

COLMENA

Servicios de desarrollo de un prototipo de validación de la plataforma diseñada en el proyecto COLMENA

BARCELONA SUPERCOMPUTING CENTER (BSC)

Febrero 2024



ÍNDICE GENERAL

1. Introducción	3
2. Objetivos	4
3. Descripción del proyecto	7
3.1. Motivación	7
3.2. Requisitos de cálculo	7
3.3. Caso de estudio sobre redes eléctricas	9
4. Metodología	11
4.1. Modelado de la red	11
4.1.1. Entes	12
4.1.2. Canales de comunicación	13
4.2. Casos de estudio	14
4.2.1. Instalación/desinstalación de elementos	14
4.2.2. Contingencias	14
4.2.3. Otros	15
4.3. Indicadores locales	15
4.4. Indicadores clave (KPIs)	16
5. Plan de implementación	17
5.1. Actividad 1	17
5.1.1. Tarea 1.1 - Definición de elementos	18
5.1.2. Tarea 1.2 - Elección de roles	18
5.1.3. Tarea 1.3 - Selección de comunicaciones	18
5.1.4. Tarea 1.4 - Determinación de KPIs	18
5.1.5. Tarea 1.5 - Modelado de la red	19
5.2. Actividad 2	19
5.2.1. Tarea 2.1 - Código EMT	19
5.2.2. Tarea 2.2 - Código estacionario	19
5.2.3. Tarea 2.3 - Desarrollo algoritmo	20
5.2.4. Tarea 2.4 - Definición test básico	20
5.2.5. Tarea 2.5 - Ejecución del prototipo	20
5.3. Actividad 3	20
5.3.1. Tarea 3.1 - Definición contingencias	21
5.3.2. Tarea 3.2 - Definición conexiones/desconexiones	21
5.3.3. Tarea 3.3 - Creación de <i>suite</i> tests	21
5.3.4. Tarea 3.4 - Despliegue final	21

5.4. Actividad 4	22
5.4.1. Tarea 4.1 - Evaluación estática	22
5.4.2. Tarea 4.2 - Evaluación dinámica	22
5.4.3. Tarea 4.3 - Análisis KPIs	22
5.5. Configuración prevista	22
6. Estructura del equipo	25
6.1. Organigrama	25
6.2. Biografías	25
6.3. Resumen	27
7. Resultados e impacto	28
7.1. Impacto en los operadores de red	28
7.2. Impacto en el sector eléctrico	28
7.3. Impacto en la sociedad	29
7.4. Plan de difusión de los resultados del proyecto	29
7.5. Dimensión internacional del proyecto	29
8. Descripción de la empresa	30
8.1. Descripción	30
8.2. Miembros clave: Eduardo Prieto Araujo, Oriol Gomis Bellmunt, Marc Cheah Mañé	30
8.3. Experiencia en proyectos	30
9. Conclusión	32
Bibliografía	32

1. INTRODUCCIÓN

En la era digital actual, donde la cantidad de datos y la necesidad de procesamiento computacional crecen exponencialmente, los centros de supercomputación emergen como pilares fundamentales para la investigación avanzada, el desarrollo tecnológico y la innovación en múltiples disciplinas. El proyecto COLMENA (COLaboración entre dispositivos Mediante tecnología de ENjAmbre) se sitúa en la vanguardia de esta evolución, proponiendo un modelo de programación y servicios que facilitan el desarrollo, despliegue, operación y mantenimiento de servicios altamente disponibles, confiables e inteligentes para el continuo de dispositivo-borde-nube (*IoT-Edge-Cloud*).

El sector eléctrico se está transformando para facilitar la integración de renovables, que son recursos generalmente distribuidos por el territorio. Desde este punto de vista, los convertidores de electrónica de potencia, que se encuentran en cada instalación renovable conectada a red, actúan como unidades mínimas de carácter controlable que condicionan en gran medida la operación del sistema. La aplicación de la estructura de COLMENA en el sector eléctrico ofrece una oportunidad única para validar un marco de trabajo que organiza de manera transparente grupos dinámicos de nodos autónomos colaborativos, ofreciendo soluciones robustas, seguras y confiables a los desafíos contemporáneos y futuros del sector eléctrico.

El presente documento corresponde a una oferta técnica, donde se detallan los objetivos que persigue el proyecto, su descripción en más profundidad, la metodología, el plan de implementación, la estructura del equipo de la empresa contratada, los resultados, así como el impacto esperado.

2. OBJETIVOS

Dentro del documento proporcionado llamado pliego de cláusulas administrativas particulares, se establecen una serie de objetivos e hitos. A continuación, se detallan estos objetivos e hitos propuestos, estructurados para alinearlos con las necesidades y expectativas del proyecto:

- **Objetivo 1:** *Plan de desarrollo del piloto para la validación de la plataforma.* Este primer objetivo pretende asentar las bases que después serán necesarias para realizar el estudio. El foco se centrará en plantear los casos de estudio.
 - **Hito 1.1:** *Análisis de requisitos del caso de uso para la definición del piloto.* Se realizará un análisis exhaustivo de los requisitos específicos del caso o casos de uso seleccionados. Se anticipa que tales casos de uso tratarán con redes de gran dimensión, potencialmente con miles de nodos, tal como sucede en la red española. Así, se considerarán escenarios que contengan centenares de convertidores para representar la generación renovable distribuida, los cuales actuarán en conjunto como un enjambre. La idea es contar con numerosas variables de control que condicionen la operación del sistema y que su determinación óptima se vea favorecida por el uso de las técnicas desarrolladas en COLMENA.
 - **Hito 1.2:** *Especificación del piloto, con indicadores de rendimiento (KPIs).* Este hito tratará de seleccionar modelos estándar y abiertos de red, como pueden ser la IEEE 118, ACTIVSg 2000, PEGASE 9241, entre otras. Se busca que la red contenga un número suficientemente elevado de nodos, que pueda sufrir colapsos de tensión en caso de una mala operación, y que tenga margen de mejora al colocar unidades de generación renovable distribuidas por la red. Algunos posibles indicadores que reflejan el estado del sistema son: porcentaje de pérdidas, máximas y mínimas tensiones, máxima carga de las ramas, satisfacción del criterio $N - 1$ o $N - 2$, intensidades de cortocircuito máximas, ritmo del cambio de la frecuencia dados incrementos de demanda, etc.
- **Objetivo 2:** *Entrega primera versión de la implementación del piloto.* El segundo objetivo trata sobre desarrollar una versión mínimamente viable con la que poner a prueba los algoritmos y programas llevados a cabo. Si bien en esta etapa la intención no es finalizar con un código 100 % depurado y refinado, se busca contar con un primer prototipo en base al cual perfeccionar la herramienta.
 - **Hito 2.1:** *Versión inicial del prototipo de validación, aplicando la tecnología resultante del proyecto en el piloto.* Este hito trata sobre la obtención de un prototipo preliminar que contenga la implementación de los primeros algoritmos. En general, se estudiará el sistema tanto dinámicamente como de forma estática, con lo que no solo son importantes las referencias de las magnitudes controladas por los convertidores de potencia, pero también sus lazos de control, ya que afectan su evolución dinámica. Con este fin, primero serán aplicadas heurísticas

y metodologías que permitan cambiar el tipo de operación del convertidor (por ejemplo, de grid-following a grid-forming¹).

- **Hito 2.2:** *Publicación de la primera versión del piloto en repositorio público.* Una vez puesta a prueba la primera versión del prototipo de validación, será publicada en repositorios abiertos, como puede ser albergada en GitHub o GitLab. Se debe tener en cuenta que el código a utilizar puede tener dependencias con paquetes abiertos escritos en Python para el análisis estático y dinámico de redes eléctricas. Por lo tanto, la licencia del repositorio en cuestión puede venir condicionada por las licencias de las dependencias anteriormente mencionadas. En todo caso, se puede realizar un pre-estudio para asegurar que las dependencias no afectarán la política de licencia deseada en el repositorio final.
- **Objetivo 3:** *Despliegue versión final de la implementación del piloto.* Completado el segundo objetivo de desarrollar una versión funcional, el tercer objetivo consiste en desplegar la versión definitiva. Tal prototipo definitivo es el que irá finalmente en el supercomputador para beneficiarse de su poder de cálculo y obtener KPIs fidedignos.
 - **Hito 3.1:** *Entrega código final del prototipo de validación en repositorio público.* Se proporcionará el código cuando este haya sido ampliamente testeado en el entorno de desarrollo. Se pretende constituir una *suite* de casos de prueba, que analicen la respuesta del sistema delante de contingencias como pueden ser la pérdida de generadores. Este conjunto de variaciones del caso de estudio inicial habrá permitido probar a fondo y en un amplio contexto cuál es la mejor respuesta de los convertidores de potencia para potenciar la robustez de la red. Se actualizará el repositorio público cuando el código se considere depurado y finalizado en su totalidad.
 - **Hito 3.2:** *Despliegue del piloto en los recursos disponibles.* El prototipo será implementado en un equipo tangible (ya sea el supercomputador u otro equipamiento del BSC). Para conseguirlo, los ingenieros de eRoots deberán trabajar conjuntamente con el personal del BSC para facilitar la transferencia del código, así como solucionar errores o *bugs* que se encuentren en el proceso. Se generará un informe de despliegue que incluya detalles de la implementación, configuraciones y resultados preliminares.
- **Objetivo 4:** *Evaluación de la plataforma COLMENA.*
 - **Hito 4.1:** *Comprobación del comportamiento de los componentes, según requerimientos previos.* Finalmente, se estudiará en profundidad el comportamiento de los convertidores de potencia delante un rango extenso de situaciones de operación convencionales y anormales. Se pretende verificar la operación de los convertidores con la *suite* de testeo mencionada ante-

¹El control de tipo grid-following consiste en seguir medir la frecuencia de la red y típicamente proporcionar una potencia de referencia. Por contra, el tipo grid-forming impone la frecuencia y tensión. El uso de estas dos tipologías de control condiciona de forma considerable la dinámica de las redes eléctricas.

riormente. No solo será objeto de estudio la respuesta del sistema, sino también el esfuerzo computacional requerido. Los algoritmos pueden ser potencialmente modificados en esta etapa si se detectan amplios márgenes de mejora.

- **Hito 4.2:** *Medición y evaluación de los indicadores de rendimiento (KPIs).* Como último hito, los KPIs introducidos como son la robustez de la red, los rangos de tensiones, las sobrecargas de ramas, las intensidades de cortocircuito, los tiempos de respuesta, entre otros, serán medidos en múltiples variaciones del sistema inicial. Se estima que la red podrá ser reconfigurada correctamente, en un corto plazo de tiempo, gracias al uso del concepto de computación al *edge*.

