

Producción, control y gestión distribuida de energía: una revisión de terminología y enfoques habituales

Jerónimo Ramos-Teodoro*, Francisco Rodríguez

Departamento de Informática, CIESOL-ceiA3, Universidad de Almería, Ctra. Sacramento s/n, 04120 Almería, España.

To cite this article: Ramos-Teodoro, J., Rodríguez, F. 2022. Distributed production, control and management of energy: a review of terminology and common approaches. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 19, 233-253. <https://doi.org/10.4995/riai.2022.16497>

Resumen

Durante las últimas décadas, las líneas de investigación relacionadas con la producción distribuida y la gestión energética han dado lugar a la introducción de términos nuevos que aluden a sistemas de producción continuos y su diseño óptimo, planificación, control o modelado. Aunque algunos de estos se han originado en el campo del análisis y operación de la red eléctrica, y su posterior extensión a otras fuentes de energía, todos comparten algunos rasgos comunes que permiten su estudio desde una perspectiva holística. En este artículo, se lleva a cabo una revisión de diferentes enfoques actuales con el objetivo de ofrecer una visión global y sencilla del estado actual de estos conceptos a los lectores. Para ello, primero se definen los elementos más significativos presentes en las publicaciones: terminología empleada, contexto, propósito, tratamiento matemático, estrategias de optimización y herramientas. Esto ha servido para analizar y clasificar, de forma tabular, algunos artículos seleccionados a partir del impacto de la revista, su número de citas y el uso de ciertos términos que han surgido en el ámbito de los sistemas de energía distribuidos, a fin de dilucidar posibles nichos de investigación en este tema en relación con las técnicas de simulación, control y optimización usuales. Las principales conclusiones ponen de manifiesto una escasa realización de experimentos en instalaciones reales y una generalizada omisión de criterios medioambientales, cuando se trata del diseño y operación de este tipo de sistemas.

Palabras clave: microrredes, centrales eléctricas virtuales, concentradores de energía, sistemas multienergía, multigeneración distribuida, reparto económico, gestión de energía, control predictivo basado en modelo, control y planificación.

Distributed energy production, control and management: a review of terminology and common approaches

Abstract

Over the last few decades, lines of research related to distributed generation and energy management have given rise to the introduction of novel terms referring to continuous production systems and their optimal design, scheduling, control, or modelling. Although some of those ones emerged in the field of power grid analysis and operation, and their later extension towards other energy sources, all they share some common features and hence can be studied from a holistic perspective. In this paper, a review of different ongoing approaches is performed, aimed at offering a global and straightforward view of the state-of-the-art concepts to readers. In order to do so, the most remarkable elements that can be found in publications—employed terminology, context, research purpose, mathematical treatment, optimisation strategies, and tools—are first defined and characterised. This helped to analyse and classify, in tabular form, some articles selected according to the impact of the journal, their number of cites and the use of certain terms that emerged in the ambit of distributed energy systems, in order to find possible research gaps in this topic in relation the usual simulation, control, and optimisation techniques. The main conclusions evidence a scarce realisation of applied testing in real-world facilities and a broad neglect of environmental criteria, when it comes to designing and operating this kind of systems.

Keywords: microgrids, virtual power plants, energy hubs, multi-energy systems, distributed multi-generation, economic dispatch, energy management, model-based predictive control, control and scheduling.

*Autor para correspondencia: jeronimo.rt@ual.es

1. Introducción

La políticas energéticas más recientes, especialmente a nivel europeo (Klessmann et al., 2011), han perseguido fomentar el uso de energía eficiente, limpia y segura a la par que el desarrollo de una red eléctrica inteligente (Farhangi, 2010). Tales propósitos han suscitado mucho interés en la comunidad científica, como refleja el creciente número de publicaciones relacionadas con la gestión energética que buscan incrementar la eficiencia en los procesos de producción, transporte, consumo y almacenamiento, reduciendo, por ejemplo, el número de conversiones desde las fuentes primarias a los puntos de consumo (Ghedamsi and Aouzellag, 2010). Para alcanzar estos objetivos, se han propuesto enfoques basados en la descentralización y distribución de los citados procesos (Ehsan and Yang, 2018), incluyendo el uso de fuentes de energía renovables (RES), y la combinación de diferentes vectores energéticos para aprovechar la sinergia de los recursos e infraestructuras localmente disponibles (Chicco and Mancarella, 2009).

De hecho, el término «inteligente» en red inteligente alude al uso de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC), así como al control de procesos y la automatización en la toma de decisiones, para operar de forma óptima redes eléctricas distribuidas (Farhangi, 2010). Aunque algunas de estas técnicas no se aplican exclusivamente en el sector de la electricidad —la industria petroquímica ha empleado el control predictivo basado en modelo (MPC) desde finales del pasado siglo (García et al., 1989)— su uso a gran escala y entre diferentes productores se encuentra en un estado todavía poco maduro, puesto que «los sectores energéticos han estado tradicionalmente desacoplados desde los puntos de vista operacional y de planificación» (Mancarella, 2014). A partir del análisis de Mancarella y de otros estudios hasta la fecha, las publicaciones con contribuciones en este campo han introducido una variedad de conceptos diferentes para referirse a lo que pueden denominarse sistemas de producción distribuidos (DPS). Esos artículos comparten elementos como objetivos de la investigación, técnicas, metodologías, herramientas, etcétera, pero el enfoque de la mayoría de las revisiones distingue el término empleado para referirse al DPS, lo cual supone una oportunidad para su análisis en una revisión actualizada en la que se traten esos términos de forma conjunta, poniendo de manifiesto sus similitudes.

En este sentido, un «sistema de producción» se define a menudo desde el punto de vista empresarial como «un conjunto de personas, equipamiento y procedimientos organizados para llevar a cabo los procesos de fabricación de una compañía (u otro tipo de organización)» (Groover, 2015). Se trata pues de un concepto genérico que abarca desde las instalaciones físicas y su distribución en planta hasta los recursos humanos y materiales que requieren las operaciones de producción. Aunque la mayoría de la terminología mencionada en este trabajo se originó en el contexto energético, es posible hablar de «sistemas de producción» considerándose una definición algo más laxa de los mismos. En efecto, los procesos de fabricación consisten en

la transformación de unos recursos materiales o energéticos de entrada en otros recursos de salida diferentes, incrementándose su valor cuantificable en términos económicos, físicos, utilitarios, etc. Dado que esta transformación no tiene por qué necesariamente realizarse por una industria, la actividad productiva puede contextualizarse en un amplio rango de elementos (a nivel nacional, regional, de distrito, de vivienda...), de forma similar a la propuesta de Mancarella (2014) cuando se refiere a sistemas multienergía (MES). Por tanto, en este artículo se entenderá como sistema de producción «cualquier dispositivo o entidad donde se transforman recursos materiales o energéticos». Nótese la importancia de esta consideración, dado que la clasificación propuesta más adelante es extensible a otros sistemas de producción continuos (e incluso discretos) distintos de los que se hallan exclusivamente en el sector energético.

Existe abundante literatura basada en la definición previa de sistema de producción que sería intratable en una revisión completa, por lo que, para el propósito de este trabajo, solo se ha incluido una muestra de artículos que los autores consideran representativa. Esta está ceñida principalmente, aunque no exclusivamente, a artículos que mencionan en su título o palabras clave algunos de los términos aplicables a los DPS en el ámbito energético, de acuerdo con la visión de Chicco y de Mancarella (Chicco and Mancarella, 2009; Mancarella, 2014). La Figura 1 ilustra la tendencia creciente durante el presente siglo en una gráfica con doble eje vertical que distingue entre el número de artículos relacionados con los términos de interés. En el eje vertical derecho, se muestran los relativos a microrredes (MG) y en el izquierdo los relativos al resto de términos: sistemas multienergía (MES), concentradores de energía (EH), y centrales eléctricas virtuales (VPP). El análisis de algunas de las citas de los artículos ha resultado en la extracción de palabras clave adicionales que se han empleado a su vez en la búsqueda de nuevas publicaciones (en lugar de los cuatro términos anteriores) y que se recopilan al final de la sección 3. Para cada una de las palabras clave empleadas, se ha limitado a veinte el número de artículos seleccionados como muestra y, asimismo, se han priorizado los artículos en revistas con un alto factor de impacto o pertenecientes al primer cuartil del JCR, junto con aquellos publicados en los últimos 5 años o con un importante número de citas.

Así pues, las contribuciones de este artículo de revisión pueden resumirse en la siguiente lista.

- Recopilar publicaciones específicas sobre sistemas de producción distribuida en el campo de la energía, en los que destaca una alta presencia de renovables, y proponer un esquema de clasificación de ayuda para tener una perspectiva global de la terminología empleada, contexto y propósito de la investigación, modelos matemáticos, técnicas de optimización y herramientas informáticas (software y lenguajes de programación).
- Proveer una revisión actualizada que abarca los siguientes enfoques de forma conjunta: microrredes, centrales eléctricas virtuales, concentradores de energía y sistemas multienergía.

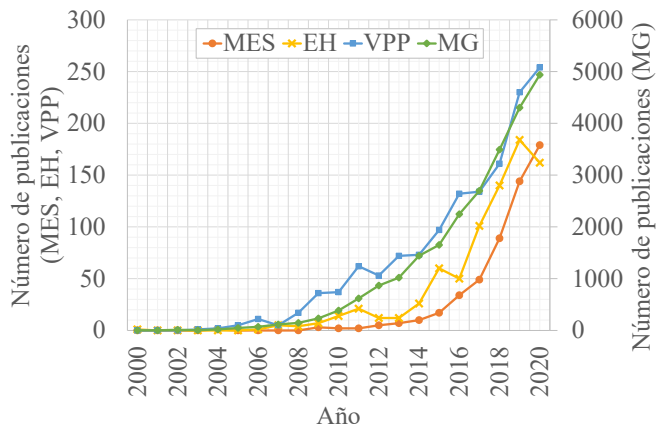


Figura 1: Artículos publicados desde el año 2000 al 2020 que incluyen en su título o palabras clave los términos microrred (MG), sistemas multienergía (MES), concentradores de energía (EH), o centrales eléctricas virtuales (VPP). Fuente: base de datos de Scopus (Burnham, 2006)

- Introducir brevemente la historia de cada uno de los términos citados en el párrafo anterior y sus principales artículos de revisión (una revisión de revisiones).
- Clasificar una serie de artículos a partir del esquema propuesto y analizarlos para identificar nichos de investigación en este tema.

