidas globales, para lo que se necesitan sistemas de comunicación
- Estabilidad transitoria vs estabilidad de pequeña perturbación (ángulo y frecuencia)

Control coordinado de sistemas HVDC multiterminal

PUBLICACIONES

- J. Renedo, L. Rouco, A. García-Cerrada, L. Sigrist. "A communication-free reactive-power control strategy in VSC-HVDC multi-terminal systems to improve transient stability." *Electric Power Systems Research*. vol. 174, no. 105854, pp. 1-13, Septiembre 2019. [Online: Mayo 2019]
- A.A. Ibrahim, B. Kazemtabrizi, J. Renedo, "Security-constrained day-ahead operational planning for flexible hybrid ac/dc distribution networks," *Applied Sciences*. vol. 9, no. 21, pp. 4685-1-4685-20, 2019
- J. Renedo, A.A. Ibrahim, B. Kazemtabrizi, A. García-Cerrada, L. Rouco, Q. Zhao, J. García-González. "A simplified algorithm to solve optimal power flows in hybrid VSC-based AC/DC systems." *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, vol. 110, pp 781-94, 2019. (de PRICAM)
- J. Renedo, A. García-Cerrada, L. Rouco, L. Sigrist. "Coordinated control in VSC-HVDC Multi-terminal systems to improve transient stability: the impact of communication latency." *Energies*. vol. 12, no. 19, pp. 3638-1-3638-32, Octubre 2019. [Online: Septiembre 2019]. (Special Issue HVDC/FACTS for Grid Services in Electric Power Systems)
- J. Renedo, L. Rouco, L. Sigrist, A. García-Cerrada, "Impact of AC-line-emulation controllers of VSC-HVDC links on inter-area-oscillation damping," 45th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society - IECON 2019, Lisboa (Portugal). 14-17 Octubre 2019. En: IECON 2019: Conference proceedings, ISBN: 978-1-7281-4879-3
- L. Díez Maroto, J. Renedo, L. Rouco, F. Fernández-Bernal. "Wide area controllers for excitation boosters for transient stability improvement." *Electric Power Systems Research*. Vol. 189, pp. 106622-1 - 106622-6, Diciembre 2020. [Online: Agosto 2020]

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 coordinado de sistemas HVDC multiterminal

PUBLICACIONES (CONT.)

- R. Ávila-Martínez, L. Rouco, J. García Aguilar, J. Renedo, L. Sigrist, “Impact of PLL control on small-signal stability of wind DFIGs.” Proc. IEEE/PES General Meeting,” Montreal, Canada, 03-06 August 2020, pp. 1-5.
- J. Renedo, L. Sigrist, L. Rouco, A. García-Cerrada, “Impact on power system transient stability of AC-line-emulation controllers of VSC-HVDC links,” *14th IEEE PowerTech Conference - PowerTech 2021*, Madrid (Spain) Online. 27 Junio - 02 Julio 2021. En: *2021 IEEE Madrid PowerTech: Conference proceedings*, ISBN: 978-1-6654-1173-8
- J. Renedo, A. García-Cerrada, L. Rouco, L. Sigrist. “Coordinated design of supplementary controllers in VSC-HVDC multi-terminal systems to damp electromechanical oscillations.” *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 36, nº. 1, pp. 712 - 721, Enero 2021. [Online: Junio 2020]
- Q. Zhang, J.D. McCalley, V. Ajarapu, J. Renedo, M.A. Elizondo, A. Tbaileh, N. Mohan. “Primary frequency support through North American continental HVDC interconnections with VSC-MTDC systems.” *IEEE Transactions on Power Systems*. Vol. 36, nº. 1, pp. 806 - 817, Enero 2021. [Online: Agosto 2020]
- R. Ávila-Martínez, J. Renedo, L. Rouco, A. García-Cerrada, L. Sigrist, T. Qoria, X. Guillaud. “Fast voltage boosters to improve transient stability of power systems with 100% of grid-forming VSC-based generation.” *IEEE Transactions on Energy Conversion*. Vol. 37, nº. 4, pp. 2777 - 2789, Diciembre 2022. [Online: Agosto 2022]

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 ob2

- Modelos para herramientas aplicables a microrredes inteligentes
- GUI para la simulación y preparar el resto de los análisis.
- Análisis modal
- Reducción de modelos conservando las variables físicas relevantes
- Control multi-agente: consenso en frecuencia, reparto de potencias, perfil de tensiones, sincronización y arranque “en negro”