3. DESCRIPCIÓN DEL PROYECTO

3.1. Motivación

El proyecto COLMENA nace de la creciente necesidad de optimizar el procesamiento de datos en el ecosistema del Internet de las Cosas, o en inglés *Internet of Things* (IoT). En la actualidad, una gran cantidad de datos se genera en dispositivos IoT ubicados en el extremo de la red, pero la mayor parte del procesamiento se realiza en centros de datos centralizados. Este enfoque tradicional presenta varios desafíos, incluidos retrasos significativos en la comunicación, consumo energético elevado y subutilización de los recursos de cómputo disponibles en los dispositivos de borde (*edge*). COLMENA busca abordar estos problemas mediante la habilitación de una arquitectura descentralizada que fomente la colaboración entre dispositivos.

Las redes eléctricas son un buen ejemplo de topologías tradicionalmente centralizadas, en las que se distribuía la energía desde unas pocas unidades de generación tradicional a varias cargas o puntos de consumo. La creciente penetración de energías renovables, vehículos eléctricos y fuentes de almacenamiento supone un cambio de paradigma en el que aparecen numerosos convertidores de potencia que actúan como interfaces de estos equipos con la red. Estos convertidores, a diferencia de los tradicionales generadores síncronos, son altamente controlables y programables. Su operación frente a fenómenos transitorios, por ejemplo, depende en gran medida de sus esquemas y parámetros de control. Tales esquemas se materializan en líneas de código que se programan dentro de microcontroladores distribuidos. Esto supone una oportunidad para optimizar la operación de las redes, ya que se gana en flexibilidad, lo que facilita mantener una red resiliente y responder a fenómenos dinámicos inesperados. El objetivo principal de este proyecto está en considerar estos convertidores como entidades autónomas (*ants*) que forman entre ellas un mayor grupo (*swarm*), aplicar un algoritmo que regule el modo de control de los convertidores mediante conceptos de *swarm intelligence*, y valorar las ventajas que esto supone. En las siguientes páginas se profundiza en estos términos y se acercan a la operación de las redes eléctricas, juntamente con el desarrollo de la aplicación enfocada a los conceptos de la estructura de COLMENA.

3.2. Requisitos de cálculo

La implementación y validación de las tecnologías desarrolladas en COLMENA, especialmente en escenarios complejos y exigentes como las redes eléctricas modernas que contienen un gran número convertidores de potencia, pueden requerir capacidades de cómputo avanzadas.

Es ampliamente conocido que las redes eléctricas sufren la llamada maldición de la dimensionalidad. En otras palabras, a medida que se incrementa el número de buses de la red y por ende la cantidad de variables y potenciales problemas, las simulaciones de los sistemas toman exponencialmente más tiempo. Esto es especialmente crítico en presencia de incertidumbres [1]. En algunos casos se han usado técnicas como la descomposición tensorial, sacrificando así precisión por velocidad [2], pero su uso es todavía anecdótico y

altamente situacional. Otra alternativa consiste en emplear equipos físicos para realizar simulaciones en tiempo real, como son los llamados *hardware in the loop* (HIL). En este proyecto se persigue realizar una simulación en tiempo real, pero en vez de depender de componentes físicos como en el HIL, que pueden comprometer la escalabilidad de la plataforma si se quieren simular grandes sistemas, se prefiere optar por herramientas de simulación de transitorios electromagnéticos (EMT) que corran en tiempo real en un computador. No se descarta que este cálculo se realice en el supercomputador, lo que favorecería la ejecución de numerosos casos de estudio, tal como se ha perseguido en proyectos anteriores orientados a un *digital twin* [3].

Por otro lado, se puede llegar a tener que manejar grandes volúmenes de datos. Una matriz de representativa de un sistema nacional, como el de la península ibérica, que puede contener por ejemplo cerca de 10,000 nodos, con precisión `float64` ocupa cerca de 1 GB. Es probable que para cada unidad de tiempo la topología de la red varíe notablemente, lo que implica tener que recalcular y guardar esta matriz. En este sentido, si bien los datos de partida de una red ocupan pocos *megabytes*, si se quiere estudiar casos varios, los requisitos crecen considerablemente. Para solventar este tipo de problemas se han usado típicamente matrices dispersas [4], que explotan la estructura poco densa de este tipo de objetos. Sin embargo, series temporales de consumo son esencialmente densas, por lo que esta reducción no siempre es posible. Si se sensoriza la red mediante dispositivos IoT y se centraliza toda la información en un mismo ente, este problema se vuelve todavía más evidente. La centralización de la información también tiene ciertos problemas asociados, como retrasos en el envío de datos, entre otros. Por lo tanto, se prevé que tenga más sentido optar por un control descentralizado tal como propone COLMENA.

Además, tradicionalmente no se ha modificado el estado los componentes eléctricos, como los convertidores de potencia, en función de las necesidades de operación del momento [5]. Sin embargo, esta consideración resta flexibilidad a la red, lo que causa que se trabaje lejos del punto óptimo en el que la red es más resiliente. En ocasiones la determinación del modo de operación óptimo de los convertidores de potencia se puede conseguir a través de un proceso de prueba-error mediante el cual esquematizar heurísticas tras analizar variados testeos. Aunque estas pruebas se pueden realizar mediante ordenadores personales convencionales, otros medios como el supercomputador permiten el desarrollo, prueba y optimización de algoritmos de control distribuido, potencialmente incluyendo funcionalidades basadas en inteligencia artificial, a un mayor ritmo. Los centros de control, que son los lugares en los que se controla la operación del sistema, utilizan modelos poco variables y tienden a implementar medidas conservadoras. Al considerar únicamente ideas conservadoras, los costes de operación son más elevados debido a las prevenciones que se toman. Uno de los objetivos de este proyecto es plantear un camino, motivado por la computación distribuida, que favorezca la integración de nuevas herramientas en un entorno real, lo que a su vez incrementa la robustez de la red.

3.3. Caso de estudio sobre redes eléctricas

La Figura 3.1 muestra de forma esquemática el contexto de aplicación, suponiendo que se usa una red de comunicación distribuida. Vale la pena especificar que actualmente la figura difiere dado que las comunicaciones de la red de transporte están centralizadas por el operador (en el caso español, Redeia). Sin embargo, en el proyecto actual se persigue emplear el concepto de comunicación distribuida.

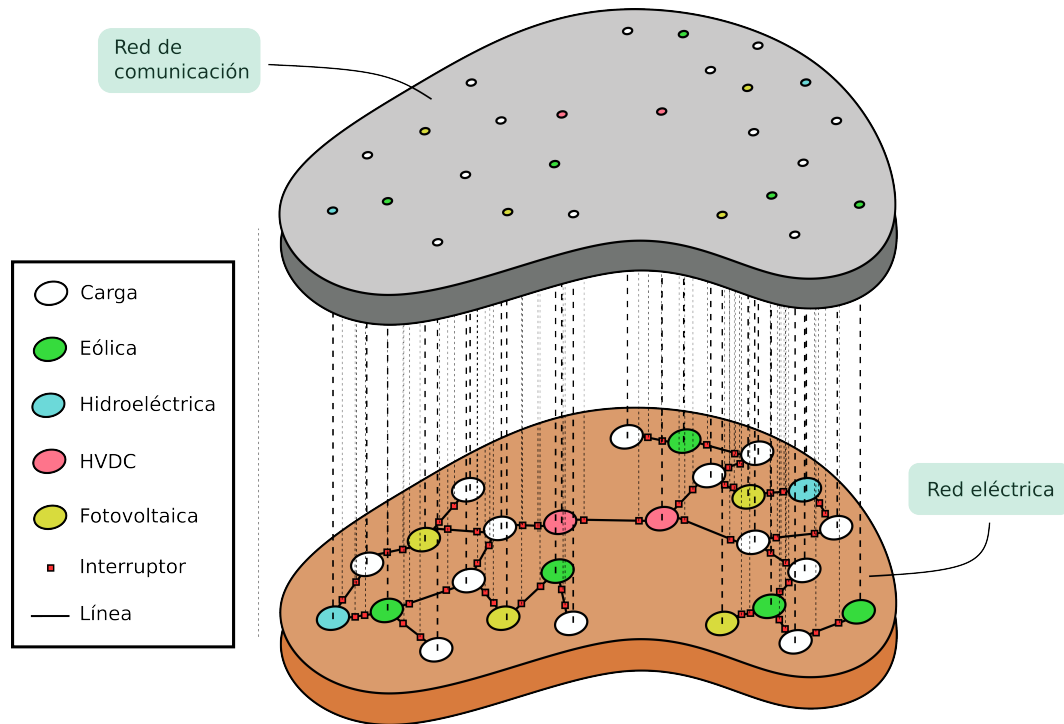


Figura 3.1. Visión general de la red eléctrica de transmisión y su conexión con una red de comunicación distribuida.

En términos generales, una red eléctrica está compuesta por los siguientes elementos:

- **Unidades de generación:** ya sean tradicionales (carbón, ciclo combinado, nuclear) o bien renovables (hidroeléctrica, fotovoltaica, eólica, etc.) que en buena parte dependen de electrónica de potencia, es decir, integran convertidores de potencia. Las unidades de generación proporcionan la energía que tiene que ser transportada hacia las cargas.
- **Cargas:** puntos de consumo con valores de potencia variables con el tiempo.
- **Alta tensión en continua (HVDC):** subestaciones que convierten la corriente alterna (AC) a corriente directa a muy alta tensión (HVDC) a través de electrónica de potencia.
- **Protecciones:** componentes que conectan o desconectan ramas, y por lo tanto, condicionan la topología del sistema. Típicamente estas protecciones se representan como interruptores.
- **Línea:** elemento que une dos nodos de la red. Topológicamente hablando un transformador también formaría parte de esta categoría.

A partir de la clasificación anterior se deduce que los elementos que componen el sistema eléctrico deberían ser generalmente controlables, ya que los parques eólicos, fotovoltaicos, enlaces HVDC, y en ciertos casos las centrales hidráulicas, contienen electrónica de potencia; por otro lado, los interruptores también pueden ser monitorizados y accionados con información local. Esto causa que se pueda formar una red de comunicación en la que por ejemplo elementos cercanos se pueden comunicar para reconfigurar su estado de operación de forma que conjuntamente la operación sea óptima.

De este modo se conceptualizan todos estos elementos controlables como entes que forman un enjambre. Igual que en el mundo animal, en el que por ejemplo abejas de una colmena toman decisiones de forma conjunta con acciones autónomas, en el contexto eléctrico todos estos dispositivos regulables participarán a mejorar la operación de la red. Esto incluye actuaciones enfocadas a:

- Reconponer la red después de contingencias que comprometan su resiliencia.
- Optimizar la operación para minimizar costes, pero a la vez considerar criterios técnicos (pérdidas eléctricas, perfiles de voltaje, sobrecargas de líneas).
- Mejorar la estabilidad de forma continua frente contingencias graves (como es el caso de los cortocircuitos).
- Maximizar la capacidad de transferencia de potencia interárea.
- Anticipar posibles sobrecargas de líneas y asegurar la robustez del sistema a pesar de perder cualquier componente.