Este artículo está organizado de la siguiente forma: la sección 2 caracteriza una serie de términos necesarios para llevar a cabo el análisis bibliográfico; la sección 3 incluye las referencias clasificadas de forma tabular según los elementos descritos en la sección 2 y está subdividida entre enfoques, de manera que cada subsección contiene una breve introducción con la definición del término, sus principales artículos de revisión y las contribuciones más importantes del resto de publicaciones; la sección 4 sintetiza las ideas de los autores y dilucida posibles líneas de investigación futuras en el campo de los DPS.

2. Caracterización de la terminología

Antes de definir las características que diferencian la propuesta de cada uno de los artículos analizados, la Figura 2 presenta un diagrama que sirve de guía a los lectores para entender y resumir el contenido de esta sección. A grandes rasgos, contiene los elementos que conforman las cabeceras de las tablas empleadas en la sección 3, en la que se clasifican los citados artículos, y una lista no exhaustiva de los atributos de cada columna. Toda la información del diagrama se complementa a continuación, mientras que en la sección de conclusiones se discutirá acerca de la clasificación propuesta.

2.1. Contexto

El contexto puede comprender una serie de aspectos (técnicos, geográficos, sociales, culturales, económicos, legales...) lo suficientemente amplia como para dificultar su síntesis en una descripción breve de la situación y estatus de un sistema

de producción. Siguiendo un enfoque holístico, algunos autores hacen referencia a las denominadas «perspectivas» espaciales, multicombustible, multiservicios y reticular de los sistemas multienergía (Mancarella, 2014). Otras revisiones incluyen dispositivos de almacenamiento y conversión y el tipo de recursos del sistema como el elemento principal del análisis, el cual define el contexto (Mohammadi et al., 2017a; Sadeghi et al., 2019).

Para simplificar y uniformizar el análisis, en este trabajo, el sector de actividad, la localización y/o la escala serán considerados para contextualizar cada artículo. Atendiendo al primero, las instalaciones de un DPS pueden ser de tipo industrial, comercial, residencial, agrario, por citar algunos ejemplos, o incluso agrupar varios de estos tipos. Con respecto a la localización, además de proporcionar una definición unívoca en términos geográficos, puede servir para definir la escala del sistema, que puede abarcar plantas, distritos, ciudades, regiones o países. Aunque estos tres factores pueden no mencionarse explícitamente en la columna contexto de las siguientes tablas — algunos trabajos, por ejemplo, se desarrollan sobre sistemas de ensayos predefinidos sin ubicación específica— la descripción proporciona una visión general del entorno de experimentación e incluye, siempre que sea posible, la localización exacta.

2.2. Alcance

Otro de los elementos de análisis, que forma parte del denominado «alcance», es el objetivo, distinguiendo al menos cuatro posibilidades que en ocasiones están íntimamente relacionadas: diseño, planificación, control y modelado. El problema objeto de cada trabajo pertenece a una de esas categorías cuyas relaciones y concepción se explica con mayor detalle a continuación.

- **Diseño.** Determinar la dimensión y la disposición de los elementos que componen un sistema de producción es un problema recurrente en ingeniería que normalmente se aborda a través de diferentes niveles de abstracción en función de la aplicación. En términos prácticos, incluye la selección de dispositivos (reactores, generadores, calderas, turbinas...) y de las redes de transmisión. En este sentido, el «plan de expansión» es uno de los términos recientemente acuñados dentro del ámbito de los sistemas multienergía (Dagoumas and Koltzakis, 2019). Con respecto a su relación con los otros objetivos, algunos de los análisis llevados a cabo incluyen la simulación de escenarios en los que la operación del sistema se planifica, durante un intervalo de tiempo determinado, para obtener un conjunto de posibles alternativas de entre las que escoger la mejor (Evins, 2015). Para ello es indispensable contar con modelos que pueden ser también objeto del análisis del mismo estudio.
- **Planificación.** Responde a la pregunta sobre cómo un sistema de producción debería operarse a lo largo del tiempo, incluyendo, por ejemplo, el punto de operación de los equipos, las tareas de mantenimiento y la gestión de alarmas. Está relacionado con objetivos de control, como se explica en el siguiente párrafo, con el que en ocasiones aparece simultáneamente. En Ingeniería de Control, las acciones (entradas) que afectan al sistema pueden depender del proceso de planificación que se lleva a cabo en un nivel jerárquicamente superior, lo que muchos autores denominan «optimización en tiempo real» (RTO). Este término se usa indistintamente para

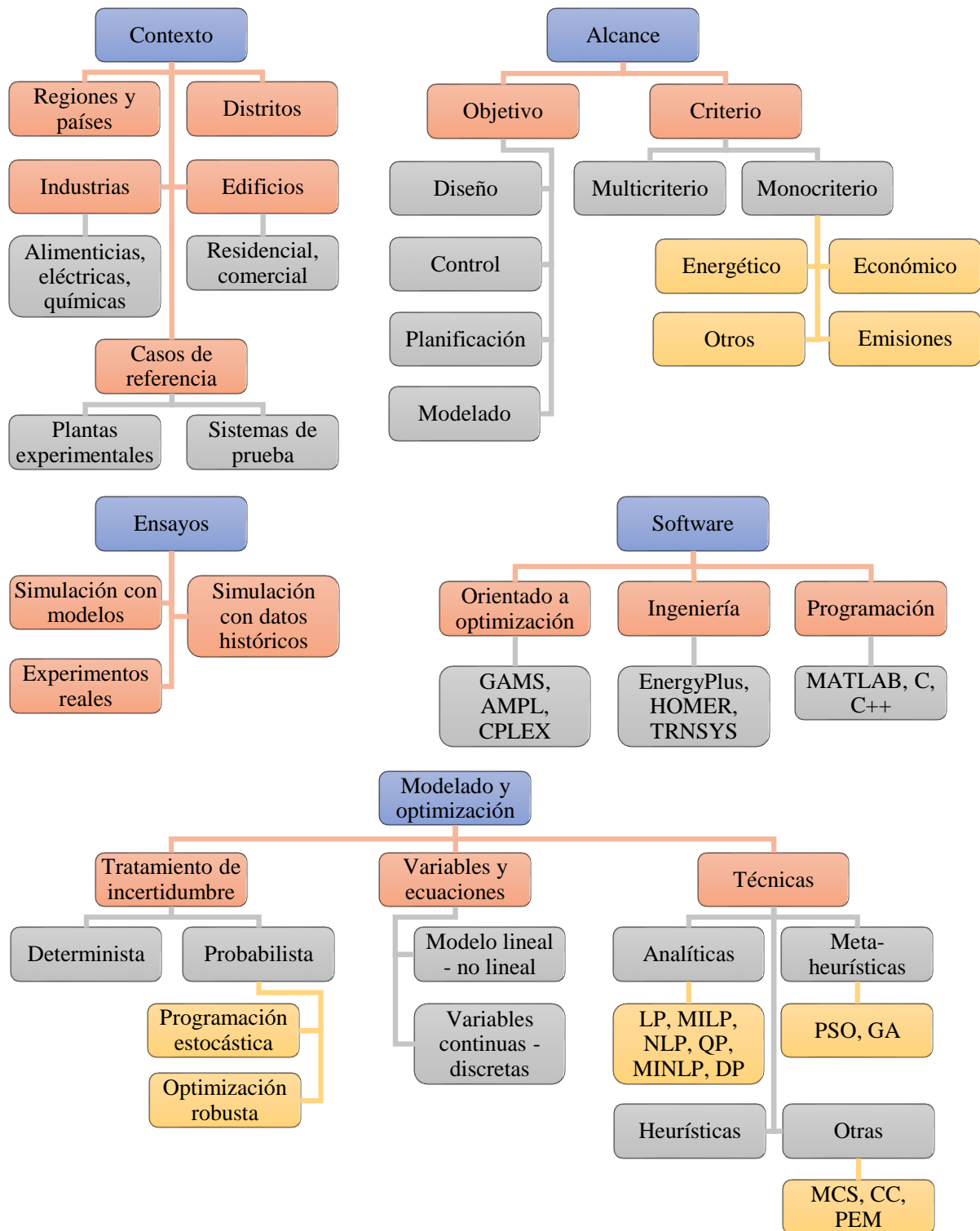


Figura 2: Diagrama de clasificación, de acuerdo con la caracterización propuesta en la sección 2. El código de colores se emplea como ayuda para distinguir los distintos niveles y las dependencias jerárquicas.

la gestión de la producción (Rodríguez-Blanco et al., 2018) o la distribución de recursos durante tareas de mantenimiento (Rodríguez-Blanco et al., 2018), aunque otros autores se refieren a esto mismo como la capa de supervisión (Vergara-Dietrich et al., 2019).

- **Control.** Responde a la misma pregunta que el objetivo anterior, aunque normalmente para escalas de tiempo menores y, en especial, mediante la realimentación del sistema, como se explica a continuación. A pesar de que la idiosincrasia de la planificación y el control podrían discutirse con mayor profundidad, el criterio que se emplea en este trabajo para diferenciar ambos objetivos se basa en determinar si en el artículo se emplea un enfoque en bucle cerrado (control), es decir, existe realimentación con información del sistema que se emplea para actualizar las señales de control periódicamente; o en bucle abierto (planificación), en el caso de que las acciones de control no se actualicen con la mejor información disponible en cada instante de tiempo.
- **Modelado.** Aunque los modelos se emplean en trabajos cuyo objetivo se encasilla en alguna de las categorías descritas anteriormente, en otras situaciones la propuesta es lo suficientemente sustancial como para presentar únicamente una descripción detallada del comportamiento del sistema, la cual se ha de validar o justificar de forma adecuada. Esto concierne tanto modelos conceptuales (tales como arquitecturas de control o comunicación), que persiguen ilustrar la estructura e interacciones del sistema de una manera esquemática (Fabrizio et al., 2017); como modelos con un alto grado de exactitud, que involucran, por ejemplo, ecuaciones diferenciales algebraicas y métodos computacionales. En el segundo caso, los modelos resultantes son especialmente útiles para llevar a cabo simulaciones que ayuden a entender la dinámica del sistema y para tomar decisiones basadas en estas, como han ejemplificado algunos autores (Evins, 2015).

Además del objetivo, otro factor importante a tener en cuenta es el criterio de acuerdo con el cual se desarrolla el estudio o, en otras palabras, las consideraciones que se realizan para elegir entre diseños, acciones de control o planes alternativos. Aunque el criterio económico normalmente prevalece sobre los demás, existen casos en los que se aplican criterios medioambientales, como la emisión de dióxido de carbono generada por una actividad (Orehounig et al., 2015), basados en el uso de energía primaria (Bozchalui et al., 2015) o renovable (Fabrizio et al., 2017), o que emplean una mezcla de criterios (Gabrielli et al., 2018). Estos a su vez pueden ser el resultado de relaciones complejas y, por ejemplo, en el criterio económico de un estudio pueden evaluarse desde los costes de operación y mantenimiento hasta los costes de inversión (Mohammadi et al., 2018). No obstante, para tratar de uniformizar la clasificación de los trabajos, se empleará una descripción sencilla atendiendo principalmente a los criterios energético, económico, medioambiental, de emisiones y a una mezcla de criterios.