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

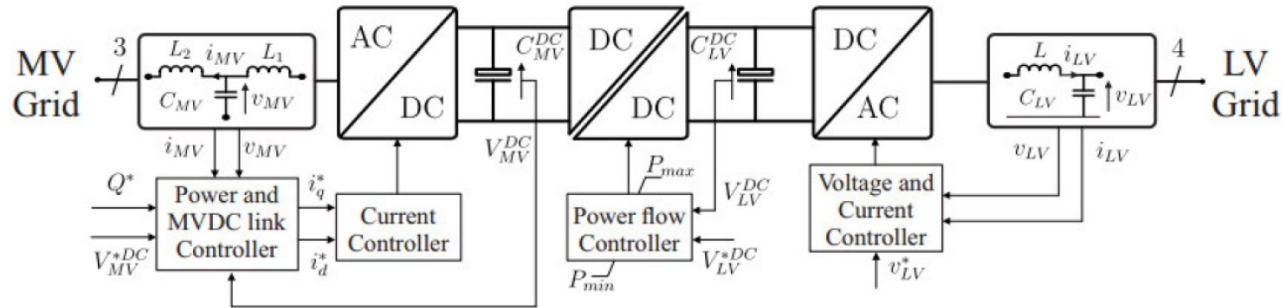


UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



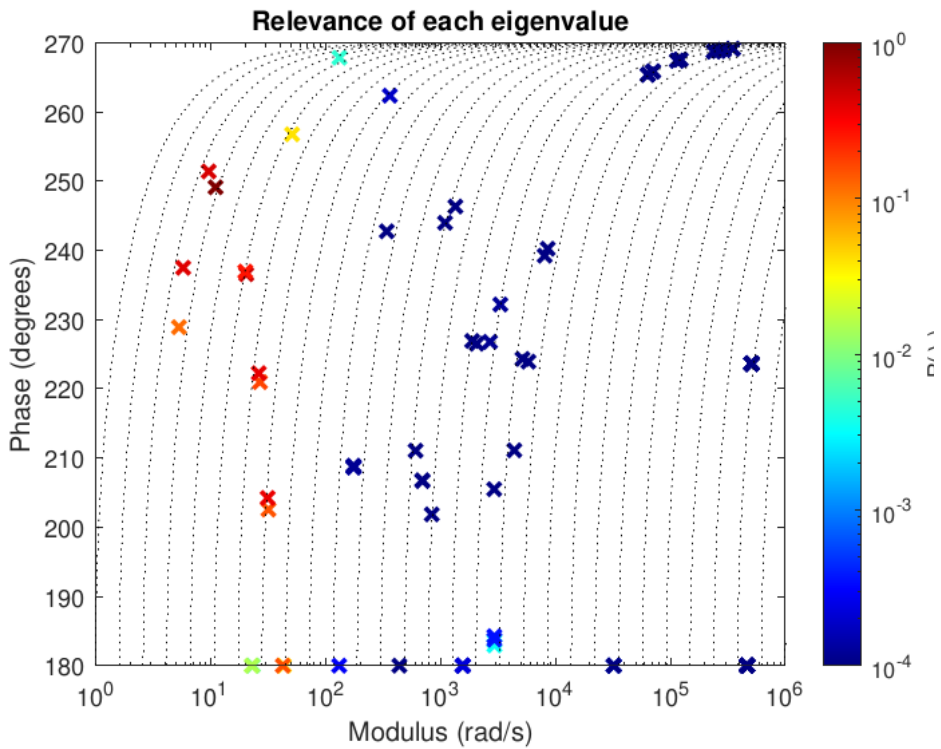

**Comunidad
de Madrid**

MODELADO Y CONTROL EN MICRORREDES



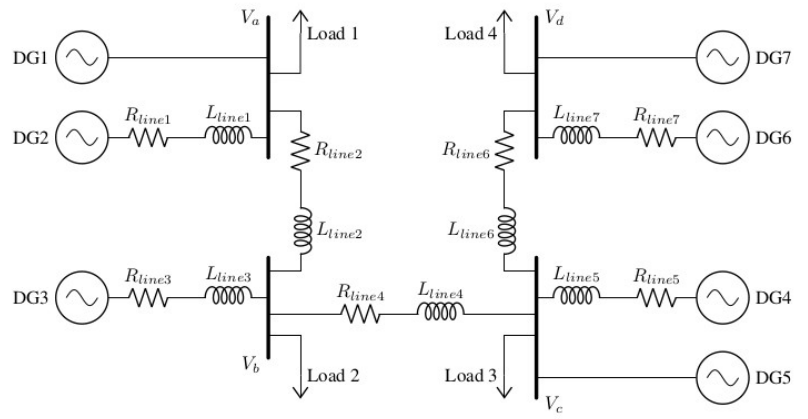
- Jorge López Rodríguez-Roselló. “Simulación detallada de un transformador electrónico.” Trabajo Fin de Máster, Máster Universitario en Ingeniería Industrial. ICAI-E.T.S de Ingeniería; Universidad Pontificia Comillas. Madrid. Julio de 2019.
- Manuel Florez Montes. “Simulación detallada de la etapa intermedia de un transformador electrónico.” Trabajo Fin de Grado, Grado en Ingeniería en Tecnologías Industriales. ICAI-E.T.S de Ingeniería; Universidad Pontificia Comillas. Madrid. Julio de 2019

Análisis Modal Aplicado a Microrredes: explorando los modos del sistema

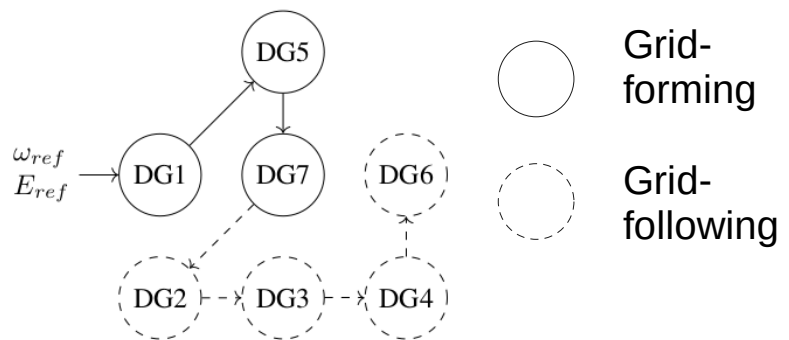


Lentos Modos Rápidos

..... Misma cte de tiempo



Sistema



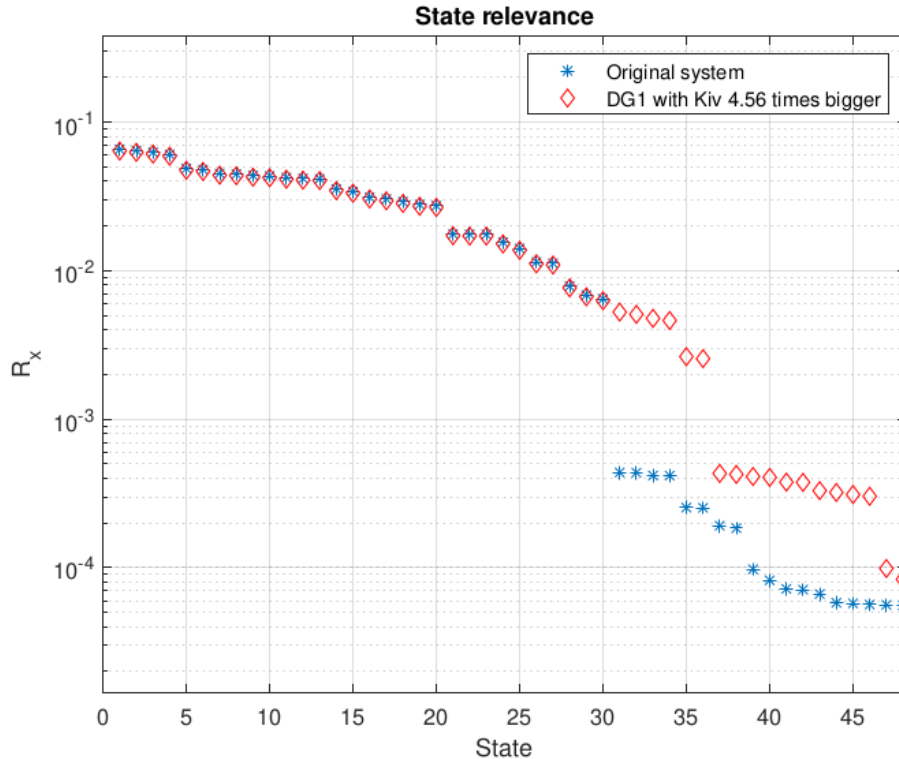
Grafo para la red considerada en ejemplo

Análisis Modal Aplicado a Microrredes: Hemos propuesto el “coeficiente de relevancia de los estados”

- 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.
- Andrés Tomás-Martín, Aurelio García-Cerrada, Lukas Sigrist, Sauro Yagüe, Jorge Suárez-Porras “State relevance and modal analysis in electrical microgrids with high penetration of electronic generation.” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. Vol. 147, May 2023, pp. 108876-1-108876-13 (en abierto)



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 (I)

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!