4. METODOLOGÍA

La filosofía del proyecto se basa en el concepto de *swarm intelligence*, es decir, inteligencia a nivel de enjambre. En el mundo animal sucede que insectos con cerebros poco desarrollados son capaces de organizarse, formando así una inteligencia superior a las individuales, de forma que sean capaces de adaptarse delante de fenómenos variados. Algo similar se persigue en este proyecto, ambientándolo en la red eléctrica. Los múltiples convertidores que conforman una red son controlables y programables, lo que permite cambiar su modo y punto de operación adaptándose a sucesos para mejorar la operación del sistema. En este sentido, estos convertidores serían entes que mediante medidas locales y comunicación con otros convertidores pueden mejorar el estado la red, sin dependencia de una unidad centralizada que capture información y envíe consignas. La eliminación de la dependencia con una entidad central supondría un cambio relevante en la operación de las redes eléctricas, lo que puede dar lugar a un cambio de paradigma en caso de ser satisfactorio.

El proyecto plantea primero una parte de modelado de la red, que incluye la selección del sistema, la definición de los entes, sus modos de control, y potenciales canales de comunicación. En una segunda etapa se definen los casos de estudio, es decir, aquellas situaciones en las que hace falta reconfigurar la red delante fenómenos críticos. Además, se definen los indicadores a usar para evaluar la respuesta obtenida.

La Figura 4.1 muestra de forma generalizada el concepto que se quiere explorar.

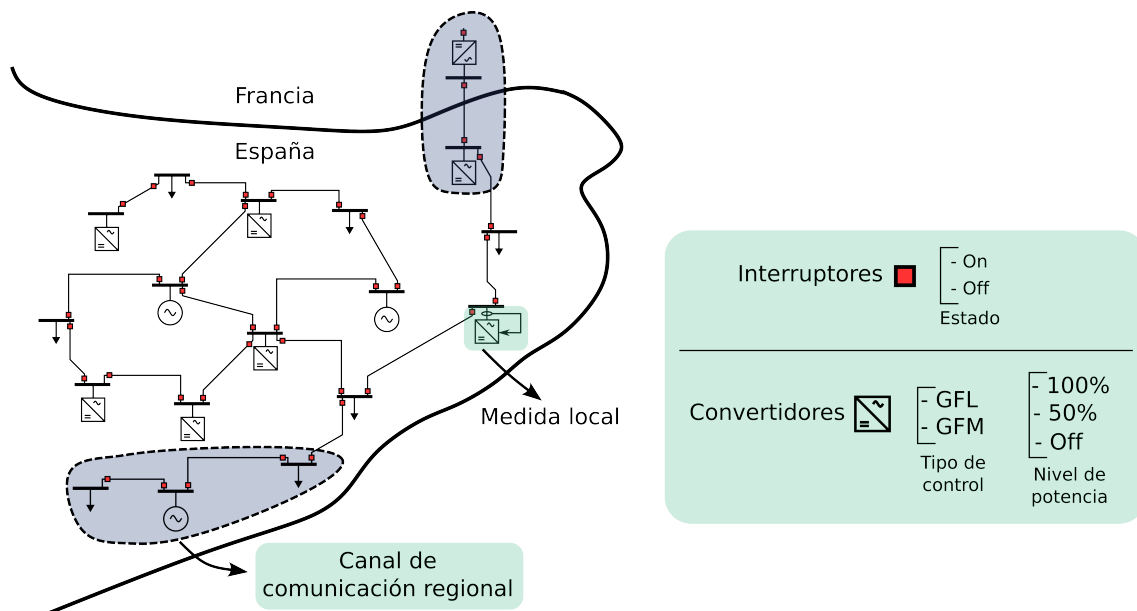


Figura 4.1. Esquema de una red con elementos controlables, roles y canales de comunicación.

4.1. Modelado de la red

La metodología consistirá en una primera etapa en seleccionar una red lo suficientemente compleja como para poner a prueba el concepto de operación en modo de enjambre. Una posible red a escoger es la

ACTIVSg2000 [6], un sistema sintético que simula la red de Texas mediante 2000 buses. Redes de estas dimensiones son equiparables al sistema peninsular español, dado que son mayormente malladas y cuentan con miles de buses. Para poder explotar el concepto de inteligencia en estructura de enjambre, se buscará adaptar la red actual a un sistema futuro, en el que se reemplazarán generadores síncronos tradicionales por convertidores de potencia. Estos convertidores serán programables y controlables, con varios modos de control en los que pueden operar, y también se considerarán interruptores a cada extremo de las ramas.

4.1.1. Entes

Tal como se ha introducido previamente, se tratan dos tipos de AgeNTes autónomos (ANT), también llamados entes: interruptores y convertidores.

Interruptores

Por un lado, desde una perspectiva generalista, los interruptores son dispositivos que permiten la conexión o desconexión entre nodos de la red. Su operación es necesaria para proteger ciertos elementos de los efectos dañinos derivados de cortocircuitos, reconfigurar la red para incrementar su resiliencia, adaptar la topología para minimizar pérdidas eléctricas, entre otros. En términos generales, un interruptor opera a partir de medidas locales, como pueden ser tensiones e intensidades en sus terminales. Sin embargo, es vital garantizar que los interruptores se coordinen, incluso sin disponer de comunicaciones entre ellos. De este modo se consiguen por ejemplo aislar las partes comprometidas de la red y minimizar el número de clientes afectados en caso de falta. Una mala operación de los interruptores puede derivar en apagones del sistema, lo que conlleva pérdidas económicas para el operador de la red. Por lo tanto, a modo de resumen, los dos roles de los interruptores son:

- On: el interruptor conecta los buses de sus dos extremos.
- Off: el interruptor abre los buses de sus dos extremos, impidiendo así que fluya corriente.

Convertidores

Los convertidores de potencia son elementos que actúan de interfaz entre dos redes. En el caso propuesto, estos convertidores ligan el recurso renovable con la red, pero también se encuentran en enlaces de corriente continua a muy alta tensión (HVDC), o incluso en dispositivos de compensación (STATCOMs), de almacenamiento, entre otros. La ventaja y necesidad de usar convertidores reside en su capacidad para adaptar las magnitudes eléctricas. Dicho de otro modo, los convertidores ofrecen controlabilidad, lo que mejora la flexibilidad a la hora de operar. Si bien existen muchos tipos de control, a grandes rasgos se clasifican en dos categorías:

- Grid-following (GFL): convertidores que siguen la frecuencia de la red, y que típicamente controlan la potencia inyectada [7].

- Grid-forming (GFM): convertidores que tienen la capacidad de imponer la frecuencia y la tensión, es decir, de crear la red [8].

Estos dos tipos de control condicionan de forma relevante la operación del sistema. Por ejemplo, en caso de *blackout*, los convertidores tipo GFM permiten encender la red (técnicamente llamado *blackstart*). Sin embargo, pueden aparecer interacciones entre convertidores que den lugar a inestabilidades. Además de ser crítico el tipo de control, también lo son las referencias que se envían al convertidor. Este aspecto tiene más complejidad en la práctica, pero a modo de simplificación se pueden definir tres niveles de operación para cada tipo de control, en función de la potencia inyectada:

- 100 %: el convertidor trabaja proporcionando la máxima potencia.
- 50 %: el convertidor inyecta la mitad de la potencia disponible.
- 0 %: el convertidor está desconectado.

Es importante recordar que cada ente solo puede operar con uno o más roles a la vez. Estos roles serán elegidos autónomamente por los entes. Entonces, los entes se descargan el *software* particular y operan siguiendo tal rol.

4.1.2. Canales de comunicación

En un contexto tradicional las medidas van dirigidas al operador de la red, el cual las agrupa y toma decisiones de forma centralizada. En cambio, la estructura de COLMENA se basa en usar canales de comunicación distribuidos que permitan el intercambio de información entre entes, sin depender de una entidad central [9]. Estos canales pueden también ser muy variados, pero la idea principal es que no todos los entes necesariamente tienen información de la operación de todos los otros entes (ANTs). La comunicación se plantea más bien local, igual que en una colmena un grupo de abejas tienden a comunicarse con las abejas más cercanas. Desde un punto de vista eléctrico esto puede suponer un cambio de paradigma significativo.

En mayor detalle, los canales a establecer serán:

- Regionales: se formarán agrupaciones topológicas de nodos. Por ejemplo, en una red de 2000 buses, se pueden realizar 20 conjuntos de 100 nodos, de forma que los entes solo se puedan comunicar con entes de este mismo grupo. Esto sectoriza la red y acerca el concepto al de un enjambre. En una situación práctica se pueden realizar sectorizaciones provinciales, a modo ejemplificativo.
- Interruptores on/off: se establece un canal de comunicación en el que solo los interruptores on pueden comunicarse con los off, y viceversa. Es decir, interruptores en un mismo estado no pueden enviarse información.

- Convertidores activos/inactivos: igual que en el caso de los interruptores, solo se podrán hablar directamente los convertidores activos con los inactivos, y viceversa.

4.2. Casos de estudio

Se concretan dos tipos de casos de estudio: unos en los que aparecen o desaparecen nuevos elementos en la red, y otros en los que tienen lugar contingencias. Aunque conceptualmente son distintos, en realidad en ambos casos los entes tienen que ser capaces de readaptarse para mejorar su operación en conjunto.

4.2.1. Instalación/desinstalación de elementos

Una primera tipología de caso de estudio consiste en analizar como se deberían adaptar los entes frente a la inclusión de un nuevo elemento en la red, o por contra, frente a la desinstalación de un dispositivo. Un ejemplo práctico sería la conexión a red de un nuevo parque eólico. En esta instancia, después de haber cumplido con una serie de requisitos impuestos por el operador de la red, el parque se conecta y por consiguiente ejerce cierta influencia en el estado de la red. El objetivo es que los demás entes sean capaces de ajustar su respuesta para dar cabida a este elemento, y así, en forma grupal, mejorar la condición de la red. A su vez, este nuevo parque eólico contendría uno o varios convertidores, que también tienen que afinar su operación dado que son nuevos entes que se integran al sistema.

El mismo principio aplica a la desinstalación de componentes. Por ejemplo, si un parque eólico es finalmente eliminado de la red, será necesario que los entes que continúan presentes puedan readaptarse a estas nuevas condiciones, reconfigurando así su operación para cubrir la pérdida sufrida. Igualmente, durante operaciones de mantenimiento, que a la práctica se estima que tengan duraciones de unas cuantas horas, los entes activos deben acomodarse al nuevo contexto.