2.3. Modelado y optimización

Muchos autores utilizan modelos matemáticos y plantean problemas de optimización en sus investigaciones cuya clasificación merece especial atención a la hora de comparar diferentes enfoques. Una vez determinadas las variables que definen

las condiciones de operación del sistema, tanto la función objetivo, que se define a partir del alcance del estudio (objetivo y criterio), como las restricciones, que representan el comportamiento del sistema, determinan el tipo de problema que se ha de resolver. La web Neos Server (Czyzyk et al., 1998; Dolan, 2001; Gropp and Moré, 1997) contiene información de gran utilidad para el público no experto sobre la taxonomía de la optimización, en la que se presentan cuatro facetas principales: naturaleza continua frente a discreta, problemas con o sin restricciones, función objetivo mono o multiobjetivo, y análisis determinista frente a estocástico. De estas, la primera y la última son de especial interés debido a que la mayoría de los modelos revisados emplean restricciones para representar apropiadamente la dinámica de los sistemas reales y a que la función objetivo se determina a partir del criterio (según su descripción anterior). Así pues, para los trabajos analizados, solo se especificará el tratamiento de la incertidumbre que realizan los autores (si es un enfoque determinista o probabilista/estocástico) y la continuidad o no del modelo (si no emplea variables discretas o sí). Además de estos dos, otro factor relevante para la elección de las técnicas de resolución del problema planteado es la linealidad, distinguiendo entre modelos y ecuaciones lineales o no lineales. Asimismo, los lectores deben tener presente en lo sucesivo que para que un problema o modelo sea considerado no lineal basta con que contenga al menos una expresión no lineal, e ídem para la continuidad: se dice no continuo si incluye al menos una variable entera o discreta.

Por un lado, algunos modelos solo tienen sentido si las variables toman valores acotados de un conjunto discreto, normalmente un subconjunto de enteros, lo cual incluye, por ejemplo, variables binarias para la representación de estados de encendido/apagado de dispositivos. Esto es algo habitual en la literatura y presenta sus inconvenientes, debido a que los problemas de optimización discretos tienden a ser más costosos de resolver que los continuos en términos de computación. Por otro lado, dado que los modelos constituyen una simplificación de la realidad, los problemas se dividen en deterministas o probabilistas de acuerdo con el tratamiento de las variables sujetas a incertidumbre, como se indica a continuación. Nótese que la clasificación propuesta, puede complementarse con la de otros autores que cubren las principales fuentes de incertidumbres en los modelos (Mohammadi et al., 2017b).

- **Optimización determinista.** Existen problemas que no contienen variables aleatorias o estocásticas, es decir, en los que se asume un conocimiento exacto del estado de un sistema de producción, de manera que la función de coste se define y depende exclusivamente del valor de las variables de decisión del problema. En general, se distinguen tres familias de técnicas para resolver estos problemas: 1) analíticas, como la programación lineal (LP), la programación lineal cuadrática (LQP), la programación cuadrática (QP), la programación cónica de segundo orden (SOCP), la programación no lineal (NLP), la programación lineal entera mixta (MILP), la programación cuadrática entera mixta (MIQP), la programación cuadrática entera mixta restringida cuadráticamente (MIQCQP), la programación no lineal entera mixta (MINLP), o la programación dinámica (DP); 2) heurísticas, basadas en reglas prácticas para problemas específicos; y 3) metaheurísticas, que usan reglas generalistas para llegar a una

solución lo más cercana posible a la óptima y que incluyen, por ejemplo, los algoritmos genéticos (GA) o la optimización por enjambre de partículas (PSO). Debido a que las técnicas metaheurísticas generan puntos aleatorios para converger a una solución normalmente subóptima, algunos autores se refieren a estos algoritmos como optimización estocástica (Ombach, 2014), aunque dicha denominación tiene un significado diferente en este trabajo, como se define a continuación.

- Optimización probabilista o estocástica. Otros problemas contienen variables aleatorias que pueden expresarse mediante una función de densidad de probabilidad. En otras palabras: se asume una componente aleatoria o incertidumbre en el conocimiento del estado del sistema de producción y, por ello, el valor de la función de coste puede variar con independencia de las variables de decisión. Esta cuestión suele abordarse desde dos perspectivas claramente distinguibles: la programación estocástica (SP), si la incertidumbre se caracteriza mediante funciones de densidad de probabilidad, y la optimización robusta (RO), un enfoque más conservador en el que únicamente se considera información relativa a los límites entre los que un parámetro o variable puede tomar valores. En general, la optimización probabilista implica mayor complejidad y es la razón por la que, como primera aproximación, muchas técnicas propias de la optimización determinista se han adaptado para problemas estocásticos y algunos autores simplemente añaden una «P» de probabilista a los acrónimos anteriormente definidos (Zamani et al., 2016). Otras técnicas extendidas con nombre propio que se emplean en problemas con incertidumbre son las enunciadas a continuación: el modelado mediante procesos de decisión de Markov (MDP), simulaciones de Montecarlo (MCS), el análisis basado en el valor en riesgo condicional (CVaR), métodos de estimación puntual (PEM), y la reformulación del problema en uno determinista mediante restricciones probabilistas (CC).

2.4. Ensayos

Uno de los dos últimos aspectos a considerar es el tipo de ensayos realizados, atendiendo tanto al entorno en el que se han llevado a cabo (simuladores o entornos reales), como al origen de los datos empleados en el caso de las simulaciones, que normalmente suele ser modelos o conjuntos de datos estandarizados (proporcionados por organismos oficiales, grupos de investigación...), elementos hipotéticos (por ejemplo, variables climáticas que se asumen constantes), o medidas históricas de las instalaciones objeto de la investigación.

2.5. Software

Para terminar, los análisis de cada estudio se llevan a cabo mediante una amplia variedad de herramientas que incluyen entornos de programación y software ingenieril. En el primer caso, herramientas como CPLEX (IBM, 2019), GAMS (Bischoff and Meeraus, 1982) o AMPL (Fourer et al., 1989), emplean su propio lenguaje de optimización pensado para simplificar la definición de problemas de optimización; mientras que otras como MATLAB (The MathWorks, Inc., 2019), consisten en un lenguaje interpretado, utilizado en computación para diferentes propósitos (muchas veces relacionados con la ingeniería). En cualquier caso, dependiendo de las necesidades derivadas del problema tratado, es posible integrar algoritmos de

optimización de otros desarrolladores —sirvan de ejemplo Gurobi (Gurobi Optimization, LLC, 2019) o BARON (Sahinidis, 2019)— en las herramientas anteriores. Así pues, MATLAB puede usarse en combinación con YALMIP (Löfberg, 2004) o TOMLAB (Holmström et al., 2010) para facilitar la definición del problema de optimización, al ser la sintaxis de estas más cercana a la de herramientas como GAMS o AMPL. Con respecto al software específico de ingeniería, este suele incorporar el proceso de optimización de manera más bien opaca para el usuario, como es el caso de herramientas para el modelado, operación y planificación de MES como DER-CAM (Marnay et al., 2008), eTransport (Bakken et al., 2007), HOMER (Givler and Lilienthal, 2005), o EnergyPlus (Crawley et al., 2000), por citar algunas. En la siguiente sección pueden aparecer programas que no se han enumerado en esta debido a que solo se mencionan en uno o dos de los trabajos revisados. Para ampliar información, se refiere a los lectores a revisiones de este tipo de software centradas en entornos urbanos (van Beuzekom et al., 2015), distritos (Allegrini et al., 2015), y a una discusión sobre alternativas de código abierto (Groissböck, 2019).

3. Clasificación y análisis

Las publicaciones que se han analizado para extraer las características descritas previamente se recopilan en las Tablas 1 a 5, las cuales sirven para organizar la información de interés de este artículo. Nótese que en el título de cada tabla aparece la palabra clave empleada durante la búsqueda los artículos (MG, VPP, EH, y MES), aunque algunos de ellos pueden estar relacionados con más de uno de estos términos, o no estarlo con ninguno, en cuyo caso se incluyen en la categoría «otros términos» (Tabla 5). Por otra parte, téngase en cuenta que tanto el factor de impacto (JIF) como el cuartil (Q), están referidos a la revista y año de publicación, mientras que el número de citas se corresponde con el de cada artículo a fecha de enero de 2022, de acuerdo con la información que proporciona Clarivate Analytics. Para el cuartil se considera la categoría más favorable si la revista pertenece a más de una, mientras que para las publicaciones de 2021 y 2022 se toma el último índice de calidad publicado, correspondiente al año 2020.

3.1. Red inteligente y microrredes

De entre los términos aplicables a los sistemas de producción, el concepto de microrred (Hatziaargyriou et al., 2007) surgió para integrar la generación distribuida de energía y la planificación y operación de la red eléctrica (Braun and Strauss, 2008). Las microrredes pueden definirse como redes de distribución de medio y bajo voltaje en las que diferentes recursos energéticos han de ser gestionados de manera coordinada o aislada. Constituyen uno de los principales elementos de la futura red inteligente (Farhangi, 2010), cuya descentralización y gestión coordinada mejoraría el enfoque operacional tradicional. Se refiere a los lectores a las siguientes revisiones sobre este tema para más información: la primera está relacionada con el control y estrategias de gestión (Gu et al., 2014), la segunda aborda también el modelado y la planificación junto con las citadas estrategias (Mohammed et al., 2019) y la tercera analiza mercados, arquitecturas y tecnologías dentro de sistemas de energía transactivos (Zia et al., 2020).