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

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

REDUCCIÓN DE MODELOS

\mathbf{X} cte incluso en sistemas desequilibrados

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



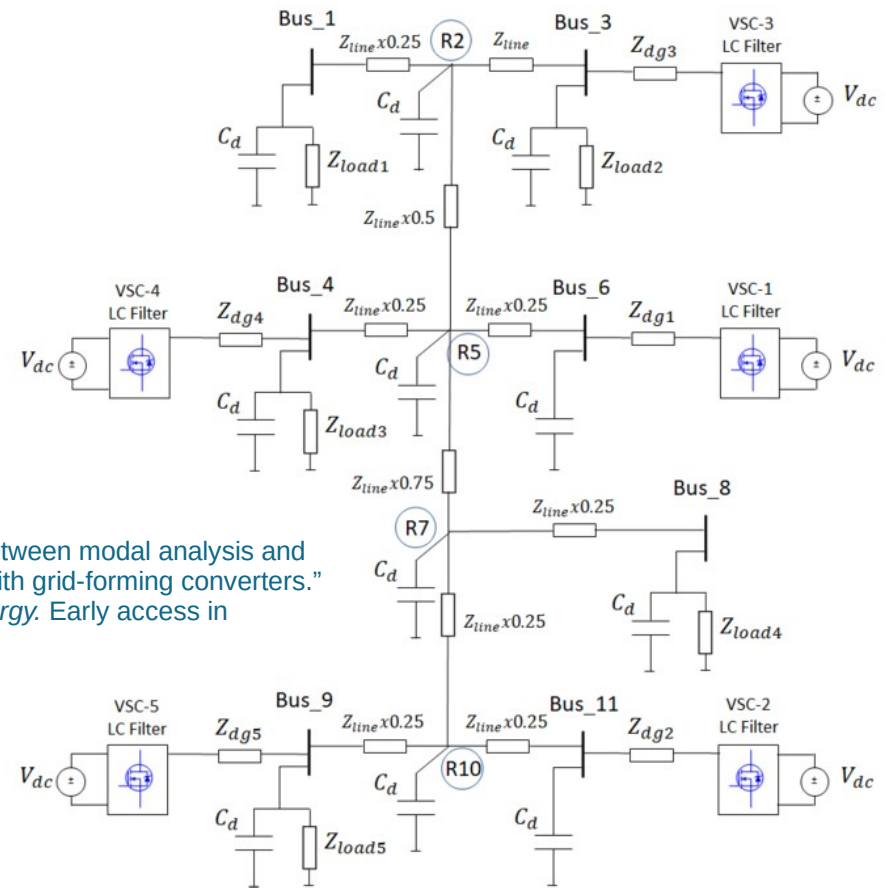
UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



Comunidad
de Madrid

Análisis Modal Aplicado a Microrredes: Sistemas desequilibrados (III)

- El análisis modal produce exactamente el mismo resultado que el popular criterio de las impedancias (mismo principio, realmente)
- El análisis modal produce resultados más ricos, pero necesita modelos más complejos.
- Sauro J. Yague, Aurelio García-Cerrada Pere Palacin Farré. "Comparison between modal analysis and impedance-based methods for analysing stability of unbalanced microgrids with grid-forming converters." Accepted for publication in *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*. Early access in IEEEXplore. 2023 (en abierto) doi: 10.35833/MPCE.2022.000669



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 y concentrarnos en las dinámicas “importantes”.
- Se puede abordar el análisis de sistemas equilibrados y desequilibrados