4.2.2. Contingencias

Las contingencias son fenómenos indeseados que comprometen la operación del sistema. Pérdidas de generadores, cortocircuitos, desconexión de líneas y transformadores, entre otros, serían sucesos que se clasifican bajo esta categoría. Los operadores de red persiguen poder cumplir con el criterio $N - 1$ [10], es decir, que el sistema debería poder operar dentro de los márgenes admitidos a pesar de perder un elemento cualquiera.

Aunque una contingencia puede dar lugar a la conexión o desconexión de un elemento, igual que los casos descritos en la Sección 4.2.1, es de entrada un fenómeno más severo. Por ejemplo, un cortocircuito es probable que implique un cambio de estado en los interruptores, incluida la pérdida de una o varias líneas, y que el sistema se tenga que recomponer rápidamente para asegurar su estabilidad. Es indispensable que los convertidores, y en general cualquier ente, actúe rápidamente bajo estos contextos. De no ser así, se podría llegar a experimentar un apagón generalizado, con consecuentes pérdidas millonarias [11].

4.2.3. Otros

Otras situaciones particulares que se pueden estudiar se recogen a continuación.

- Regulación de frecuencia y voltaje: se debe mantener el equilibrio entre el suministro y la demanda de electricidad para mantener la frecuencia de la red estable. Además, los convertidores pueden ajustar su salida para mantener niveles de voltaje estables. Se busca mejorar la fiabilidad general del suministro dadas variaciones en la carga.
- Incremento de estabilidad: los convertidores modificarán su modo y punto de operación a partir de medidas y comunicaciones locales para trabajar lo más lejos posible del punto de colapso de tensiones. Esto mejorará la estabilidad del sistema y lo hará más resiliente frente a posibles problemas.
- Operación en isla: en caso de una falla mayor en la red, los convertidores de potencia pueden permitir que una sección localizada de la red (microred) opere de manera independiente. Pueden gestionar la transición entre modos conectados a la red y aislados, asegurando que las cargas críticas permanezcan alimentadas y que la microred opere de manera eficiente hasta que pueda reconectarse de forma segura a la red principal.
- Respuesta a la demanda: los entes pueden desempeñar un papel clave a la hora de proveer flexibilidad. Los convertidores ajustarían el flujo de potencia hacia y desde la red en respuesta a señales o incentivos de precios, ayudando a equilibrar la oferta y la demanda de forma regional, en la medida de lo posible.

En líneas generales si el sistema puede responder a conexión/desconexión de elementos y contingencias, se garantiza su operación segura. Sin embargo, en caso de interés en estudiar casos más normales de operación, se puede poner a prueba la red para los puntos anteriores.

4.3. Indicadores locales

Se definen como indicadores locales aquellos que captan información relacionada con la operación de un elemento, en este caso de interruptores y convertidores. En el ámbito eléctrico, estos indicadores toman la forma de medidas locales efectuadas a los terminales de los componentes. Sin pretender que sea una lista exhaustiva, algunos indicadores locales a tener en cuenta son:

- Corriente que sale del terminal del componente, descompuesta en secuencia positiva, negativa y cero. Al usar una descomposición en secuencias [12], se puede determinar el grado de desbalance de la red.
- Voltaje a los terminales del componente, también descompuesta en secuencia positiva, negativa y cero.

- Frecuencia y ritmo de variación de esta (RoCoF), lo que ayuda a detectar inestabilidades.

4.4. Indicadores clave (KPIs)

La valoración del grado de adecuación en el que la red trabaja vendrá dada por una serie de indicadores clave (KPIs). Si bien forma parte del proyecto definir al detalle estos indicadores, a continuación se muestran unas cuantas posibilidades a modo de ejemplo:

- Número de nodos, líneas, convertidores e interruptores en la red. Idealmente se busca que sean 2000, >2000, >200, >1000 respectivamente.
- Pérdidas de potencia activa. El objetivo es operar a un rendimiento superior del 98 %.
- Coste de generación que de media permanezca inferior al 70 % del coste original con únicamente fuentes de generación tradicional.
- Número de buses en los que los niveles de voltaje no se mantienen entre 95 % y 105 %.
- Número de ramas (líneas y transformadores) que operan por encima de su carga nominal del 100 %.
- Número de convertidores que operen con una relación de cortocircuito (SCR) inferior a 2.0. Esta relación de cortocircuito indica la potencia inyectada por el convertidor en relación a la potencia de cortocircuito (impuesta por la red). Valores bajos de SCR comprometen la estabilidad del sistema.
- Reducción de desconexiones de convertidores en caso de faltas severas en un 50 %.
- Número de buses del sistema que operen con unos niveles de armónicos de tensión superiores al 8 %.

Cabe destacar que estos indicadores no son información de la que dispondrán los equipos, ya que son datos que más globales. Sin embargo, serán útiles para valorar la respuesta de los algoritmos a implementar durante la fase testeo. Se pueden añadir KPIs adicionales una vez el caso de estudio haya sido concretado en mayor detalle durante la ejecución del proyecto.

5. PLAN DE IMPLEMENTACIÓN

El propuesto plan de implementación se muestra en la Figura 5.1, donde se esquematizan las Tareas y los Hitos, juntamente con sus tiempos correspondientes.

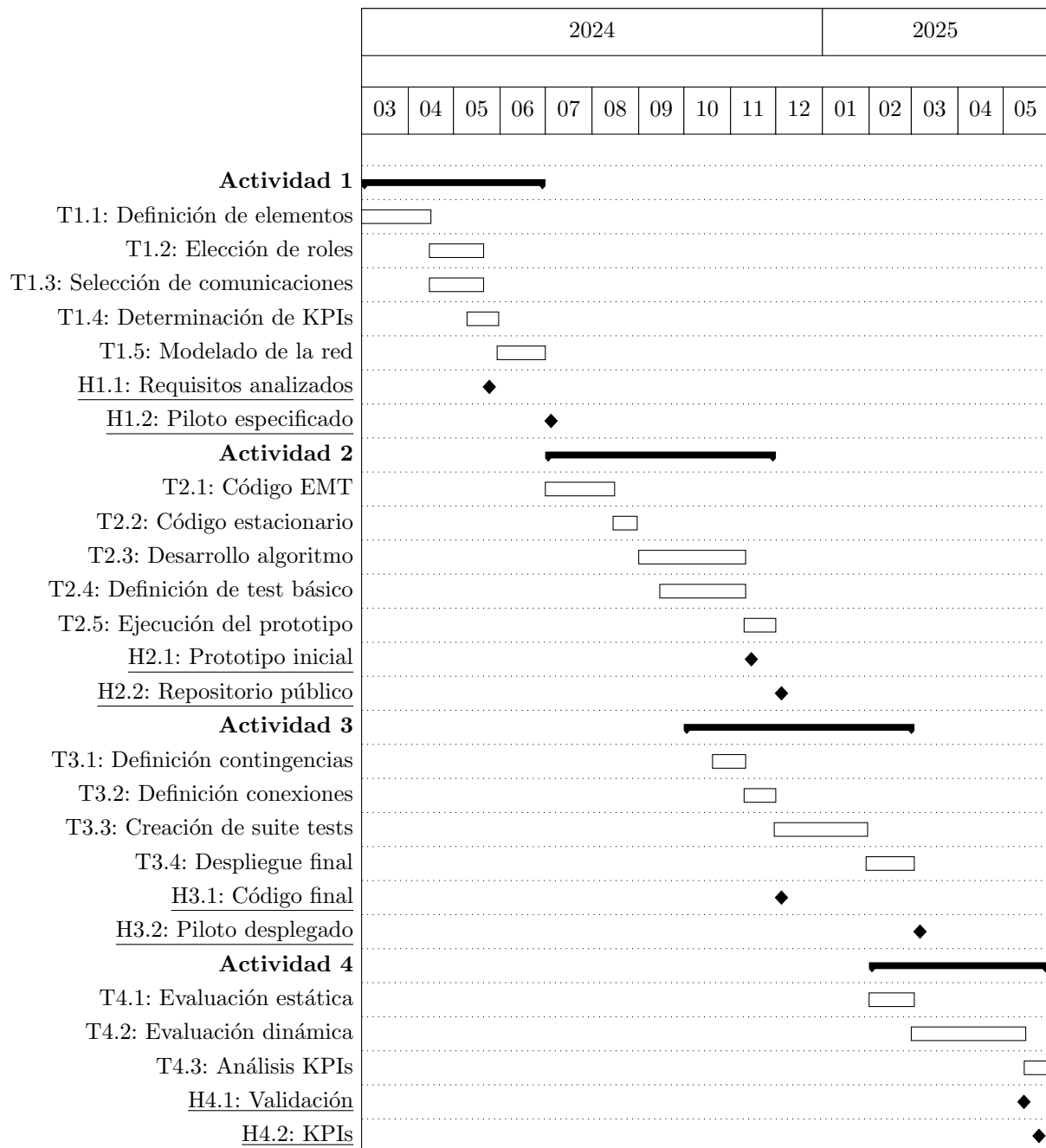


Figura 5.1. Diagrama de Gantt esquematizando las actividades, tareas e hitos.

5.1. Actividad 1

La primera actividad responde a la necesidad de introducir el caso de estudio a analizar y empezar a trazar las primeras conceptualizaciones, como son los entes, roles, comunicaciones e indicadores. También es objeto de esta actividad generar un modelo inicial de red.

5.1.1. Tarea 1.1 - Definición de elementos

La Tarea 1.1 introducirá los entes que compondrán el enjambre. En el contexto eléctrico se pretende que estos entes sean interruptores y convertidores, aunque esta clasificación se puede extender a por ejemplo generadores convencionales (permiten un mínimo de controlabilidad), cargas variables para proveer servicios de respuesta a la demanda, entre otros. Todos estos componentes tendrán que trabajar en un solo estado de operación que se espere que se adapte según la situación de forma automática. Los entes que conformarán el enjambre se entienden como elementos *edge*, es decir, componentes que procesan información a nivel local sin depender de una unidad central.

5.1.2. Tarea 1.2 - Elección de roles

Tal como se ha introducido, los entes deben operar en un único estado en un momento dado, que puede variar según las condiciones del entorno. Es decir, que cada entidad de los miles que constituirán el sistema tendrá la capacidad de reconfigurarse para lograr un estado de la red más bien condicionado. En esta tarea se definirán los posibles roles a adoptar cada tipo de componente. Por ejemplo, los interruptores estarán o bien abiertos, o bien cerrados. En el caso de los convertidores de potencia, los cuales a su vez se tienen que dividir en grid-following y grid-forming, se pueden establecer categorías en función diferentes niveles de potencia inyectada. Formará parte del ejercicio decidir exactamente qué roles deben ejecutar los convertidores.