Tabla 1: Clasificación de la literatura revisada sobre microrredes

Referencia	JIF Q Citas	Contexto	Alcance	Modelado y optimización	Ensayos	Software
(Vergara-Dietrich et al., 2019)	3,624 Q2 27	Industria azucarera (Brasil)	Control (MPC) Criterio energético	Probabilista, CC, QP	Simulación con clima y demanda históricos	MATLAB YALMIP CPLEX
(Fabrizio et al., 2017)	3,073 Q1 18	Agroindustria (Piamonte, Italia)	Planificación Multicriterio energético y uso de RES	Determinista, MILP + modelo conceptual	Ensayos reales	Software propio
(Bolzoni et al., 2021)	4,630 Q1 2	Microrred experimental con <i>hardware-in-the-loop</i> (Manchester, UK)	Control (MPC) Multicriterio económico y medioambiental	Determinista, MILP	Ensayos reales	MATLAB YALMIP CPLEX
(Marnay et al., 2008)	1,875 Q2 227	Edificios comerciales (San Francisco, US)	Diseño (planificación anual) Criterio económico	Determinista, MILP	Simulación con modelo de hotel y precio histórico	DER-CAM (GAMS + CPLEX)
(Ghaem Sigarchian et al., 2016)	3,444 Q1 25	Microrred comunitaria (Lesoto)	Diseño (planificación anual) Criterio económico	Determinista, no lineal, PSO	Simulación con modelo de demanda	u-Grid
(Kyriakarakos et al., 2011)	5,106 Q1 101	Áreas remotas (Mar Egeo, Grecia)	Diseño (planificación anual) Criterio económico	Probabilista, MINLP, PSO, MCS	Simulación con modelos	GenOpt TRNOpt TRNSYS
(Velarde et al., 2017)	6,945 Q1 44	Microrred experimental (Sevilla, España)	Control (MPC) Criterio energético	Determinista frente a probabilista	Ensayos reales	MATLAB GAMS
(Bordons et al., 2020)	1,202 Q4 6	Sistema basado en una microrred experimental (Sevilla, España)	Control (MPC) Multicriterio económico y energético	Determinista, QP, MIQP	Simulación con clima y demanda históricos	No mencionado
(Freire et al., 2020)	3,367 Q2 2	Vivienda (Brasil)	Control (MPC) Multicriterio económico y energético	Determinista, MIQP	Ensayos reales	MATLAB
(Zhang et al., 2015)	3,685 Q1 84	Edificio residencial (no localizado)	Control (MPC) frente a planificación Criterio económico	Determinista, MILP	Simulación con clima y demanda históricos	MATLAB YALMIP CPLEX
(Phurailatpam et al., 2018)	10,556 Q1 43	Aldea y edificio comercial (India)	Diseño (planificación anual) Criterio económico	Determinista	Simulación con clima y demanda históricos	HOMER
(Suman et al., 2021)	7,587 Q1 16	Tres áreas rurales (Bihar, India)	Diseño (planificación anual) Multicriterio económico y fiabilidad	Determinista, PSO híbrido	Simulación con clima histórico	MATLAB
(Firouzmakan et al., 2019)	5,286 Q1 37	Tres agentes diferentes (no localizado)	Planificación diaria Multicriterio económico y fiabilidad	Determinista frente a probabilista, PSO	Simulación con modelos	No mencionado
(Ali et al., 2020)	3,367 Q2 5	Cinco agentes diferentes (no localizado)	Planificación diaria Criterio económico	Determinista	Simulación con modelos	MATLAB
(Mehdi et al., 2020)	3,367 Q2 8	Seis unidades de generación distribuidas (no localizado)	Control Criterio energético	Probabilista, lineal, control robusto	Simulación con modelos	MATLAB YALMIP
(García-Torres et al., 2019)	8,827 Q1 13	Microrred con agentes externos (no localizado)	Control (MPC) Criterio económico	Determinista, MIQCQP, linealizado a trozos	Simulación con clima histórico	TOMLAB MATLAB CPLEX
(Torres-Moreno et al., 2018)	2,707 Q3 27	Microrred experimental (Almería, España)	Control Criterio energético	Determinista, lineal, reglas heurísticas	Simulación con clima y demanda históricos	MATLAB
(Gong et al., 2020)	3,367 Q2 47	Sistema IEEE de 33 barras (no localizado)	Planificación Criterio económico	Probabilista, MINLP, PEM	Simulación con modelos	No mencionado
(Mohamed et al., 2021)	4,630 Q1 26	Sistema IEEE de 16 barras (no localizado)	Planificación diaria Criterio económico	Probabilista, comparación metaheurística (GA, PSO,...)	Simulación con modelos	No mencionado
(Li et al., 2021)	7,587 Q1 9	Sistema IEEE de 16 barras (no localizado)	Planificación diaria Criterio económico	Probabilista, comparación metaheurística (GA, PSO,...)	Simulación con modelos	No mencionado

Aunque el concepto surgió en el ámbito de la energía eléctrica, su uso se ha extendido a sistemas que combinan diferentes tipos de energía como la cogeneración (Ghaem Sigarchian et al., 2016) o la trigeneración (Marnay et al., 2008) y, por ende, se han convertido en un tipo relevante de MES (Mancarella, 2014). Existen también ejemplos de microrredes que emplean recursos materiales como biomasa (Vergara-Dietrich et al., 2019), agua potable (Kyriakarakos et al., 2011) o hidrógeno (Velarde et al., 2017; Bordons et al., 2020).

El contexto de las aplicaciones también es bastante variado: microrredes experimentales (Bolzoni et al., 2021), edificios comerciales (Marnay et al., 2008), viviendas (Freire et al., 2020), áreas residenciales urbanas (Zhang et al., 2015) y rurales (Phurailatpam et al., 2018; Suman et al., 2021), industrias agroalimentarias (Fabrizio et al., 2017), y una mezcla de los anteriores (Firouzmakan et al., 2019). Otros campos de especial interés incluyen la gestión de microrredes en sus modos conectada a red y aislada (Ali et al., 2020; Mehdi et al., 2020), y la integración de vehículos eléctricos mediante control predictivo basado en modelo (García-Torres et al., 2019), control basado en reglas (Torres-Moreno et al., 2018) o estrategias de planificación que consideran incertidumbre (Gong et al., 2020; Mohamed et al., 2021; Li et al., 2021). La Tabla 1 recopila los artículos anteriormente citados, indicando sus características.

3.2. Centrales de energía virtuales

De manera similar, las VPP (Pudjianto et al., 2007) tienen su origen en la necesidad de gestionar determinados sistemas eléctricos y están constituidas por un conglomerado delimitado

de productores y consumidores que interactúan entre sí de manera que pueden emular el comportamiento de una única central de energía (de ahí el término virtual, dado que no constituyen una central verdaderamente). Es posible encontrar revisiones sobre su integración en el sistema eléctrico (Zhang et al., 2019) y el tratamiento de la incertidumbre en su modelado (Yu et al., 2019).

Hasta ahora, solo unos pocos estudios han incluido recursos en VPP distintos de la generación eléctrica, la cogeneración o la trigeneración (Mancarella, 2014). Aun así, es reseñable que algunos de estos incluyen redes de suministro térmicas (Zamani et al., 2016; Liang et al., 2019) o de gas natural (Ju et al., 2019), mientras que otras contribuyen a la formulación de estrategias de corto (Heredia et al., 2018; Wozabal and Rameseder, 2020) y medio plazo (Pandžić et al., 2013) para planificar la distribución de energía o tareas de mantenimientos (Sadeghian et al., 2019). Destacan también la realización de análisis tecno-económicos en sistemas distribuidos (Wang et al., 2020; Naval et al., 2020) y la propuestas de arquitecturas de gestión (Pasetti et al., 2018). Otras merecen atención por su enfoque para tratar la incertidumbre, empleando un CCGA (Baringo et al., 2019) o técnicas de optimización basadas en riesgo (Sadeghian et al., 2020; Vahedipour-Dahraie et al., 2020), por usar enfoques de planificación binivel (Wei et al., 2018; Kong et al., 2019; Koraki and Strunz, 2018; Foroughi et al., 2021), por establecer un sistema de agregación de recursos para la regulación en redes de distribución (Dall'Anese et al., 2018), y por mitigar los efectos de ciberataques mediante repartos de energía robustos (Li et al., 2018). La Tabla 2 recopila los artículos anteriormente citados, indicando sus características.

Tabla 2: Clasificación de la literatura revisada sobre centrales de energía virtuales

Referencia	JIF Q Citas	Contexto	Alcance	Modelado y optimización	Ensayos	Software
(Zamani et al., 2016)	7,182 Q1 105	VPP con cuatro zonas + energía térmica (Canadá)	Planificación diaria Criterio económico	Probabilista, MILP, PEM	Simulación con clima y demanda históricos	GAMS CPLEX
(Liang et al., 2019)	8,267 Q1 39	Sistema IEEE de 13 barras (no localizado)	Planificación diaria Multicriterio económico y basado en riesgo	Probabilista frente a determinista, MILP, CVaR	Simulación con demanda, clima y precios históricos	Gurobi
(Ju et al., 2019)	8,848 Q1 42	VPP con nueve nodos + gas (China)	Planificación diaria Multicriterio económico y basado en riesgo	Probabilista, RO, CC, MILP, CVaR	Simulación con clima y demanda históricos	GAMS CPLEX
(Heredia et al., 2018)	3,002 Q1 35	VPP con baterías (mercado eléctrico ibérico)	Planificación diaria e intradiaria Criterio económico	Probabilista, MILP	Simulación con demanda, producción y precios históricos	AMPL CPLEX
(Wozabal and Rameseder, 2020)	5,334 Q1 15	VPP operando en el mercado eléctrico (España)	Planificación diaria e intradiaria Criterio económico	Probabilista, DP, MDP, CVaR	Simulación con precios y producción históricos	MATLAB QUASAR Software propio
(Pandžić et al., 2013)	5,261 Q1 131	VPP (Condado de Šibenik, Croacia)	Planificación semanal Criterio económico	Determinista, MILP, escenarios con incertidumbre	Simulación con precios históricos y modelos	GAMS CPLEX
(Sadeghian et al., 2019)	2,862 Q1 16	Sistemas IEEE de 6 y 18 barras (no localizado)	Planificación del mantenimiento Criterio económico	Probabilista, MINLP, escenarios con incertidumbre, CVaR	Simulación con modelos	GAMS
(Wang et al., 2020)	9,746 Q1 21	VPP urbana (Melbourne, Australia)	Planificación Criterio económico	Determinista, MILP,	Simulación con demandas, precio y clima históricos	No mencionado

Tabla 2: Clasificación de la literatura revisada sobre centrales de energía virtuales (continuación)