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro

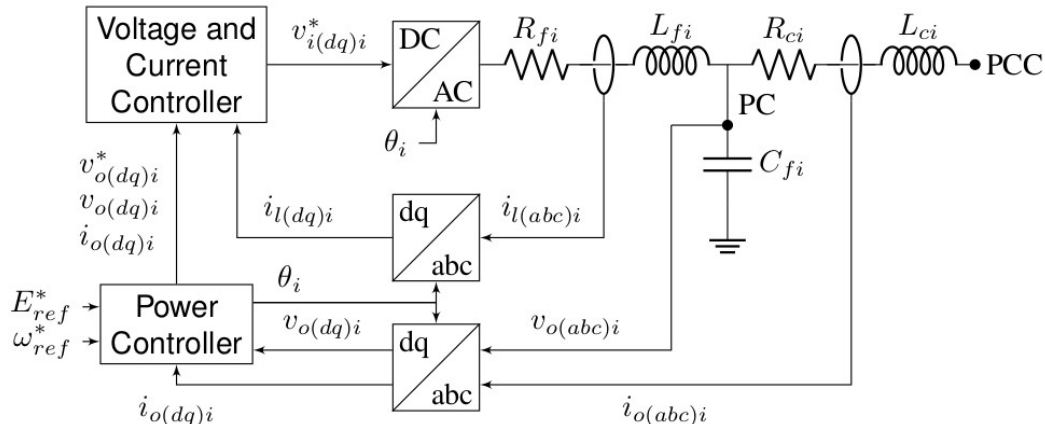


UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro

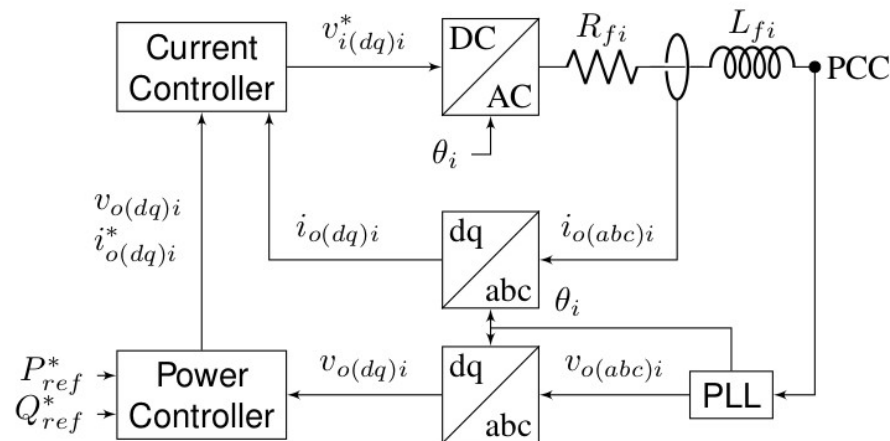



**Comunidad
de Madrid**

Control Multi-agente en Microrredes: Elementos generadores



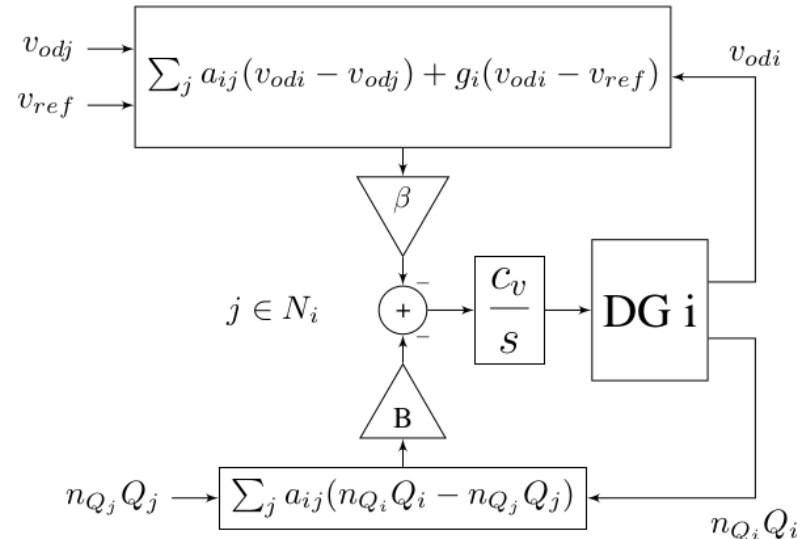
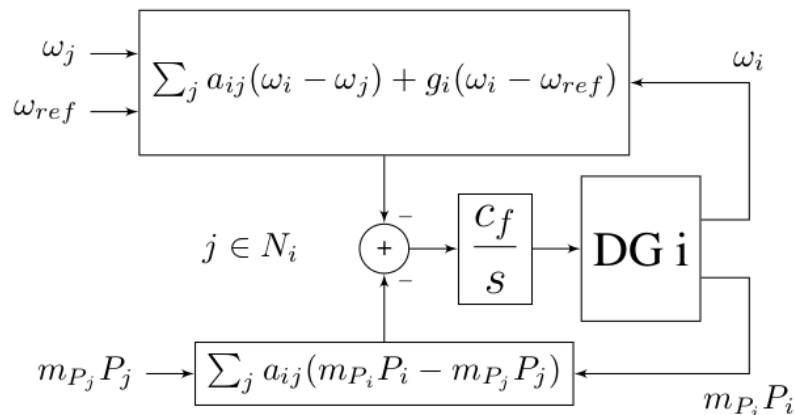
VCVSC: Grid-forming



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

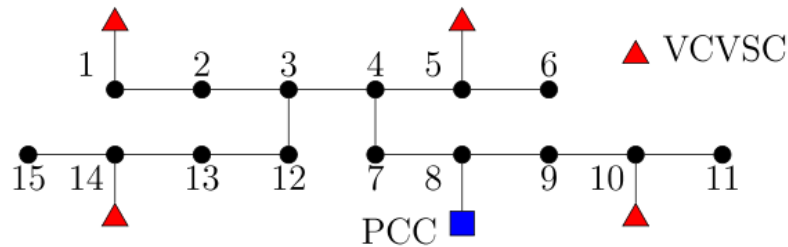
Control Multi-agente en Microrredes: Consenso en frecuencia y reparto de potencias



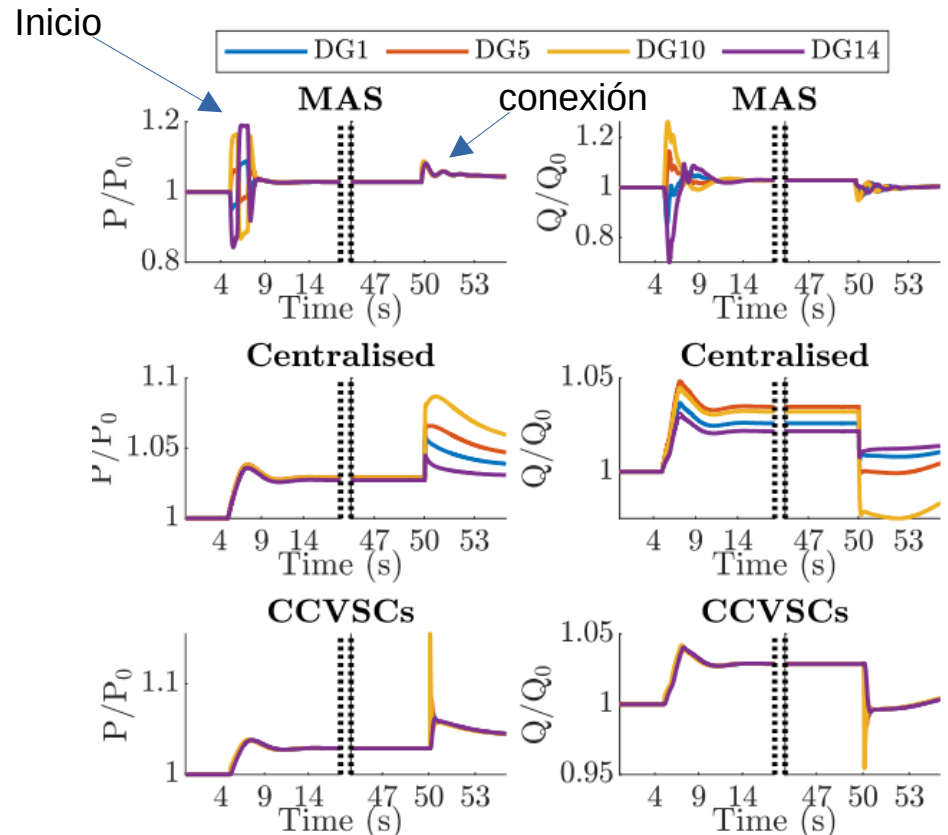
- Si todos VCVSC, se alcanza el consenso en frecuencia y en el reparto de potencia activa, sin compromiso.
- Hay que alcanzar un compromiso entre el consenso para seguir la referencia de tensiones o para el reparto de reactiva.

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.

Control Multi-agente en Microrredes: Sincronización de una microrred



- Inicialmente, G1 es el líder
- Una vez la microrred de la figura está a 50Hz, se sincroniza con la red principal en PCC
- En este proceso “PCC” pasa a ser el líder
- En el momento de conexión: misma tensión, misma frecuencia y mismo ángulo.
- Resultados experimentales en el lab. de IMDEA Energía



- En 8s se alcanzan las condiciones y en 50s (aprox) se cierra el interruptor

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro



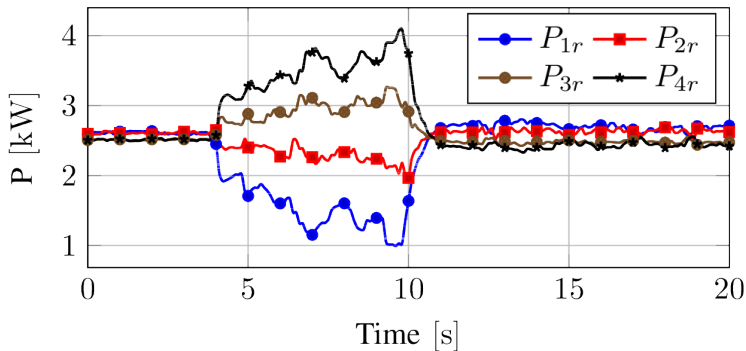
UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro



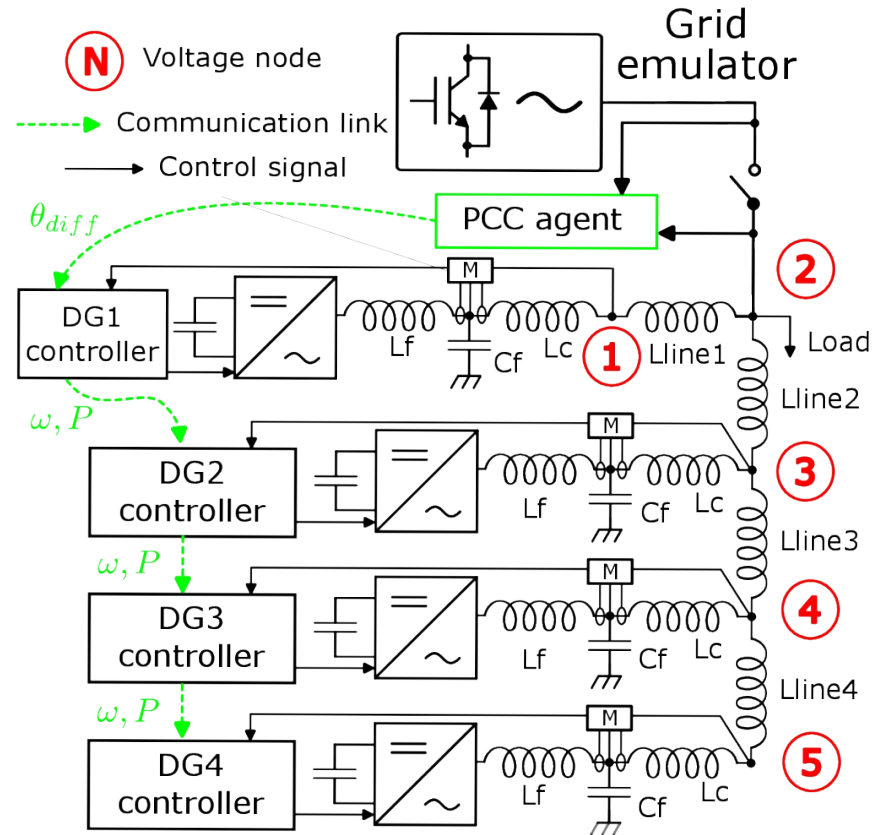
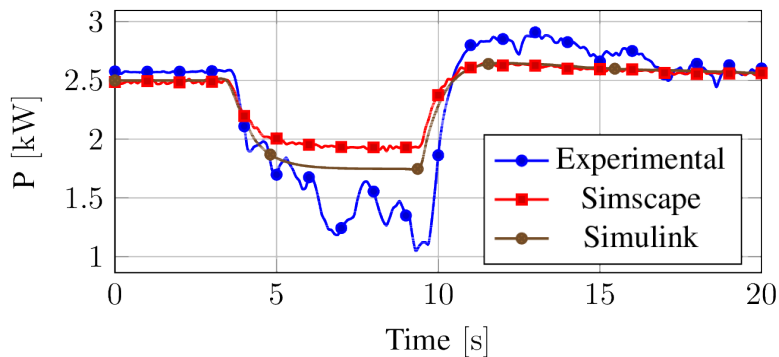
Comunidad
de Madrid

Control Multi-agente en Microrredes: Sincronización de una microrred en el laboratorio de IMDEA

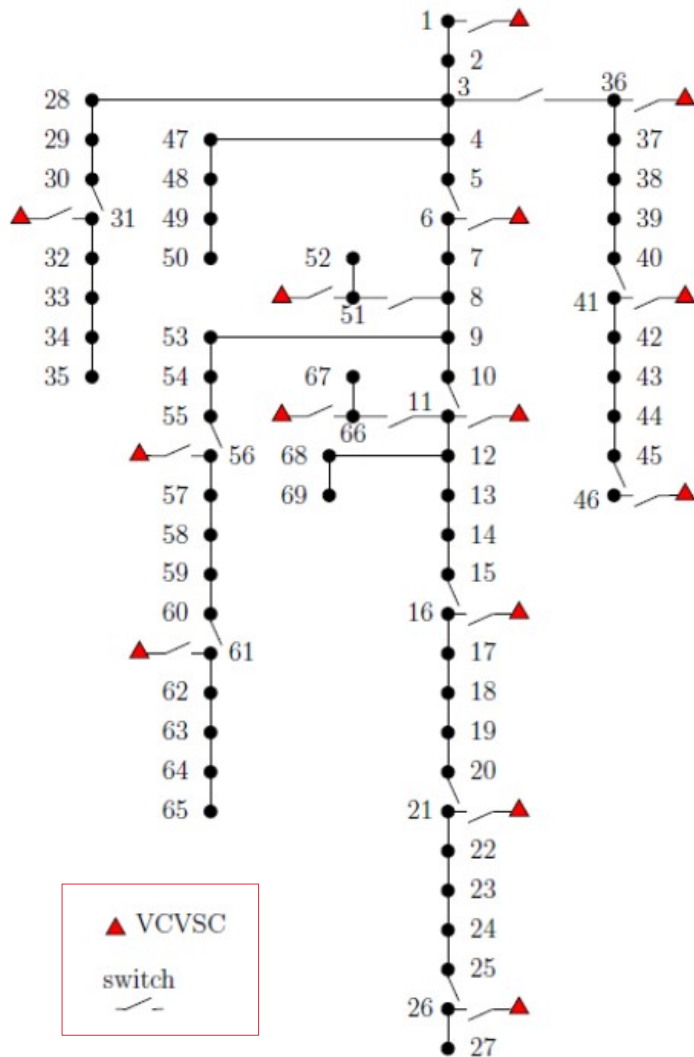
Received active power



Active power of inverter 1 comparison



Control Multi-agente en Microrredes: Sincronización de una microrred (cont.)