5.1.3. Tarea 1.3 - Selección de comunicaciones

El cambio de rol de los entes tiene lugar debido a la inteligencia de la estructura COLMENA, que dictará qué elementos tienen que modificar su rol y en qué rol deben operar. La información para decidir esto serán tensiones y corrientes en los terminales de los elementos eléctricos, y también se plantea establecer comunicación entre unas cuantas entidades. Para emular el comportamiento de enjambre se pretende que los entes reciban información regional, es decir, proveniente de otros entes relativamente cercanos. También se valorará si es positivo establecer canales de comunicación entre entes en función de su tipo o rol actual. A modo de ejemplo, convertidores grid-following podrían enviar información a convertidores grid-forming¹.

5.1.4. Tarea 1.4 - Determinación de KPIs

Para evaluar el grado en el que la red opera cercana a una situación deseada, se propondrán distintos Key Performance Indicators (KPIs). La intención es capturar i) Criterios económicos como el coste total de generación o la activación de reservas para el ajuste de frecuencia, y ii) Criterios técnicos como sobretensiones, subtensiones, sobrecarga de líneas, potencias inyectadas, entre otros. Los entes no dispondrán de toda esta información. Más bien estos indicadores se utilizarán para evaluar la respuesta del algoritmo

¹ Como punto adicional a considerar, se pueden valorar las potenciales ventajas en términos de ciberseguridad que implica trabajar con comunicaciones distribuidas.

una vez implementado, lo que ayudará a discernir qué reglas de decisión son más convenientes a la hora de cambiar de rol. En el proyecto propiamente dicho se expandirán estos KPIs, con datos numéricos marcados que permitan valorar objetivamente el estado de operación.

Por otro lado, también se definirán indicadores de carácter local que jueguen un papel en el cambio de roles, como pueden ser medidas. Estas serán parte de la información captada por los entes.

5.1.5. Tarea 1.5 - Modelado de la red

Por último, la Tarea 1.5 tratará de la construcción del modelo de la red de estudio. La perspectiva inicial es partir del sistema estandarizado IEEE 118, y potencialmente escalar a una red mayor como la ACITVSG2000, la información de la cual se encuentra en [6]. Después, esta red se modificará ligeramente para incluir los interruptores, y se eliminarán generadores tradicionales a cambio de instalar convertidores de potencia distribuidos por el territorio. Se busca construir un modelo que contenga entes bien diferenciados y asegurar que el punto de partida opera dentro de los márgenes permitidos.

5.2. Actividad 2

La segunda actividad acerca el concepto inicial a la implementación. En su mayoría, en esta fase se explorarán los códigos para realizar las simulaciones, se implementarán las modificaciones necesarias, y se definirán tests fundamentales para poner a prueba el caso de estudio.

5.2.1. Tarea 2.1 - Código EMT

Un tipo de simulación a llevar a cabo son las llamadas simulaciones dinámicas de electromagnéticos transitorios (EMT). Se caracterizan por exigir unos elevados requisitos de cómputo, pero como contrapartida, ofrecen resultados precisos y muy ajustados a la realidad gracias a considerar la dinámica del sistema. Las simulaciones EMT se han ejecutado típicamente en programas comerciales que solo corren sobre Windows como PSCAD. A pesar de esto, existen alternativas de código abierto como ParaEMT, un repositorio escrito en Python, paralelizable y pensado para correr en supercomputadores, capaz de realizar simulaciones EMT enfocadas a sistemas de gran dimensión [13]. El trabajo dentro de esta tarea puede consistir en incluir nuevos modelos dentro de esta librería y en general preparar el código para poder llevar a cabo los casos de estudio definidos. También se pueden estudiar opciones como HyperSim de Opal-RT [14], el repositorio público DPSIM [15], entre otras. La explicación que sigue asume la selección de ParaEMT a modo de ejemplo, pero esta elección se puede debatir dentro de la ejecución del proyecto.

5.2.2. Tarea 2.2 - Código estacionario

Si bien las simulaciones EMT son ideales para estudiar evoluciones transitorias, en el otro lado del espectro se usan estudios estáticos, también llamados de estado estacionario, pensados para determinar el estado de operación en situaciones en las que se llega a la estabilidad. En este contexto, GridCal es un paquete

de código abierto pensado para realizar todo tipo de estudios estáticos: flujos de carga, cortocircuitos, expansión de redes, etc [16]. En la Tarea 2.2 se adaptará GridCal para que soporte los distintos roles de los convertidores y se pensará cómo sectorizar la red para establecer canales de comunicación regionales. En líneas generales esta tarea se prevé que sea menos intensa que la Tarea 2.1. Además, en parte se puede reutilizar el trabajo realizado por CITCEA-UPC en el proyecto conjunto con el BSC enfocado a *digital twins* [17].

5.2.3. Tarea 2.3 - Desarrollo algoritmo

Una vez ParaEMT y GridCal contengan las definiciones necesarias para llegar a simular los casos de estudio, serán unificados. Este trabajo tratará de permitir que se comuniquen entre ellos, potencialmente con una pasarela, y que ambos puedan funcionar a partir del mismo modelo de red. Idealmente GridCal se utilizará para calcular el punto de operación inicial, que después será transferido a ParaEMT para agilizar la simulación. Se espera que con este algoritmo unificado se puedan automatizar los casos de estudio.

5.2.4. Tarea 2.4 - Definición test básico

La Tarea 2.4 consiste en definir un test inicial. Se dispondrá de un sistema base, potencialmente con pocos buses como la IEEE 9, que sirva para poner a prueba ambos *software* (ParaEMT y GridCal), testear su unión, e interpretar los resultados mediante los KPI definidos. Se partirá de un caso de estudio básico sin fenómenos extremadamente inoportunos que puedan comprometer gravemente el estado del sistema. De esta manera se crearán funciones de test que sirvan para agilizar el desarrollo futuro asegurando que las funcionalidades implementadas continúan funcionando correctamente.

5.2.5. Tarea 2.5 - Ejecución del prototipo

En la última tarea de la Actividad 2 se ejecutará la versión inicial del programa. A pesar de que las demás tareas se desarrollarán de forma bastante independiente por parte de eRoots, durante la ejecución del prototipo se requerirá la colaboración del personal del BSC. El planteamiento es que se trabajará conjuntamente para que eRoots pueda detectar los potenciales fallos y corregirlos. Al finalizar esta tarea se debería obtener una versión funcional del programa que será mejorada en una etapa posterior. También en esta fase se persigue conseguir ejecutar diversas simulaciones (alguna contingencia o conexión/desconexión), analizadas tanto estáticamente como dinámicamente para asegurar que la integración de GridCal y ParaEMT es satisfactoria.

5.3. Actividad 3

La tercera actividad busca poner a prueba el algoritmo de forma masiva. Mientras que en la Actividad 2 se habían definido situaciones base con las que verificar el funcionamiento del programa, en esta ocasión

se definirán casos complejos de contingencias y cambios en las conexiones. Con esto se podrá lograr un despliegue final en el que los entes reaccionen para reorganizarse delante contextos adversos y variados.

5.3.1. Tarea 3.1 - Definición contingencias

La Tarea 3.1 tratará de definir contingencias. Las contingencias son situaciones en que se pierden elementos del sistema. Por tanto, existen multitud de combinaciones, dado que varios elementos pueden experimentar una desconexión en el mismo tiempo. Si el poder de cálculo lo permite, se llegará hasta el segundo nivel, es decir, se simulará el sistema para cualesquiera dos dispositivos desconectados simultáneamente. El objetivo perseguido consiste en lograr que los entes se reconfiguren para dar soporte y permitir que la red opere de forma estable durante tales contingencias. El resultado de esta tarea será un listado de tests de contingencias a ejecutar.

5.3.2. Tarea 3.2 - Definición conexiones/desconexiones

En los sistemas de potencia actuales es común que se integren nuevas entidades, como pueden ser parques solares, por ejemplo. La incorporación de un nuevo componente implica que sus entes así como los entes del resto del sistema detecten un cambio y se adapten para permitir que la instalación añadida no afecte negativamente, o más bien dicho, favorezca la operación del sistema eléctrico. Con este propósito se definirán múltiples conexiones de nuevas instalaciones, idealmente del orden de centenares, para determinar la adaptación de los entes. De la misma forma se puede plantear la desconexión de centrales tradicionales de generación.

5.3.3. Tarea 3.3 - Creación de *suite tests*

Cuando los casos de estudio basados en contingencias y conexiones se hayan creado, se formará una matriz de tests (*suite tests*) con tal de delimitar los casos de estudio a ejecutar en el despliegue final. Se busca recopilar resultados límite (inferior y superior) que sirvan para determinar si los valores numéricos de estos casos de estudio caen dentro del rango esperado. Esta *suite* de casos de estudio se puede mirar de automatizar mediante Docker y GitHub Actions.

5.3.4. Tarea 3.4 - Despliegue final

En el despliegue final eRoots colaborará con el personal del BSC para asegurar que el código corre tal como es esperado. eRoots modificará el código en caso de detectar *bugs* o inconvenientes que puedan ralentizar su ejecución. Esta tarea pretende dar un paso más allá con respecto a la Tarea 2.5 dado que aquí se computarán numerosos casos con cierta complejidad a nivel de contingencias y conexiones/desconexiones. Es posible que si se quiere simular una red con 2000 buses como la ACTIVSg2000, se requerirá más poder de cálculo. El uso del supercomputador puede resultar provechoso en este contexto.

5.4. Actividad 4

Finalmente, la Actividad 4 trata de llevar a cabo un estudio de los resultados a partir de las simulaciones ejecutadas por el personal del BSC. En particular se estudiarán los resultados estáticos, los dinámicos, y los KPIs finales, los que permitirán deducir qué reglas de decisión resultan más apropiadas.

5.4.1. Tarea 4.1 - Evaluación estática

La evaluación estática tratará de entender la operación del sistema en régimen estacionario. Es decir, estas simulaciones se llevarán a cabo con GridCal como motor de cálculo. El foco se situará en visualizar el estado estable del sistema después de que este sufra nuevas conexiones de dispositivos o contingencias varias. Los indicadores estáticos serán recopilados para su futura interpretación.

5.4.2. Tarea 4.2 - Evaluación dinámica

De forma similar a la evaluación estática, la dinámica se centrará en los resultados derivados de las simulaciones dinámicas. En otras palabras, se estudiarán los valores sacados con ParaEMT de fenómenos transitorios. Se valorará que los resultados concuerden con los esperados de la *suite* de tests, dado que este conjunto de casos de prueba contendrá los resultados validados.

5.4.3. Tarea 4.3 - Análisis KPIs

Cuando la información estática y dinámica ha sido almacenada y ha pasado un primer filtro, en última instancia se analizarán los indicadores clave. Se estima que con estos indicadores el equipo será capaz de interpretar qué estrategia de decisión es más apropiada. El proyecto se considerará finalizado una vez se haya validado que los resultados tienen sentido, técnicamente desde una perspectiva eléctrica y también desde un punto de vista de computación.