Referencia	JIF Q Citas	Contexto	Alcance	Modelado y optimización	Ensayos	Software
(Naval et al., 2020)	8,001 Q1 21	Sistema de riego compuesto por estaciones de bombeo (Aragón, España)	Planificación anual Criterio económico	Determinista, MILP	Simulación con demandas y precios históricos	MATLAB
(Pasetti et al., 2018)	2,217 Q2 49	VPP hipotética (no localizado)	Planificación Multicriterio económico y de confort	Determinista, MILP	Modelo conceptual (sin ensayos)	Sugeridos CPLEX o Gurobi
(Baringo et al., 2019)	6,074 Q1 57	VPP (España)	Planificación diaria Criterio económico	Probabilista, RO adaptativa, CCGA	Simulación con precios históricos y modelos	GAMS CPLEX
(Sadeghian et al., 2020)	6,583 Q1 8	VPP hipotética (no localizado)	Diseño (planificación anual) Criterio económico	Probabilista, MINLP, escenarios con incertidumbre, CVaR	Simulación con modelos	GAMS KNITRO
(Vahedipour-Dahraie et al., 2020)	8,960 Q1 8	VPP hipotética de 15 barras (no localizado)	Planificación diaria Multicriterio económico y basado en riesgo	Probabilista, MILP, CVaR	Simulación con modelos	GAMS CPLEX
(Wei et al., 2018)	8,426 Q1 33	VPP comercial o residencial con 2100 sistemas HVAC (no localizado)	Planificación diaria Criterio económico	Determinista, binivel MIQCQP (MILP + NLP)	Simulación con modelos	TOMLAB MATLAB CPLEX SNOPT
(Kong et al., 2019)	8,848 Q1 27	Sistema IEEE de 9 barras (no localizado)	Planificación diaria e intradiaria Criterio económico	Determinista, QP	Simulación con modelos	No mencionado
(Koraki and Strunz, 2018)	6,807 Q1 93	Red de distribución Europea de referencia CIGRE MV (Alemania)	Planificación diaria e intradiaria Criterio económico	Probabilista (diario) y determinista (intradía)	Simulación con producción y demanda históricas	MATLAB Gurobi Matpower
(Foroughi et al., 2021)	4,630 Q1 6	VPP técnica en mercados de energía (no localizado)	Planificación diaria Criterio económico	Determinista, MINLP	Simulación con modelos	GAMS IPOPT
(Dall'Anese et al., 2018)	6,807 Q1 52	Sistema IEEE de 37 barras y VPP residencial/comercial (California, US)	Control (MPC) Criterio energético	Determinista, QP	Simulación con clima y demandas históricos	No mencionado
(Li et al., 2018)	7,377 Q1 44	Sistema IEEE de 123 barras (no localizado)	Control (MPC) Criterio económico	Determinista frente a probabilista	Simulación con modelos	MATLAB
(Alahyari et al., 2019)	3,762 Q2 30	VPP con vehículos eléctricos (no localizado)	Planificación diaria Multicriterio económico y basado en riesgo	Determinista y probabilista, LP, MCS, CVaR	Simulación con precios, producción y vehículos históricos	No mencionado

3.3. Concentradores de energía («energy hubs»)

El concepto de EH (Geidl et al., 2006) fue probablemente el primero capaz de considerar diferentes vectores energéticos, es decir, flujos energéticos y de materiales. Sus propulsores lo definieron como «la interfaz entre productores, consumidores y la infraestructura de transporte, la cual, desde el punto de vista de un sistema, define la relación entre las entradas, salidas, conversión y almacenamiento de los diferentes vectores energéticos» (Geidl and Andersson, 2007). Recientemente, dos amplias revisiones se han publicado sobre este tema (Sadeghi et al., 2019; Maroufmashat et al., 2019). Otros artículos han sido publicados con el objetivo de analizar aspectos un poco más específicos de los EH, como el tipo de elementos de conversión y los recursos (Mohammadi et al., 2017a), o la planificación óptima en presencia de incertidumbre (Mohammadi et al., 2017b).

Como este enfoque no estaba inicialmente circunscrito a los sistemas eléctricos, se ha usado en una amplia variedad de contextos, como el análisis energético (Brahman et al., 2015) y diseño (Evins, 2015) de edificios, el diseño (Wang et al., 2018) y redimensionamiento (Orehounig et al., 2015) de los sistemas de suministro a nivel de distrito, o la gestión de energía

en invernaderos (Bozchalui et al., 2015; Ramos-Teodoro et al., 2021), distritos residenciales (Zhong et al., 2018), países (Tahir et al., 2019) o EH interconectados (Mirzapour-Kamanaj et al., 2020). Con respecto a los principales avances, existen diferentes formulaciones que buscan mejorar la aptitud para representar sistemas reales, por ejemplo, empleando funciones linealizadas a tramos para sustituir modelos no lineales (Evins et al., 2014), incluyendo programas de respuesta a la demanda (Alipour et al., 2018), proponiendo un algoritmo de optimización que hace uso de un modelo general para EH (Beigvand et al., 2017), o reduciendo el número de variables requeridas para definir el problema (Ramos-Teodoro et al., 2018). Algunos autores incluso han propuestos enfoques híbridos entre MG y EH (Menezes Morato et al., 2017) y existen también ejemplos de aplicación de múltiples métodos para tratar la incertidumbre, como la optimización con restricciones probabilistas (Hou et al., 2020), la optimización estocástica (Jamalzadeh et al., 2020; Faraji et al., 2021), la optimización robusta (Parisio et al., 2012; Nosratabadi et al., 2021), y estrategias heurísticas (Batic et al., 2016). La Tabla 3 recopila los artículos anteriormente citados, indicando sus características.

Tabla 3: Clasificación de la literatura revisada sobre concentradores de energía

Referencia	JIF Q Citas	Contexto	Alcance	Modelado y optimización	Ensayos	Software
(Evins, 2015)	4,292 Q1 73	Edificios (Londres, UK)	Diseño (planificación anual) Multicriterio económico y de emisiones de CO ₂	Determinista, binivel, GA + MILP	Simulación con modelos y clima histórico	EnergyPlus AIMMS MATLAB CPLEX NSGA-II
(Orehounig et al., 2015)	5,746 Q1 180	Distritos, poblado con 29 edificios (Zernez, Suiza)	Diseño (planificación anual) Criterio de emisiones de CO ₂	Determinista, LP	Simulación con modelos y clima histórico	EnergyPlus MATLAB CPLEX
(Bozchalui et al., 2015)	3,190 Q1 57	Invernaderos (Ontario, Canadá)	Planificación diaria Comparación de criterios	Determinista, MILP + análisis de incertidumbre (MCS)	Simulación con demandas, precio y clima históricos	AMPL CPLEX
(Ramos-Teodoro et al., 2021)	2,847 Q3 1	Distrito agroindustrial (Almería, España)	Planificación diaria Criterio económico	Determinista, MILP	Simulación con demandas, precio y clima históricos	MATLAB ODEHubs
(Brahman et al., 2015)	2,973 Q1 267	Viviendas (no localizado)	Planificación diaria Comparación de criterios	Determinista, MILP	Simulación con modelos	GAMS CPLEX
(Wang et al., 2018)	8,426 Q1 104	Centro administrativo, distrito (Beijing, China)	Diseño (planificación diaria estacional) Criterio económico	Determinista, MILP	Simulación con clima y precios históricos	CPLEX Gurobi YALMIP MATLAB
(Zhong et al., 2018)	4,098 Q1 23	Cincuenta edificios residenciales (US)	Planificación diaria Criterio económico	Determinista, NLP, optimización por consenso	Simulación con clima y demanda históricos	No mencionado
(Tahir et al., 2019)	3,745 Q1 35	País (China)	Diseño (planificación anual) Criterio económico	Determinista, lineal, reglas heurísticas	Simulación con demandas históricas	EnergyPLAN
(Mirzapour-Kamanaj et al., 2020)	4,630 Q1 24	Sistema IEEE de 33 barras con cuatro EH (no localizado)	Planificación diaria Criterio económico	Determinista, MILP	Simulación con modelos	GAMS CPLEX
(Evins et al., 2014)	4,844 Q1 103	Edificio de oficinas (Zurich, Suiza)	Planificación semanal Criterio de emisiones de CO ₂	Determinista, LP frente a MILP	Simulación con modelos y clima histórico	EnergyPlus MATLAB CPLEX
(Alipour et al., 2018)	7,377 Q1 78	Tres EH hipotéticos (uno en Waterloo, Canadá)	Planificación diaria Criterio económico	Determinista frente a probabilista, PEM, MCS, MINLP	Simulación con demandas y precios históricos	GAMS SBB/CONOPT
(Beigvand et al., 2017)	7,900 Q1 95	Múltiples EH hipotéticos (no localizado)	Planificación Comparación de criterios	Determinista, no lineal, MINLP, PSO, GA y otros	Simulación con modelos	MATLAB
(Ramos-Teodoro et al., 2018)	8,426 Q1 14	Conglomerado industrial experimental (Almería, España)	Control (MPC) Criterio económico	Determinista, MILP	Simulación con demandas, precio y clima históricos	MATLAB
(Menezes Morato et al., 2017)	3,488 Q1 21	Industria azucarera (Brasil)	Control (MPC) Criterio energético	Determinista, binivel MIQP	Simulación con clima histórico	MATLAB YALMIP CPLEX
(Hou et al., 2020)	7,587 Q1 8	EH hipotético con vehículos eléctricos (no localizado)	Control (MPC) Criterio económico	Probabilista, MILP, CC	Simulación con modelos	No mencionado
(Jamalzadeh et al., 2020)	7,587 Q1 20	EH hipotético (no localizado)	Planificación diaria Multicriterio económico y energético	Probabilista, MILP, comparativa SP y RO	Simulación con modelos	GAMS CPLEX
(Faraji et al., 2021)	7,587 Q1 5	Múltiples EH hipotéticos (no localizado)	Planificación diaria Criterio económico	Probabilista, MILP, MCS	Simulación con clima y precio históricos	GAMS MATLAB CPLEX
(Parisio et al., 2012)	3,432 Q1 175	EH hipotético (Waterloo, Canadá)	Planificación diaria Criterio económico	Probabilista, MILP, RO	Simulación con modelos	CPLEX
(Nosratabadi et al., 2021)	7,587 Q1 4	EH hipotético (no localizado)	Planificación diaria Multicriterio económico y basado en riesgo	Probabilista, RO, MCS, MILP	Simulación con clima y precio históricos	GAMS DICOPT
(Batic et al., 2016)	4,067 Q1 35	Conjunto de edificios (Campus IMP, Belgrado, Serbia)	Planificación diaria Criterio económico	Determinista, LP	Simulación con demandas, precio y clima históricos	MATLAB CPLEX

3.4. Sistemas multienergía

La denominación de sistemas multienergía surgió, desde una perspectiva genérica, para abarcar todas las metodologías relacionadas con la gestión de vectores energéticos, incluyendo los enfoques anteriormente mencionados: MG, VPP y EH. Mancarella ha ofrecido una extensa discusión sobre las características de cada uno de estos (Mancarella, 2014) y otros autores están de acuerdo en que se trata de la «extensión de la red inteligente más allá de la energía eléctrica» (van Beuzekom et al., 2015), es decir, incluyendo otros recursos del sector de la energía. Mancarella ha anticipado que estos conceptos podrían aplicarse a diferentes escalas e integrar pequeños sistemas en otros de mayor tamaño, lo cual significa modelar desde viviendas hasta regiones o países, incluyendo niveles geográficos intermedios como edificios, industrias, distritos o ciudades. A partir de la categorización de Mancarella, se han publicado revisiones actualizadas sobre el modelado de MES (Kriechbaum et al., 2018), infraestructura necesaria (Guelpa et al., 2019) y herramientas de utilidad (van Beuzekom et al., 2015).