- Red de 69 nudos, de distribución (CIGRE)
- Arranque “en negro” de forma centralizada, con una secuencia predeterminada
- Arranque “en negro” por agentes, con un “grafo” predeterminado y una secuencia predeterminada

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

Resumen:

- Es posible controlar la frecuencia en una microrred haciendo uso del consenso, sin comunicaciones centralizadas: Cada “agente” solo tiene información parcial de lo que hacen los otros. (*)
- 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 (*)
- Se puede llegar a la sincronización, también con un control basado en agentes
- El tema del “arranque en negro” surge de forma natural después de haber solucionado el punto anterior, pero se prefiere una secuencia centralizada.
- La herramienta presentada anteriormente, permite hacer el análisis modal de este tipo de sistemas, incluyendo el efecto de la latencia de las comunicaciones
(*) En VCVSC
(**) En VCVSC y CCVSC



Aprendizaje Profundo por Refuerzo: Aplicación a microrredes inteligentes (Ob4 y Ob5)

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

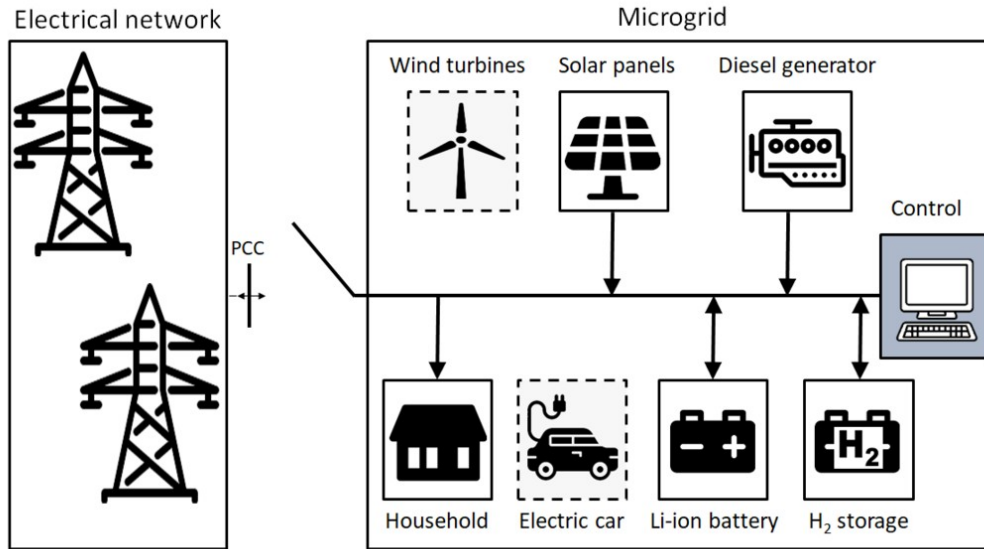
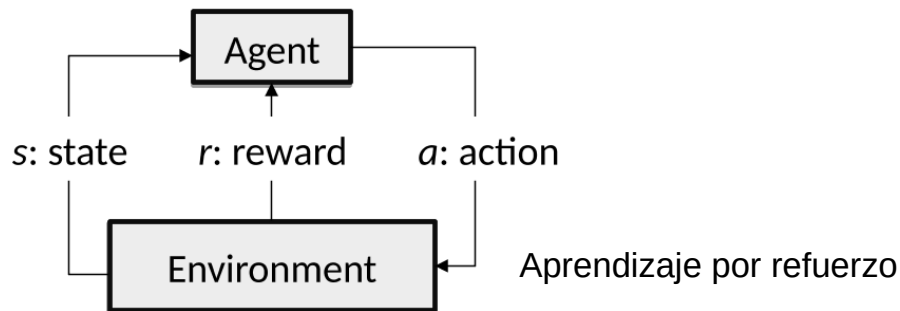
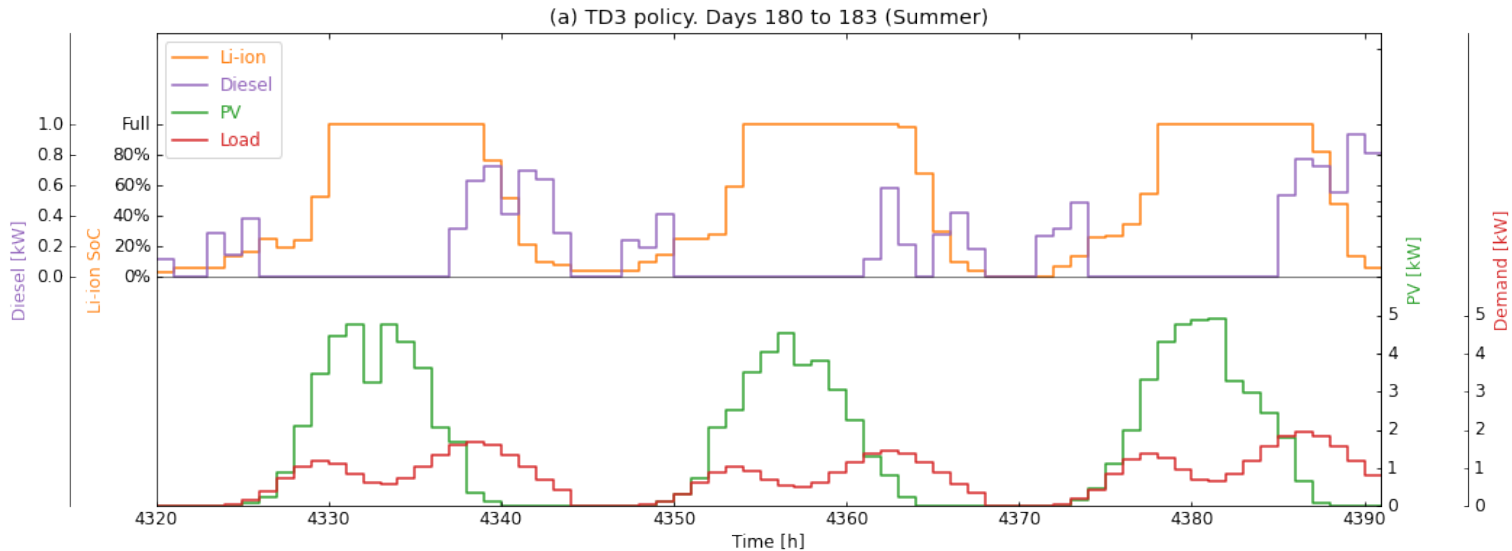


Figure 1. Schematic example of a microgrid.