5.5. Configuración prevista

De forma general, la implementación y ejecución de simulaciones pasará por seguir la estructura identificada en la Figura 5.2. Se trabaja con un modelo de red en *plain text* con el que se obtiene un gemelo digital, en inglés *digital twin*. Es decir, se genera una copia virtual del sistema que emule su operación. Este sistema será simulado en GridCal y ParaEMT, ambos paquetes escritos en Python. El primero se usa para obtener resultados estáticos, mientras que el segundo se emplea para simulaciones dinámicas de tipo EMT. Ocasionalmente la salida de GridCal se puede enviar a ParaEMT para ajustar el punto de inicialización y así acelerar el cálculo. Al final, ambos programas producen un archivo de resultados, que puede estar en formato .csv.

Para profundizar sobre la configuración prevista del programa, hace falta diferenciar el flujo de trabajo en un y otro paquete.

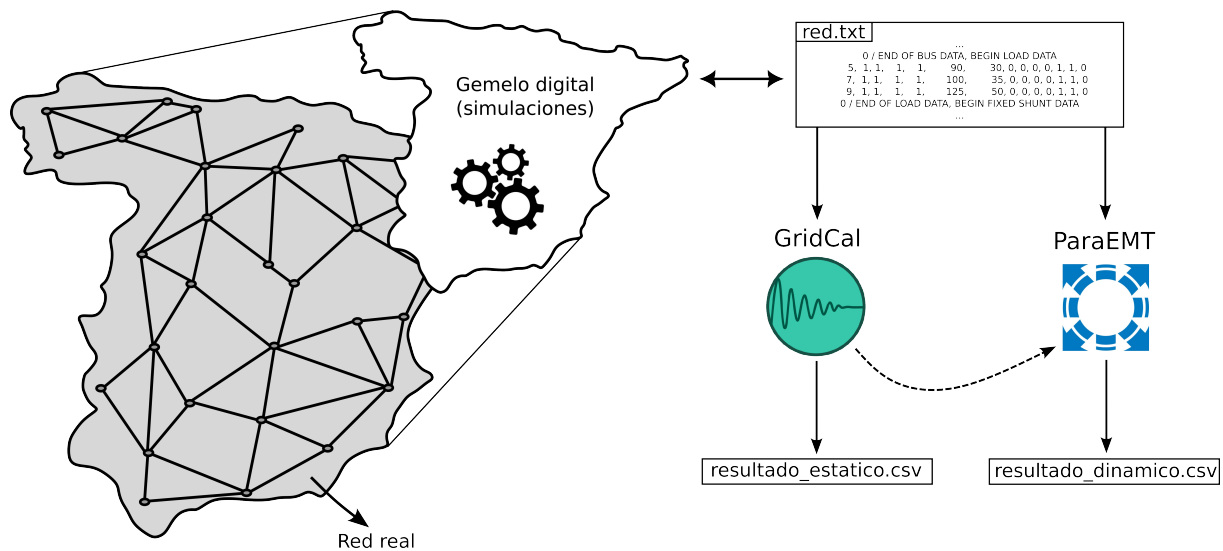


Figura 5.2. Integración de los datos de red con los paquetes en Python de simulación.

La Figura 5.3 ilustra el proceso de funcionamiento de GridCal. Primero se carga un fichero de red que es interpretado por el *parser* de GridCal y convertido a una instancia de la clase *MultiCircuit*. Entonces, se pueden configurar parámetros para la simulación, como el máximo número de iteraciones, la tolerancia deseada en la resolución, entre otros. Con toda esta información se llama el *driver* de simulación, que es el responsable de llevar a cabo el cálculo, y finalmente se escriben los resultados. En principio los resultados son almacenados en una instancia de una clase de resultados que contiene GridCal, pero son fácilmente extraíbles a formato .csv o similares.

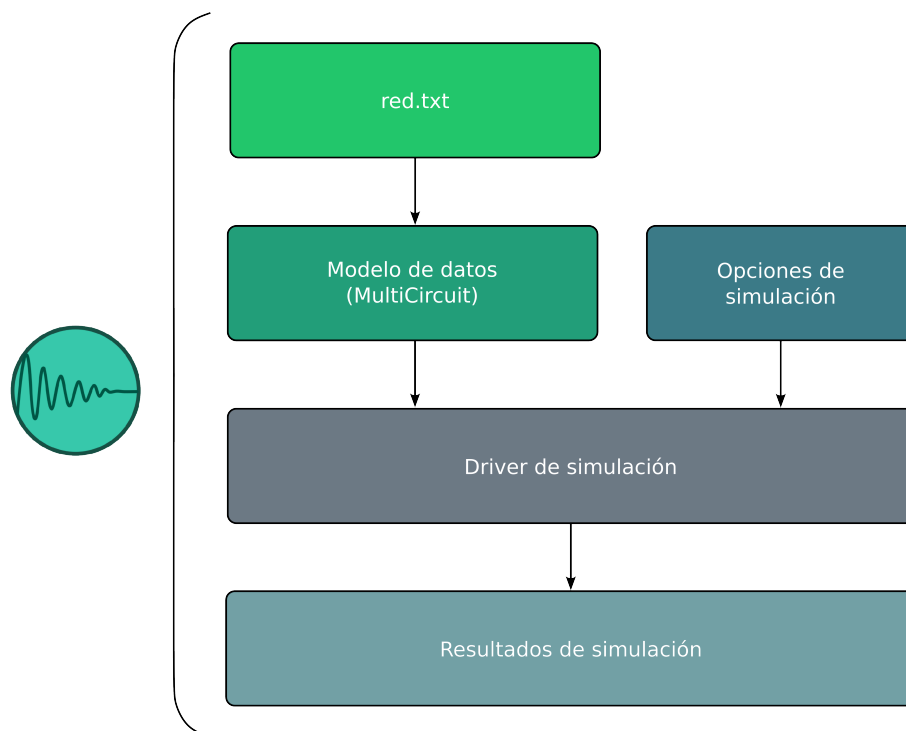


Figura 5.3. Estructura de GridCal.

Por otro lado, la Figura 5.4 muestra el flujo de trabajo con ParaEMT, que está pensado para ser más

secuencial que GridCal. Se empieza leyendo los datos del sistema. En este caso, se requiere tanto información estática (la misma que en GridCal), pero también datos dinámicos, ya que la gracia de utilizar ParaEMT está en la resolución de fenómenos dinámicos de tipo EMT. Sin embargo, primero hay que solucionar el problema estático, típicamente llamado flujo de cargas, para encontrar el punto inicial del que parte la simulación dinámica. En este caso, se almacenan los resultados en un fichero .json. Una vez superada la fase de preparación, el programa es capaz de pasar a ejecutar la simulación EMT propiamente dicha. Previo a esto se inicializan los estados de las variables dinámicas mediante el resultado del flujo de cargas, y entonces el programa está preparado para computar un cálculo intensivo como es una simulación EMT. Estos resultados, que son dependientes del tiempo y conforman series temporales, se guardan en un archivo con extensión .pkl (*serialized pickle file*). En la tercera y última etapa se convierten los resultados a un fichero .csv, para mayor comodidad.

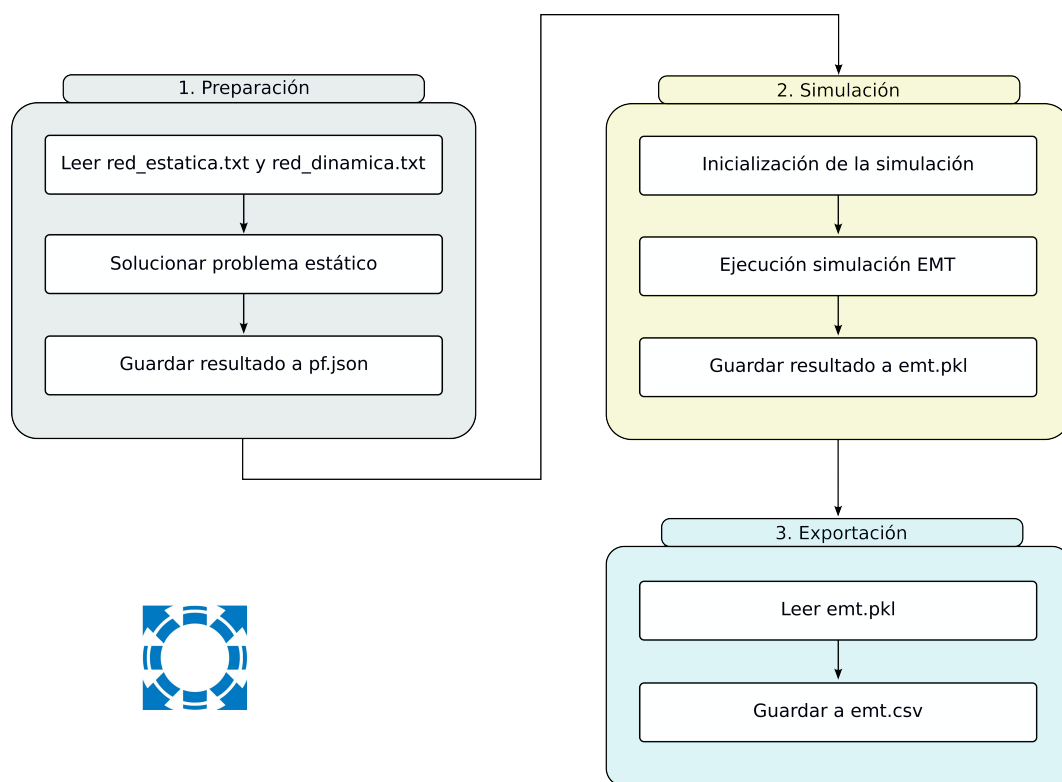


Figura 5.4. Estructura de ParaEMT.

Cabe recordar que tanto GridCal como ParaEMT son plataformas escritas en Python, por lo que las integraciones entre ellas y con las herramientas del BSC deberían ser relativamente directas.