En este sentido, entre las cuestiones abordadas hay algunas contribuciones destacables con respecto al modelado de MES: un marco flexible que permite la inclusión de flujos bidireccionales (Long et al., 2019; Taylor et al., 2021), diagramas de

Sankey propuestos como alternativa conceptual (Liu and Mancarella, 2016), y, en contextos más específicos, algunos trabajos han tratado el análisis tecnoeconómico de MES basados en biocombustibles (Minutillo et al., 2019) o del sistema energético británico en escenarios futuros (Clegg and Mancarella, 2019b,a). Además, se ha estudiado el diseño de MES (Wirtz et al., 2021), particularmente en edificios (Fabrizio et al., 2010), distritos (Huang et al., 2019), poblaciones remotas (Luo et al., 2021), o simplemente MES descentralizados en general (Mavromatidis and Petkov, 2021). También existen estudios sobre el análisis de sistemas con dispositivos de almacenamiento (Gabrielli et al., 2018), redes de distribución activas (Wang et al., 2019) y planes de expansión coordinados (Fan et al., 2020). Con respecto a las estrategias de operación, la optimización robusta se ha empleado para obtener los flujos óptimos en distritos inteligentes (Martinez Cesena and Mancarella, 2019; Good and Mancarella, 2019), pero también cabe señalar el uso de modelos deterministas en redes térmicas de distrito (Lu et al., 2018), sistemas de energía regionales (Liu et al., 2020; Nasiri et al., 2020), y edificios comerciales (Liu et al., 2019). La Tabla 4 recopila los artículos anteriormente citados, indicando sus características.

Tabla 4: Clasificación de la literatura revisada sobre sistemas multienergía

Referencia	JIF Q Citas	Contexto	Alcance	Modelado y optimización	Ensayos	Software
(Gabrielli et al., 2018)	8,426 Q1 158	Distritos residenciales (Zurich, Suiza)	Diseño (planificación anual) Multicriterio económico y de emisiones de CO ₂	Determinista, MILP	Simulación con demandas, precio y clima históricos	CPLEX
(Long et al., 2019)	8,848 Q1 15	Conjunto de tres edificios (Campus UoM, Mánchester, UK)	Control (MPC) Criterio económico	Determinista, MIQP	Simulación con demandas históricas	CPLEX
(Taylor et al., 2021)	4,312 Q1 32	Tres EH hipotéticos (no localizado)	Control (MPC) Criterio económico	Determinista, MILP	Simulación con demandas y precios históricos	CPLEX MATLAB
(Liu and Mancarella, 2016)	7,182 Q1 130	Distrito (Campus UoM, Mánchester, UK)	Modelado y análisis	Determinista (sin optimización)	Simulación con precio y demanda históricos	MATLAB + Excel
(Minutillo et al., 2019)	4,939 Q2 12	Sistema de poligeneración (no localizado)	Modelado, análisis económico y energético	Determinista (sin optimización)	Simulación con modelos	Aspen Plus
(Clegg and Mancarella, 2019b) (Clegg and Mancarella, 2019a)	6,082 Q1 26/17	País (Gran Bretaña, UK)	Modelado y diseño Criterio económico	Determinista, no lineal	Simulación con modelos y datos históricos	EnergyPlus MATLAB
(Wirtz et al., 2021)	9,709 Q1 1	Comparación de modelos en un MES hipotético (Alemania)	Diseño (planificación de cinco días durante un año) Criterio económico	Determinista, MILP	Simulación con demandas históricas	Gurobi
(Fabrizio et al., 2010)	2,580 Q2 104	Edificios (Turín, Italia)	Diseño (valores estacionales) Comparación de criterios	Determinista, LP	Simulación con modelos	EnergyPlus algoritmo GRG2
(Huang et al., 2019)	8,267 Q1 90	Distrito central administrativo (Beijing, China)	Diseño (planificación diaria estacional) Criterio económico	Determinista, MILP	Simulación con clima y precio históricos	CPLEX YALMIP MATLAB

Tabla 4: Clasificación de la literatura revisada sobre sistemas multienergía (continuación)

Referencia	JIF Q Citas	Contexto	Alcance	Modelado y optimización	Ensayos	Software
(Luo et al., 2021)	7,587 Q1 3	Poblado remoto (Lhasa, Tíbet)	Diseño y planificación Criterio económico	Determinista, MILP + basado en reglas (dos etapas)	Simulación con demandas históricas	No mencionado
(Mavromatidis and Petkov, 2021)	9,746 Q1 7	Distrito urbano hipotético (Zurich, Suiza)	Diseño (planificación anual) Multicriterio económico y de emisiones de CO ₂	Determinista, MILP	Simulación con clima y precio históricos	No mencionado
(Wang et al., 2019)	8,848 Q1 23	Sistema IEEE de 33 barras y sistema de gas de 23 nodos + ocho EH (no localizado)	Diseño (planificación anual) Criterio económico	Probabilista, MINLP, SOCP	Simulación con producción y demanda históricas	CPLEX
(Fan et al., 2020)	3,367 Q2 7	MES de 14 barras (no localizado)	Diseño (valores anuales) Criterio económico	Determinista, MILP, descomposición de Bender	Simulación con modelos	No mencionado
(Martinez Cesena and Mancarella, 2019)	8,267 Q1 70	Distrito con veintiséis edificios (Mánchester, UK)	Planificación diaria Criterio económico	Probabilista, MILP + RO (dos etapas)	Simulación con demandas históricas	MATLAB Software propio
(Good and Mancarella, 2019)	8,267 Q1 54	Cincuenta edificios residenciales, distrito (Inglaterra, UK)	Planificación diaria Criterio económico	Probabilista, MILP	Simulación con clima y precio históricos	No mencionado
(Lu et al., 2018)	5,537 Q1 35	Red térmica de distrito (Changchun, China)	Planificación diaria Criterio económico	Determinista, MILP	Simulación con modelos	MATLAB YALMIP CPLEX
(Liu et al., 2020)	3,367 Q2 1	Múltiples redes de distrito (no localizado)	Planificación diaria Multicriterio económico y medioambiental	Determinista, MINLP, comparación de algoritmos	Simulación con modelos	CPLEX
(Nasiri et al., 2020)	7,587 Q1 20	Sistema IEEE de 6 barras y sistema de gas de 6 nodos (no localizado)	Planificación diaria Criterio económico	Determinista, MILP	Simulación con modelos	GAMS CPLEX
(Liu et al., 2019)	3,745 Q1 4	Edificio comercial (Wuhan, China)	Control (MPC con corrección en tiempo real) Criterio económico	Determinista, MILP y MINLP, GA, PSO	Simulación con clima y demanda históricos	Gurobi

3.5. Otros términos

Además de los cuatro enfoques principales discutidos anteriormente, otros términos aparecen (algunas veces acompañando a los previos) en publicaciones cuyo tema de investigación está ligado al tipo de problemas analizado hasta ahora. Un ejemplo del crecimiento de la perspectiva multivector de Mancarella se encuentra en términos novedosos que comienzan a aparecer junto con el de MG. Así pues, las microrredes multienergía (Mansour-Saatloo et al., 2020; Lekvan et al., 2021) o ciertas microrredes reconfigurables (Hemmati et al., 2021) pueden enmarcarse en la definición de MES de este autor.

Otro ejemplo son los denominados sistemas ciberfísicos (CPS), un nuevo concepto que integra numerosas ideas de Ingeniería de Control y automatización y de las tecnologías de la información y la comunicación. La mayoría de las contribuciones científicas están enfocadas en la propuesta de modelos conceptuales, arquitecturas de control y comunicaciones, o técnicas de computación y ciberseguridad, pero hay otras relacionadas con los sistemas de producción como la red eléctrica (Chen et al., 2018), que es por definición un CPS al interactuar con elementos de control por computador y redes de comunicación. En particular, hay ejemplos del control del suministro

térmico en redes residenciales (Zeng et al., 2018) y de la integración de la gestión de energía en la industria (Pei et al., 2019), por citar algunos.

Por otro lado, los términos reparto energético (Yuan et al., 2017), reparto económico (Beigvand et al., 2017; Jiang et al., 2017; Ghaemi et al., 2021), reparto óptimo (Fang et al., 2019), compromiso de unidad (Elkamel et al., 2021; AlHajri et al., 2021), planes de expansión (Mehrabadi et al., 2020), y distribución de recursos (Wenzel et al., 2016) se emplean en aplicaciones similares a los términos MES y EH, e incluso existen artículos en los que ninguno de los anteriores se mencionan expresamente pero igualmente están relacionados con los sistemas de producción continuos, incluyendo la gestión energética en viviendas (Mohammadi et al., 2018), hogares inteligentes (Zamanloo et al., 2021; Mansouri et al., 2021), redes de distribución (Fu et al., 2019), marcos de trabajo multiagente (Salehpour et al., 2021), y unidades de desalación acopladas a invernaderos. El modelo eTransport es otro ejemplo que, de acuerdo con sus autores, se ha desarrollado «en torno a casos de estudios presentados por patrocinadores industriales» (Bakken et al., 2007), mucho antes de que MG, VPP, EH y MES empezaran a crecer en popularidad. La Tabla 5 recopila los artículos anteriormente citados, indicando sus características.