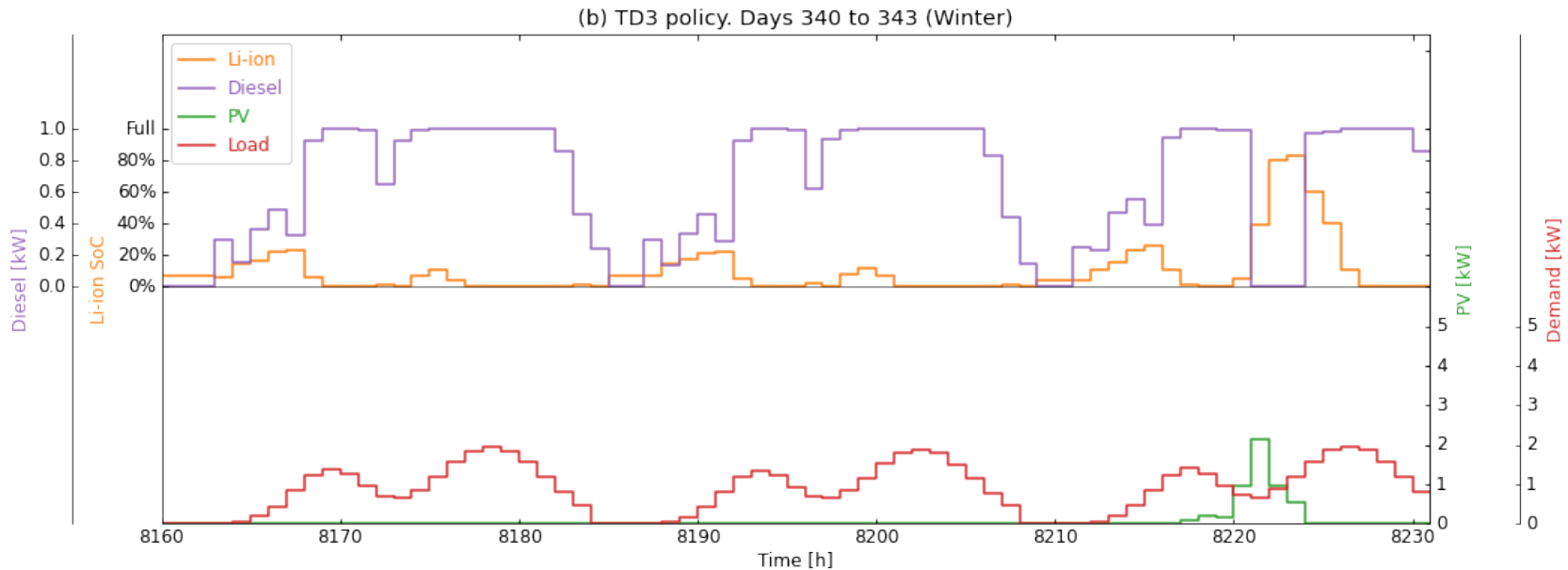
- Se tienen datos históricos, para renovables.
- **Alternativas:**
- “Aprender la estrategia óptima” vs “Algoritmos convencionales con *info completa*”

Aprendizaje Profundo por Refuerzo



- **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

Table 3. Accumulated cost of each algorithm [€].

Cost [€]	Year 1	Year 2	Year 3	Total	Relative $(X - BEST)/BEST \cdot 100$
MIQP (GAP 6%)	967.34	864.05	846.04	2677.43	0.00%
RL k = 3	1305.94	1126.49	1239.35	3671.77	37.14%
RL k = 6	1355.80	1140.92	1248.61	3745.33	39.89%
RL k = 9	1299.56	1123.53	1230.50	3653.59	36.46%
RL k = 12	1389.60	1198.63	1308.11	3896.33	45.52%
RL k = 15	1348.61	1174.02	1268.02	3790.64	41.58%
RL k = 18	1503.69	1307.67	1443.58	4254.94	58.92%
RL k = 21	1634.33	1441.21	1551.68	4627.22	72.82%
RL k = 24	1515.46	1320.44	1439.12	4275.02	59.67%
Naive	3778.74	3681.04	3678.82	11,138.60	316.02%
Random	4816.64	4554.78	4695.17	14,066.59	425.38%

→ Mejor posible

Ventana de k instantes para evaluar el estado de la red

→ Carga cuando hay exceso,
Descarga si no hay

→ Peor posible

Aprendizaje Profundo por Refuerzo

PUBLICACIONES

- D. Domínguez-Barbero, J. García-González, M.A. Sanz-Bobi, E.F. Sánchez-Úbeda. “Optimising a microgrid system by deep reinforcement learning techniques.” *Energies*. Vol. 13, nº. 11, pp. 2830-1 - 2830-19, Junio 2020. [Online: Junio 2020]
- D. Domínguez-Barbero, J. García-González, M.A. Sanz-Bobi. “Twin-Delayed Deep Deterministic Policy Gradient Algorithm for the Energy Management of Microgrids.” IIT working paper

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

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 en una red de distribución típica de CIGRE
- En las últimas versiones se consigue mejor resultado si se modela la generación diésel de forma continua y no solo como encendido/apagado.

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**

Optimización de la infraestructura ferroviaria (metro) en IIT: recuperación de energía (Ob3)

OBJETIVO Y PROPIEDADES

- Colocación y dimensionamiento óptimos de estaciones reversibles y/o acumuladores en una red de metro
- Modelos detalladas de tráfico y de la infraestructura ferroviaria
- Flexibilidad para definir la topología del circuito
- Ayuda a la decisión para la instalación de la infraestructura (proyectos en una o varias etapas de desarrollo)
- En la actualidad este grupo está trabajando en “acoplamiento virtual entre trenes de larga distancia”

PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro

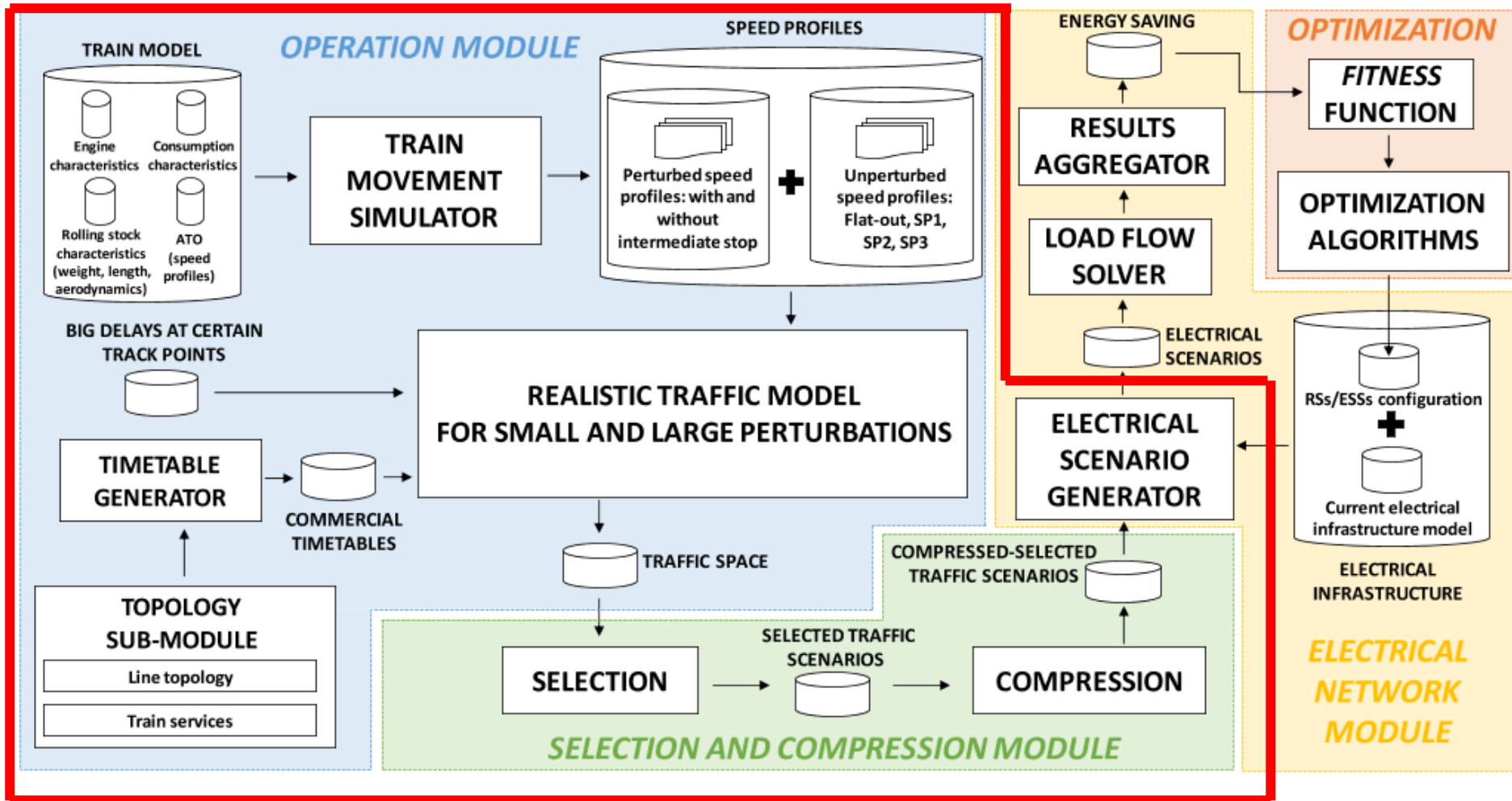


UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro




**Comunidad
de Madrid**

Optimización de la infraestructura ferroviaria (metro) en IIT: recuperación de energía



PROMINT-CM

PROgrama Microrredes INTeligentes Comunidad de Madrid

UNIÓN EUROPEA
Fondos Estructurales
Invertimos en tu futuro

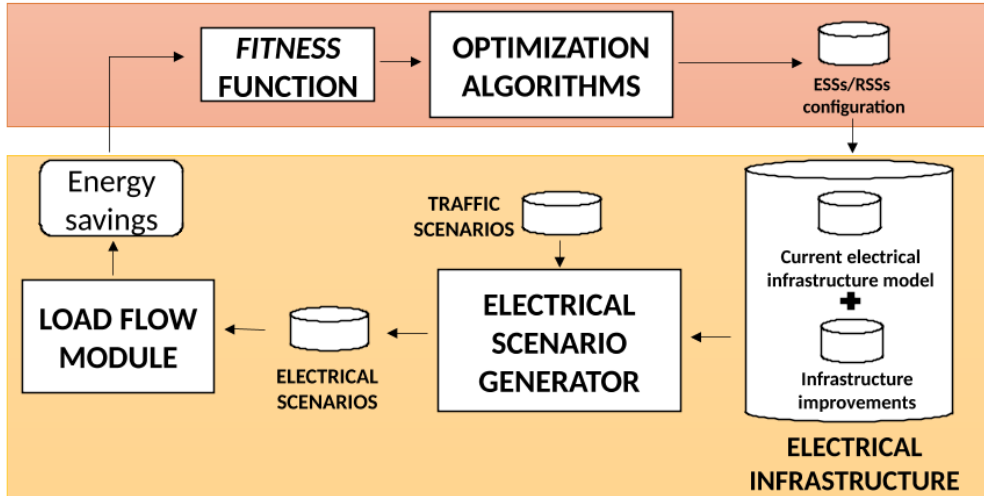


UNIÓN EUROPEA
Fondo Social Europeo
El FSE invierte en tu futuro

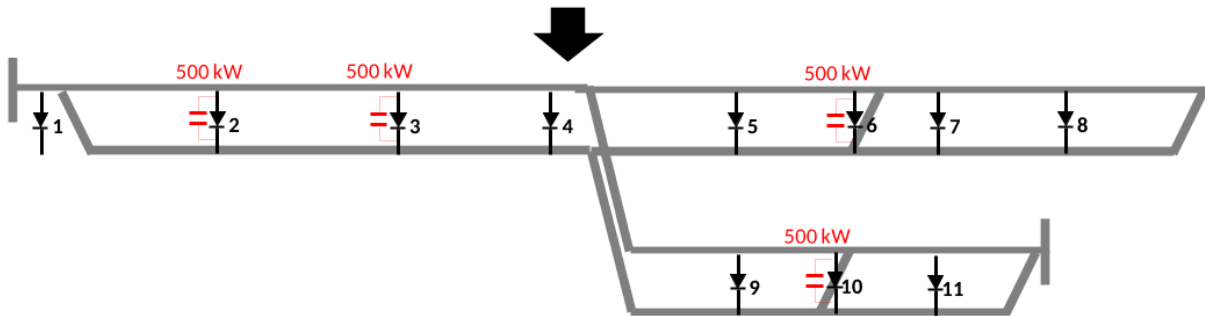


Comunidad
de Madrid

Optimización de la infraestructura ferroviaria (metro) en IIT: recuperación de energía



- Optimización inspirada en la naturaleza
- Simulador detallado
- Implementación sistemática de cualquier topología



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

Optimización de la infraestructura ferroviaria (metro) en IIT: recuperación de energía

PUBLICACIONES

- D. Roch Dupré, A.P. Cucala, R.R. Pecharromán, A.J. López López, A. Fernández-Cardador. “Simulationbased assessment of the installation of a reversible substation in a railway line, including a realistic model of large traffic perturbations.” *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*. vol. 115, no. 105476, pp. 1-15, Febrero 2020.
- David Roch. “Improving the electrical infrastructure of DC-electrified railway systems to increase energy efficiency, taking into account complex topologies and representative traffic scenarios.” Tesis doctoral (2020). Universidad Pontificia Comillas. Madrid.
- D. Roch Dupré, C. Camacho-Gómez, A.P. Cucala, S. Jiménez-Fernández, A.J. López López, A. Portilla-Figueras, R.R. Pecharromán, A. Fernández-Cardador, S. Salcedo-Sanz. “Optimal location and sizing of energy storage systems in DC-electrified railway lines using a coral reefs optimization algorithm with substrate layers. *Energies*.” Vol. 14, nº. 16, pp. 4753-1 - 4753-19, Agosto 2021. [Online: Agosto 2021]

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 investigación de sistemas ferroviarios:

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

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**