6. ESTRUCTURA DEL EQUIPO

6.1. Organigrama

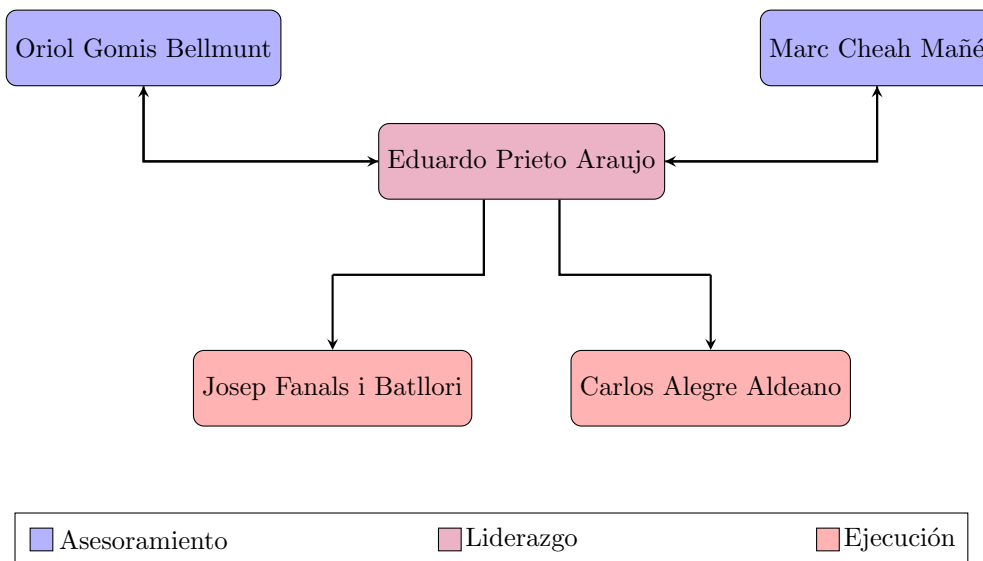


Figura 6.1. Organigrama del equipo planteado.

6.2. Biografías

Eduardo Prieto Araujo

Dr. Eduardo Prieto Araujo es ingeniero industrial por la ETSEIB (UPC, Barcelona) y doctor en Ingeniería Eléctrica por la UPC en 2016. Actualmente es profesor en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la UPC y cofundador de eRoots Analytics desde 2022. Realizó estancias de investigación en Alstom Grid (Reino Unido, 2013) y fue profesor visitante en ETH Zúrich, Suiza (2021). Es miembro senior del IEEE y participa en varios grupos de trabajo CIGRE y CENELEC relacionados con convertidores HVDC y sistemas de potencia. Su investigación se centra en la generación renovable, control de convertidores HVDC, y sistemas dominados por electrónica de potencia. Ha colaborado en proyectos nacionales e internacionales y con empresas líderes en el sector. Es coautor de patentes y publicaciones científicas en integración de energía renovable y HVDC. Actualmente coordina el máster InnoEnergy en Redes Eléctricas Inteligentes en la UPC. Imparte cursos en colaboración con KTH y ETH, y organiza cursos sobre electrónica de potencia.

Oriol Gomis Bellmunt

Prof. Oriol Gomis Bellmunt recibió el título de ingeniería industrial de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB), Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona, España, en 2001 y el doctorado en ingeniería eléctrica por la UPC en 2007 (con Mención Europea y Premio Extraordinario de Doctorado). En 1999 se unió a Engitrol donde trabajó como ingeniero de proyectos en la industria de automatización y control. En 2003 desarrolló parte de su tesis doctoral en el DLR (Centro

Aeroespacial Alemán) en Braunschweig (Alemania). Desde 2004 está en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la UPC donde es Profesor y participa en el grupo de investigación CITCEA-UPC. De 2009 a 2016 también estuvo en el Instituto de Investigación de Energía de Cataluña (IREC), donde fue líder del grupo de sistemas de potencia. Ha participado en numerosos proyectos industriales y de investigación. Fue uno de los fundadores de la empresa TeknoCEA y eRoots, spin-offs de CITCEA-UPC. También ha desarrollado investigaciones relacionadas con plantas de energía eólica terrestres y marinas, plantas de energía solar fotovoltaica, modelado, simulación y control de sistemas de energía renovable, integración de renovables en la red y tecnologías y redes HVDC. Desde 2020, es Investigador de la Academia ICREA, y desde 2021 Miembro Fellow del IEEE.

Marc Cheah Mañé

Dr. Marc Cheah Mañé obtuvo el título de ingeniería industrial de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB), Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), Barcelona, España, en 2013, y el doctorado en ingeniería eléctrica de la Universidad de Cardiff, Cardiff, Reino Unido, en 2017. Obtuvo una beca de doctorado en la Universidad de Cardiff como parte de una Red de Formación Inicial Marie Skłodowska-Curie. Desde 2017 hasta 2020, fue investigador postdoctoral en CITCEA-UPC y desde 2018 hasta 2020 también ha sido profesor adjunto en la UPC. Desde 2020 es profesor con una beca Serra Hunter en el Departamento de Ingeniería Eléctrica de la UPC y continúa su actividad investigadora dentro de CITCEA-UPC. Además, es cofundador de eRoots, una empresa derivada (spin-off) de CITCEA-UPC especializada en herramientas innovadoras para el análisis de sistemas de energía modernos. Ha participado en varios proyectos competitivos e industriales relacionados con sistemas HVDC, interacciones en sistemas de potencia, electrónica de potencia, integración de eólica marina y PV a la red.

Josep Fanals i Batllori

Josep Fanals i Batllori obtuvo el grado de licenciatura en Ingeniería Eléctrica de la Escola Politècnica Superior (EPS), Universitat de Girona (UdG), Girona, España, en 2020, como el mejor estudiante universitario graduado de 2019-2020, y el grado de maestría en Ingeniería de la Energía, especialidad eléctrica, de la Escuela Técnica Superior de Ingeniería Industrial de Barcelona (ETSEIB), Universidad Politécnica de Cataluña (UPC), España, en 2022. En febrero de 2021 se unió al Centre d'Innovació en Convertidors Estàtics i Accionaments (CITCEA) trabajando como investigador en prácticas. En marzo de 2022 se incorporó a eRoots como ingeniero de desarrollo. Desde febrero de 2023 es el CEO de eRoots. Ha contribuido a paquetes de sistemas de potencia de código abierto como GridCal y Andes. Sus intereses incluyen herramientas numéricas para cálculos en estado estacionario de sistemas de potencia modernos.

Carlos Alegre Aldeano

Carlos Alegre Aldeano recibió un grado de licenciatura en Física de la Universitat de Barcelona, España, en 2022, y un grado de licenciatura en Ingeniería Industrial de la Universitat Politècnica de Catalunya

- ETSEIB, España, en 2022. Desde septiembre de 2023 está en eRoots trabajando en el desarrollo de un software AC-OPF escalable mediante un método de punto interior, que futuramente será usado como herramienta de cálculo en el departamento de planificación de Red Eléctrica. Tiene experiencia en el desarrollo de código abierto, como por ejemplo en GridCal.

6.3. Resumen

Cuadro 6.1. Resumen del equipo, con sus funciones en el proyecto, y correspondiente índice h.

Nombre completo	Índice h	Función en el proyecto
Eduardo Prieto Araujo	28	Supervisión, contacto con el BSC, asesoramiento en el modelado y operación de convertidores. En su trayectoria ha supervisado 3 tesis doctorales, está supervisando 18 tesis doctorales, ha sido coautor de 3 patentes, 97 publicaciones de artículos en revistas científicas y 68 artículos de conferencia.
Oriol Gomis Bellmunt	60	Asesoramiento técnico sobre los casos de uso a analizar. Ha sido supervisor de 17 tesis doctorales, coautor de 3 libros, 7 patentes y más de 170 publicaciones a revistas científicas.
Marc Cheah Mañé	16	Asesoramiento técnico sobre contingencias y aparición de inestabilidades. Ha sido coautor de 21 publicaciones en revistas científicas, 24 artículos de conferencia, y 1 capítulo de libro.
Josep Fanals i Batllori	-	Integración en la estructura de COLMENA, adaptación del código para simulaciones EMT
Carlos Alegre Aldeano	-	Definición de roles, indicadores, canales de comunicación, y adaptación del código para estudios estáticos

7. RESULTADOS E IMPACTO

Este capítulo resume el impacto que tendría el proyecto presentado anteriormente en caso de ejecutarse. El resultado del proyecto consistirá en una plataforma de testeo descentralizada que emule el comportamiento de la red eléctrica en tiempo real con tal de lograr obtener un algoritmo con el que los componentes del sistema logren reajustarse en caso de necesidad. Esto supondrá un antes y un después, fundamentalmente porque ahora la red eléctrica es altamente dependiente de un órgano central como el operador de red. Al reducir la dependencia con el operador, tal como propone la estructura de COLMENA, se espera generar un impacto no solo en el sector eléctrico sino también en la sociedad. En general, la ejecución del proyecto se considera que se alinea con el objetivo central de COLMENA de *agilizar el desarrollo, despliegue y gestión de servicios confiables a través de los dominios IoT, edge y cloud, así como proponer una arquitectura descentralizada, uniendo nodos autónomos en grupos dinámicos y colaborativos (enjambres)* [18].

A continuación se detallan los impactos.

7.1. Impacto en los operadores de red

La implementación de la estructura descrita en el proyecto COLMENA puede tener varios impactos significativos en los operadores de red eléctrica. Al promover una arquitectura descentralizada que utiliza la inteligencia de enjambre para la gestión y operación de la red eléctrica, se mejora la capacidad de respuesta ante fenómenos transitorios y se aumenta la flexibilidad operativa. La red se puede reconfigurar con facilidad sin requerir una entidad central que envíe señales a los componentes. Esto permite una integración más eficiente de recursos renovables distribuidos, optimizando el uso de convertidores de potencia para gestionar dinámicamente la red. Además, al facilitar la colaboración entre dispositivos autónomos, se pueden minimizar las pérdidas eléctricas y mejorar la estabilidad del sistema ante contingencias. Estos cambios podrían llevar a una operación de la red más resiliente, segura y eficiente en términos de costos, al tiempo que se facilita la adaptación a la creciente penetración de energías renovables (con la consecuente descarbonización).

7.2. Impacto en el sector eléctrico

La adopción de una estructura descentralizada como la de COLMENA en el sector eléctrico tendría impactos profundos y variados. Principalmente, porque tal como se ha presentado en el punto anterior, promovería una mayor integración de fuentes de energía renovable y distribuida, aumentando la eficiencia y la sostenibilidad del sistema. Este enfoque también mejoraría la resiliencia de la red frente a perturbaciones y fallos, gracias a la capacidad de tomar decisiones de manera autónoma y localizada. Los componentes distribuidos por el sistema ya no necesitarán actuar en función de señales enviadas por el operador, sino que serán suficientemente autónomos como para reconfigurarse delante perturbaciones. Se espera que esto implique cambios sustanciales en los códigos de red, es decir, en la normativa a seguir

para asegurar que una unidad generadora se pueda conectar a la red de muy alta tensión. Además, podría facilitar una gestión más dinámica de la demanda, adaptándose a las necesidades de consumo en tiempo real y promoviendo la participación activa de los consumidores en la gestión de la red. Se espera que este punto promueva la figura del agregador, una entidad que agrupa pequeños consumidores y generadores con el objetivo de proveer flexibilidad. En general, esto conduce a una operación más eficiente, segura y flexible del sistema eléctrico, preparándolo para los desafíos futuros del sector energético.