Tabla 5: Clasificación de la literatura revisada incluyendo otros términos relacionados con los sistemas de producción

Referencia	JIF Q Citas	Contexto	Alcance	Modelado y optimización	Ensayos	Software
(Mohammadi et al., 2018)	4,418 Q1 42	Vivienda aislada (Hesarak, Tehran, Irán)	Diseño (planificación anual) Multicriterio económico y fiabilidad	Determinista	Simulación con demanda histórica	HOMER MATLAB
(Bakken et al., 2007)	1,172 Q2 52	Áreas residenciales (Noruega)	Planificación (plan de expansión) Criterio económico (con penalización por emisiones)	Determinista, MILP, DP	Simulación con precios históricos	eTransport (COIN + MS Access + MS Visio + C++)
(Mansour-Saatloo et al., 2020)	7,587 Q1 24	Microrred con producción combinada de frío y calor (no localizado)	Planificación diaria Multicriterio económico y basado en riesgo	Probabilista, RO, MCS, MILP	Simulación con modelos	GAMS MATLAB CPLEX
(Lekvan et al., 2021)	7,587 Q1 21	Microrred multienergía (no localizado)	Planificación diaria Multicriterio económico y basado en riesgo	Probabilista, RO, MCS, MILP	Simulación con modelos	GAMS CPLEX
(Hemmati et al., 2021)	7,587 Q1 18	Sistema IEEE de 10 barras (no localizado)	Planificación diaria Multicriterio económico y de emisiones de CO ₂	Probabilista, RO, MCS, MINLP	Simulación con modelos	GAMS DICOPT
(Zeng et al., 2018)	2,848 Q2 4	Áreas residenciales (no localizado)	Control y planificación Criterio económico	Determinista, reglas heurísticas, MILP	Simulación con modelos	No mencionado
(Pei et al., 2019)	- Q4 2	Fábrica de baterías (no localizado)	Control (MPC) Criterio económico	Determinista, MINLP	Simulación con precio y demanda históricos	No mencionado
(Yuan et al., 2017)	7,900 Q1 7	Regiones, sistemas de ensayos IEEE y PEGASE (Europa)	Control o planificación Criterio económico	Determinista, SOCP, descomposición de Bender	Simulación con modelos	GAMS MOSEK MATLAB
(Jiang et al., 2017)	7,900 Q1 62	Sistemas IEEE de 6 y 118 barras (no localizado)	Planificación diaria Criterio económico	Probabilista, MINLP, CC	Simulación con modelos	CPLEX
(Ghaemi et al., 2021)	7,587 Q1 1	Red de distribución de 33 barras (no localizado)	Planificación diaria Criterio económico	Probabilista, RO adaptativa, CCGA	Simulación con modelos	GAMS Gurobi
(Fang et al., 2019)	3,588 Q1 6	Red térmica de distrito (no localizado)	Planificación diaria Criterio económico	Probabilista, CC, MILP, descomposición de Bender	Simulación con modelos	MATLAB YALMIP CPLEX
(Elkamel et al., 2021)	7,587 Q1 3	Sistema IEEE de 30 barras (no localizado)	Planificación diaria Criterio económico	Probabilista, SP, MILP, descomposición de Bender	Simulación con modelos	GAMS
(AlHajri et al., 2021)	7,587 Q1 3	Sistemas eléctrico de 6 barras y de gas de 6 nodos (no localizado)	Planificación diaria Criterio económico	Probabilista, SP, MINLP	Simulación con modelos	GAMS DICOPT
(Mehrabadi et al., 2020)	7,587 Q1 2	Sistema modificado de 39 barras (US)	Diseño (planificación anual) Criterio económico	Probabilista, MILP, método basado en la cadena de Markov	Simulación con precio y demanda históricos	GAMS MATLAB CPLEX
(Wenzel et al., 2016)	0,675 Q4 17	Diferentes plantas de producción (INEOS, Köln, Alemania)	Control o planificación Criterio económico	Determinista, LQP, multiplicadores de Lagrange	Simulación con modelos	No mencionado
(Zamanloo et al., 2021)	7,587 Q1 2	Hogar inteligente (no localizado)	Planificación diaria Criterio económico	Determinista, MILP	Simulación con modelos	CPLEX
(Mansouri et al., 2021)	7,587 Q1 12	Red de 83 barras de hogares inteligentes (no localizado)	Planificación diaria Multicriterio económico, energético y de emisiones de CO ₂	Probabilista, MCS, MILP	Simulación con modelos	GAMS CPLEX
(Fu et al., 2019)	8,848 Q1 14	Central híbrida incluyendo el sistema IEEE de 39 barras (no localizado)	Planificación diaria Multicriterio económico, de uso de RES y de seguridad	Determinista, reglas heurísticas, MILP, descomposición de Bender	Simulación con demandas históricas	No mencionado
(Salehpour et al., 2021)	7,587 Q1 5	Marco de optimización descentralizado para EH (no localizado)	Planificación diaria Criterio económico	Probabilista, MCS, MILP	Simulación con modelos	GAMS CPLEX

Tabla 5: Clasificación de la literatura revisada incluyendo otros términos relacionados con los sistemas de producción (continuación)

Referencia	JIF Q Citas	Contexto	Alcance	Modelado y optimización	Ensayos	Software
(Gil et al., 2019)	8,208 Q1 12	Invernaderos y desalación (Almería, España)	Control (MPC) Criterio energético	Determinista, PNMPC	Simulación con clima y demanda históricos	MATLAB

3.6. Visión general de los artículos revisados

Para la discusión de los resultados que resumen las características de los trabajos revisados, se presenta a continuación un diagrama de barras para cada una de las columnas de las tablas anteriores (Figuras 3 a 8). Por cuestiones visuales, la columna de alcance se ha dividido en dos gráficas, objetivo (Figura 5) y criterio (Figura 7), como se consideró en la sección 2. Nótese que, excepto en las Figuras 6 y 8, cada artículo solo se ha contabilizado en una de las categorías disponibles. En las Figuras 6 y 8, las publicaciones se han considerado más de una vez si en ellas se combinan o compararan diferentes modelos o técnicas de resolución, o si hacen uso de más de una herramienta software. Los siguientes párrafos describen estos gráficos e incluyen, entre paréntesis, el número total de artículos dentro de cada categoría.

De acuerdo con la Figura 3, la mayoría de los trabajos se desarrollan en contextos de distritos y áreas urbanas (24), seguido de casos de referencia (20) en los que se incluyen, entre otros, las microrredes experimentales y los sistemas IEEE para ensayos. Las publicaciones que comprenden escenarios hipotéticos y aquellas cuyo marco de trabajo no está claramente delimitado se han incluido en la categoría «Otros» (30), que es la primera en importancia al contener una gran variedad de contextos. Los sistemas energéticos de industrias (7), edificios (11) y regiones/países (8) son tratados en un menor, pero significativo, número de artículos.

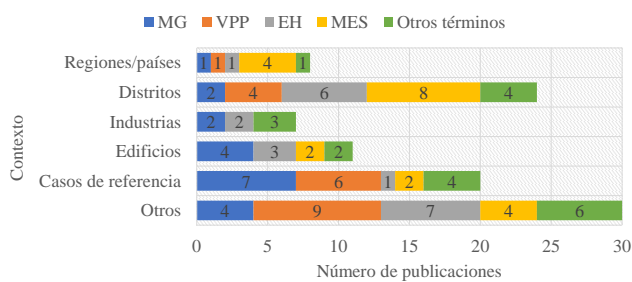


Figura 3: Resumen clasificatorio de los contextos más usuales en los trabajos revisados

Como se menciona en la sección 2, el alcance se compone del objetivo y los criterios del estudio, por lo que se presenta una figura para cada cada una de ellos. En el caso de los objetivos, están tan interrelacionados que un mismo trabajo puede considerar varios de ellos a la vez (por ejemplo, diseño a partir de la planificación anual). Por esta razón, la Figura 4 se ha elaborado de manera que si un trabajo presenta más de un objetivo, solo se contabiliza uno de ellos: el jerárquicamente superior, por lo general siguiendo el orden diseño, planificación, control y modelado. Para ilustrarlo, considérense los trabajos de

Mohammadi et al. (2017b) y Yuan et al. (2017) en la Tabla 5 estos han sido clasificados en los respectivos objetivos de diseño y planificación.

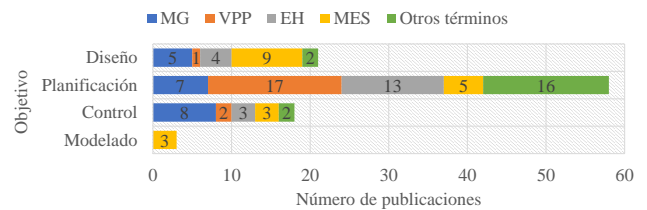


Figura 4: Resumen clasificatorio de los objetivos más usuales en los trabajos revisados

En esencia, la planificación comprende un mayor número de publicaciones (58) si se compara con los objetivos restantes, diseño (21), control (18) y modelado (3), que al ser la base para la mayoría de los trabajos solamente aparece de manera independiente en un reducido número de casos. Ello se debe parcialmente al hecho de que numerosas aplicaciones están orientadas a los mercados eléctricos, cuya operación consiste en pujas horarias para la compra/venta de energía que se planifica de antemano. Otro hecho singular es que, en proporción, parece haber más aplicaciones de control en microrredes, probablemente porque en ellas se incluyen elementos más tangibles en comparación con los enfoques restantes, los cuales incorporan sistemas a gran escala en los que, en muchas ocasiones, se omite la existencia de sus bucles de control a bajo nivel.

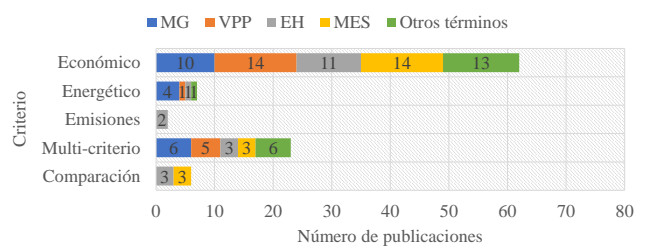


Figura 5: Resumen clasificatorio de los criterios más usuales en los trabajos revisados

Con respecto a los criterios aplicados en cada trabajo, la Figura 5 muestra una abrumadora mayoría del criterio económico (62) en los casos monocriterio, sobre el resto (energético, con 7 publicaciones, y emisiones, con 2), debido al hecho de que el principal incentivo para participar en los mercados eléctricos es el beneficio monetario obtenido. Este se considera incluso en cada uno de los múltiples estudios con enfoque multicriterio (23) y de comparación de criterios (6), los cuales abarcan una heterogeneidad de casos detallados en las Tablas 1 a 5. Considere

rar como único criterio las emisiones de CO₂ o de otros gases o cuestiones energéticas está normalmente relacionado con el diseño o la aplicación de estrategias de control.

Debido a la heterogeneidad de los términos incluidos en la columna «Modelado y optimización», se refiere a los lectores a la Figura 2 para comprender las etiquetas del eje vertical de la Figura 6. Nótese que las seis primeras constituyen tres categorías binomiales de acuerdo con el diagrama de la Figura 2, de las cuales se discutió sobre el tratamiento de la incertidumbre en la sección 2, mientras que las dos restantes pueden caracterizarse fácilmente a partir de los acrónimos en las Tablas 1 a 5.