7.3. Impacto en la sociedad

La implementación de estructuras descentralizadas como COLMENA en el sector eléctrico se espera que tengan un profundo impacto social. Facilita la descarbonización al integrar eficientemente fuentes renovables, contribuyendo significativamente a la mitigación del cambio climático. La gestión y el monitoreo avanzados permiten una operación más eficiente de la red, lo que puede traducirse en una reducción de costos para operadores pero también para consumidores. Además, empodera a los consumidores para que participen activamente en la gestión energética, promoviendo el autoconsumo y la generación distribuida. Esta transformación podría también generar nuevos empleos, especialmente en áreas como la instalación y mantenimiento de tecnologías renovables y dispositivos IoT, gestión de datos energéticos, así como desarrollo de software para la integración y operación de sistemas descentralizados, abriendo un campo amplio para la innovación y el desarrollo económico sostenible.

7.4. Plan de difusión de los resultados del proyecto

Un plan de difusión se preparará durante los primeros seis meses del proyecto, con el objetivo de asegurar que la difusión de los resultados se realice tanto a nivel nacional como internacional. Este plan puede incluir la publicación de artículos en revistas, participación en congresos, organización de talleres para operadores de redes de transmisión y distribución, y potencialmente la creación de un sitio web del proyecto y perfiles en redes sociales para proporcionar actualizaciones frecuentes sobre avances y actividades. Igualmente, el algoritmo resultante será de código abierto para maximizar el beneficio societario.

7.5. Dimensión internacional del proyecto

El alcance de la propuesta está orientado hacia un entorno internacional, aplicable en cualquier tipo de red, en cualquier país, sin restricciones. Esto subraya el potencial de la estructura de COLMENA para ser aplicada globalmente, demostrando la capacidad y visibilidad internacional del consorcio. El personal que ha participado en este proyecto podría colaborar formando un *advisory board* para acelerar la implementación de la estructura en un entorno real.

8. DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA

8.1. Descripción

eRoots Analytics es una *startup* tecnológica basada en ofrecer servicios de consultoría y proporcionar soluciones de software en el contexto de los sistemas de energía modernos. La empresa surge de la investigación desarrollada en el CITCEA (Centro de Innovación Tecnológica en Convertidores Estáticos y Accionamientos) de la Universidad Politécnica de Cataluña, y se enfoca en comercializar las ideas desarrolladas en el centro durante la última década. La inclusión de mayores proporciones de energías renovables en la red plantea un desafío para la validez de los conceptos y métodos de cálculo tradicionales. El objetivo final de eRoots es estar en la vanguardia del desarrollo de herramientas para impulsar la transición hacia redes eléctricas altamente sostenibles.

8.2. Miembros clave: Eduardo Prieto Araujo, Oriol Gomis Bellmunt, Marc Cheah Mañé

Los cofundadores de eRoots han sido autores de más de 200 artículos publicados en revistas científicas y acumulan más de 15000 citas en total. Su competencia ha sido transferida a eRoots ya que tienen un papel activo en el desarrollo de productos de *software* y supervisión de proyectos de ingeniería. eRoots posee dos patentes europeas como consecuencia de su actividad.

8.3. Experiencia en proyectos

En el lado de los servicios de ingeniería, eRoots se especializa en cuatro dominios: 1) Apoyo a estudios eléctricos para redes de energía renovable, 2) Análisis de estabilidad y dinámica de sistemas de potencia modernos, 3) Servicios de soporte de ingeniería para estudios de sistemas HVDC y FACTS, 4) Herramientas de planificación de electrificación para sistemas aislados. La empresa posee aptitudes en el uso de programas de *software* populares como PSS/E, PowerFactory, PSCAD, EMTP-RV, entre otros. En este ámbito, se han realizado proyectos para empresas como GE Wind, Nidec, TeknoCEA, Engie, etc.

Por otro lado, la actividad de desarrollo de *software* de eRoots se centra en el tratamiento de las no linealidades que surgen debido a la integración de convertidores de potencia. Los convertidores deben limitar cuidadosamente su corriente inyectada para evitar ser dañados. Los métodos para analizar sistemas basados en generadores síncronos son bien conocidos por la comunidad científica y la industria, sin embargo, ya no son aplicables a sistemas con penetraciones moderadas de energías renovables. eRoots cambia esta realidad entregando herramientas de *software* finamente ajustadas que modelan correctamente los convertidores de potencia. La limitación de corriente inherente de los convertidores es de mayor importancia durante el análisis de cortocircuito, ya que es probable que operen a su corriente máxima en estas circunstancias. eRoots ha escrito PESSOL (Power Electronics Static Solver), un *software* capaz de integrar modelos de PSSE y PowerFactory que simula con precisión faltas de cortocircuito considerando las particularidades de los convertidores. En el ámbito de desarrollo de código, se han conseguido proyec-

tos con Schneider Electric, Redeia y RTE, siendo estos dos últimos los operadores de la red de transporte española y francesa respectivamente.

9. CONCLUSIÓN

El proyecto descrito en el presente documento tiene como objetivo principal desarrollar una plataforma de pruebas descentralizada que emula el comportamiento en tiempo real de la red eléctrica. Esta plataforma pretende permitir que los componentes del sistema se ajusten según sea necesario, lo que representa un cambio significativo respecto al enfoque actual de gestión centralizada dominado por los operadores de la red. La estructura de COLMENA busca reducir la dependencia de las entidades centrales, lo que en el ámbito eléctrico promovería una operación de la red más resiliente, eficiente y autosuficiente.

El plan de implementación descrito en el documento detalla una serie de actividades que van desde la conceptualización inicial y la modelización de la red hasta el desarrollo y despliegue de algoritmos para la gestión dinámica de la red. Este plan incluye tareas como la definición de elementos de la red, roles, comunicaciones y los indicadores clave de rendimiento (KPIs), así como la programación para condiciones de simulación tanto transitorias como en estado estacionario.

A través de varios estudios de caso, incluyendo la instalación/eliminación de elementos y la gestión de contingencias, se ilustra la capacidad de la plataforma para adaptarse a los cambios y mantener la operación bajo diversas condiciones. Se estima estudiar el sistema mediante herramientas de código abierto como GridCal y ParaEMT, que serán integradas juntamente con la ayuda del personal del BSC.

El documento discute el impacto anticipado del proyecto en los operadores de red, el sector eléctrico y la sociedad en general. Destaca el potencial para mejorar la flexibilidad operativa, la integración mejorada de fuentes de energía renovable y una respuesta más veloz a las perturbaciones de la red. Además, se espera que el proyecto contribuya a la descarbonización del sector energético y pueda fomentar un papel más participativo para los consumidores a través de la gestión descentralizada de la energía.

Estas conclusiones reflejan la naturaleza integral del proyecto, destacando su enfoque innovador hacia la gestión de la red, los posibles impactos en varios actores y su alineación con los objetivos de sostenibilidad. El enfoque en operaciones descentralizadas, integración de energías renovables y mejora de la resiliencia de la red presenta una visión progresista para el futuro de los sistemas energéticos, y en particular el eléctrico.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Y. Wang, N. Zhang, C. Kang, M. Miao, R. Shi y Q. Xia, “An efficient approach to power system uncertainty analysis with high-dimensional dependencies,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 33, n.º 3, págs. 2984-2994, 2017.
- [2] D. Osipov y K. Sun, “Tensor decomposition based adaptive model reduction for power system simulation,” en *2020 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, IEEE, 2020, págs. 1-5.
- [3] R. Margarit Sol, “Digital Twins of Power Grids: Communications and Implementation,” Tesis de máster, Universitat Politècnica de Catalunya, 2023.
- [4] B. Hakavik y A. Holen, “Power system modelling and sparse matrix operations using object-oriented programming,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 9, n.º 2, págs. 1045-1051, 1994.
- [5] J. Arévalo-Soler, M. Nahalparvari, E. Prieto-Araujo, O. Gomis-Bellmunt y S. Norrga, “Dynamic Converter Control Role Configuration in Grid of Grids,” en *2023 25th European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'23 ECCE Europe)*, IEEE, 2023, págs. 1-9.
- [6] A. Birchfield, *ACTIVSg2000: 2000-bus synthetic grid on footprint of Texas*, 2019.
- [7] D. Pattabiraman, R. Lasseter y T. Jahns, “Comparison of grid following and grid forming control for a high inverter penetration power system,” en *2018 IEEE Power & Energy Society General Meeting (PESGM)*, IEEE, 2018, págs. 1-5.
- [8] D. B. Rathnayake, M. Akrami, C. Phurailatpam et al., “Grid forming inverter modeling, control, and applications,” *IEEE Access*, vol. 9, págs. 114 781-114 807, 2021.
- [9] A. Azari y C. Cavdar, “Self-organized low-power IoT networks: A distributed learning approach,” en *2018 IEEE Global Communications Conference (GLOBECOM)*, IEEE, 2018, págs. 1-7.
- [10] N. Fan, R. Chen y J.-P. Watson, “N-1-1 contingency-constrained optimal power flow by interdiction methods,” en *2012 IEEE Power and Energy Society General Meeting*, IEEE, 2012, págs. 1-6.
- [11] Cinco Días. “El apagón estadounidense deja 6.000 millones en pérdidas, según WSJ.” (2003), dirección: https://cincodias.elpais.com/cincodias/2003/08/18/economia/1061342605_850215.html (visitado 19-02-2024).
- [12] I. Džafić, H.-T. Neisius, M. Gilles, S. Henselmeyer y V. Landerberger, “Three-phase power flow in distribution networks using Fortescue transformation,” *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 28, n.º 2, págs. 1027-1034, 2012.
- [13] M. Xiong, B. Wang, D. Vaidhynathan et al., “ParaEMT: An Open Source, Parallelizable, and HPC-Compatible EMT Simulator for Large-Scale IBR-Rich Power Grids,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, 2023.
- [14] OPAL-RT. “HyperSym. The Power System Simulator of Tomorrow.” (2024), dirección: <https://www.opal-rt.com/systems-hypersim/> (visitado 20-02-2024).
- [15] DPSIM. “Real-time power system simulator including powerflow, (dynamic) phasors and EMT.” (2024), dirección: <https://github.com/sogno-platform/dpsim> (visitado 20-02-2024).
- [16] S. Vera, *Gridcal-research oriented power systems software*, 2018.

- [17] E. Prieto Araujo, J. G. Bergas Jane, J. Rull Duran, J. Amoros Torrent, E. J. Piedad y V. Albernaz Lacerda Freitas, *Gemelo digital de alta precisión habilitado por computador de altas prestaciones para aplicaciones de sistema eléctrico modernas*, 2022.
- [18] BSC. “COLMENA: COLaboración entre dispositivos Mediante tecnologia de ENjAmbre.” (2024), dirección: <https://www.bsc.es/ca/research-and-development/projects/colmena-colaboraci%C3%B3n-entre-dispositivos-mediante-tecnologia-de> (visitado 20-02-2024).