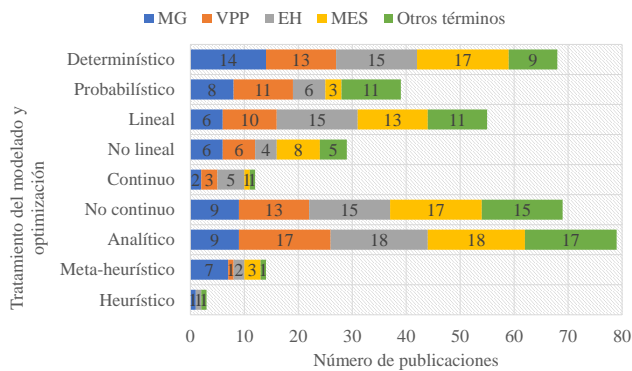


Figura 6: Resumen clasificatorio del tratamiento de incertidumbre, continuidad (uso de variables enteras), linealidad y técnicas más usuales en los trabajos revisados

En este punto, los autores quisieran destacar que estos aspectos no han podido ser completamente analizados debido a falta de información en algunos trabajos que se han omitido en las categorías de linealidad, continuidad y/o técnicas en la Figura 6. La mayoría de las publicaciones emplean modelos deterministas (68), lineales (55), con variables enteras (69), resolviendo el problema a través de métodos analíticos (79). Las formulaciones con variables exclusivamente continuas no abundan (12) debido a su limitada capacidad para modelar el comportamiento de ciertos dispositivos, y tampoco lo hacen los enfoques con técnicas heurísticas (3) o metaheurísticas (14) por su mayor coste computacional o su posible convergencia a resultados subóptimos. Asimismo, aparecen con frecuencia modelos probabilistas (39) y no lineales (29), que tienden a representar la dinámica real del sistema con mayor fidelidad. En este sentido, Wirtz et al. (2021) realizan una interesante comparativa de diferentes modelos, evaluando la contraposición entre precisión y coste computacional.

Por otro lado, teniendo en cuenta el tipo de ensayos presentados en las Tablas 1 a 5, la Figura 7 se organiza en cuatro categorías. La mayoría de los autores emplean medidas de sistemas reales o bases de datos relacionadas con estos como entradas para el modelo que usan en el entorno de simulación (57). Independientemente del número de fuentes, «Simul. con datos» hace referencia a que al menos parte de la información de entrada proviene de registros históricos (ya sea el precio, la producción, la demanda, el clima...). En otros casos, los datos se obtienen a través de modelos (estacionales o valores anuales medios, modelos predictivos...), o su origen no está explicitado, e igualmente se emplean para simular el comportamiento de ca-

da sistema (40). En un reducido número de casos relacionados con la planificación o las técnicas de control se llevan a cabo experimentos reales sobre el sistema (4) o no se lleva a cabo ninguna clase de ensayo (1).

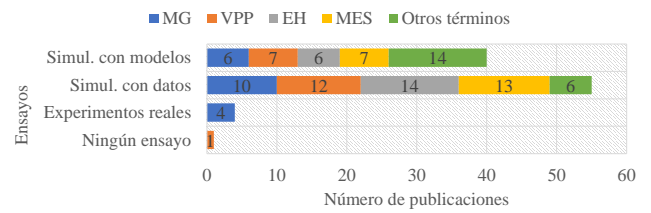


Figura 7: Resumen clasificatorio de los ensayos más usuales en los trabajos revisados

Finalmente, el nombre de las herramientas software que se utilizan en más de un trabajo se han recopilado en la Figura 8, mientras que aquellos que solo se citan una sola vez aparecen encasillados en la etiqueta «Otros» (20). CPLEX es la principal elección para muchos autores (41), seguido de GAMS (27) y AMPL (2), como paquetes de optimización que incluyen tanto un entorno de modelado y definición del problema como algoritmos de resolución que pueden emplearse en combinación con otro software. Aparte de estos, Gurobi, aparece como otro importante algoritmo de optimización (7), aunque depende de otras herramientas para la programación del modelo. MATLAB es el segundo programa más utilizado (34), ampliamente empleado en ingeniería y con su propio lenguaje de programación, para el que otros desarrolladores proveen herramientas de modelado de ayuda para la optimización, como YALMIP (8) o TOMLAB (2). HOMER (2) y Energy Plus (5) son el único software específico de ingeniería mencionado en los artículos revisados, aunque también hay que considerar que un sustancial número de ellos ni si quiera aluden a ningún tipo de programa (19).

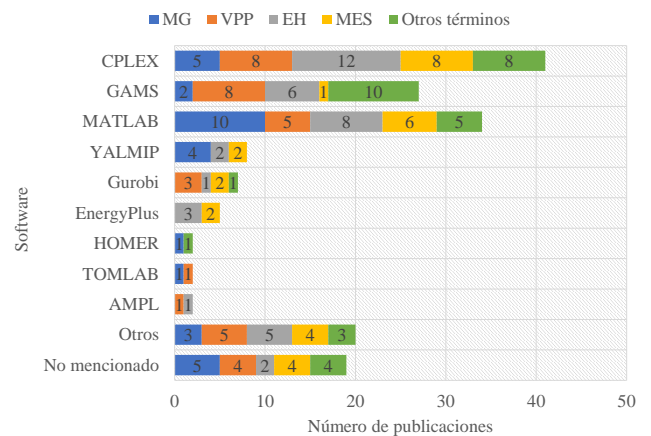


Figura 8: Resumen clasificatorio del software más usual en los trabajos revisados

4. Conclusiones

Teniendo en cuenta todo lo expuesto en este trabajo, las ideas más relevantes que pueden extraerse de esta revisión se enuncian en las siguientes líneas. Así, conforme se abordan

nuevos problemas de diseño, planificación, control y modelado en sistemas de producción, se hace palpable que, sin una visión completa de los términos y cuestiones involucradas como la ofrecida en esta revisión, la identificación de nichos de investigación puede ser realmente ardua.

Desde un punto de vista crítico, los lectores deberían considerar la clasificación aquí propuesta como un estudio no exhaustivo simplemente por el hecho de que clasificar es intrínsecamente discutible, puesto que el nivel de detalle de una clasificación es hasta cierto punto subjetivo. Si bien cada publicación ha sido escrutada para identificar las características descritas en las Tablas 1 a 5, algunas de ellas podrían no ser precisas al ser la información disponible poco clara o insuficiente. Además, algunas publicaciones no cubiertas en esta revisión pueden estar contextualizadas en entornos diferentes, usar otras herramientas de programación distintas de las presentadas o emplear técnicas específicas que encajarían mejor en una categorización más amplia. Además, al tratarse de un tema de actualidad, la investigación futura introducirá tarde o temprano nuevos términos, metodologías y avances en el software que podrían dejar desactualizado este análisis.

Tal y como se ha expuesto, la mayoría de los trabajos se enfocan en redes puramente energéticas con incentivos económicos, cuyo objetivo es lograr una producción y servicios de transporte limpios, eficientes y sostenibles para los que son necesarios la incorporación de RES. Sus contribuciones son, no obstante, de interés cuando se trata de la gestión de recursos heterogéneos (que pueden ser de tipo material o energético), puesto que se emplean metodologías similares (véase por ejemplo la gestión de redes de agua potable o CO₂). Sobre la integración de recursos de tipo material hay un menor número de publicaciones y pueden, por tanto, constituir un tema de interés para los investigadores, evolucionando el término MES a sistema multirecursos (MRS). Por ejemplo, Kriechbaum et al. menciona el potencial de un tratamiento integral del sector de la alimentación y el agua junto con el de la energía, al ser todos ellos clave para el desarrollo humano. En este sentido, huelga decir que la consideración de criterios medioambientales en problemas multiobjetivo es todavía una cuestión pendiente para la vasta mayoría de las soluciones ofrecidas en la literatura, que se centran en aspectos puramente económicos.

Otro hecho importante que puede deducirse de esta revisión es que las denominaciones MG, VPP, EH, y MES, aunque pueden sugerir estar relacionadas con ciertas metodologías, tienen más en común de lo que se piensa. Concretamente, los concentradores de energía se han asociado a veces con modelos de estático entrada/salida (Mancarella, 2014), pese a que existen ejemplos del uso de modelos más complejos (Bozchalui et al., 2015). Es más, a veces pueden emplearse estos términos de manera indistinta ya que en ocasiones se han añadido términos como «multienergía» a otros ya existentes como microrred (Mansour-Saatloo et al., 2020; Lekvan et al., 2021) o en algunos trabajos se incluyen más de uno de estos términos simultáneamente (Bozchalui et al., 2015).

Por otra parte, aunque en el campo de las microrredes hay ejemplos de plantas experimentales en las que se llevan a cabo ensayos reales, numerosos estudios utilizan sistemas simulados. Esto puede deberse a razones prácticas, al estar muchas investigaciones llevadas a cabo en entornos académicos y no disponer

plenamente de sistemas de gran escala que pueden pertenecer a diferentes agentes o propietarios, o cuya disponibilidad para experimentación puede ser directamente infactible o demasiado cara. Un ejemplo de ello son los ensayos reales para el caso de diseño de instalaciones, en los que estaríamos hablando de la construcción de prototipos que pueden ser a veces suplidos por modelos virtuales. Algo parecido ocurre con la consideración de incertidumbre en los modelos, lo cual añade complejidad al problema y bien puede ignorarse en aplicaciones no críticas, o bien simplemente no se dispone de suficiente información para modelarla. El MPC se presenta en ocasiones como un enfoque determinista que puede, hasta cierto punto, tratar con ello.

En resumen, para un uso práctico, la clasificación aquí propuesta es lo suficientemente consistente y útil para ayudar vislumbrar nichos de investigación que podrían abordarse en el futuro, de acuerdo con lo expuesto en los párrafos anteriores: la inclusión de recursos materiales en el tratamiento del problema, de especial interés para los sectores de la alimentación y el agua y línea en la que trabajan los autores de este artículo (Ramos-Teodoro, 2021); la consideración de criterios medioambientales junto con los económicos a la hora de diseñar y planificar la operación de MRS; la materialización de las técnicas y estrategias propuestas, en última instancia, en entornos de experimentación reales.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado con el Proyecto R+D+i del Plan Nacional DPI2017-85007-R del Ministerio de Ciencia, Innovación y Universidades y Fondos FEDER.

Referencias

- Alahyari, A., Ehsan, M., Mousavizadeh, M., 2019. A hybrid storage-wind virtual power plant (VPP) participation in the electricity markets: A self-scheduling optimization considering price, renewable generation, and electric vehicles uncertainties. *Journal of Energy Storage* 25, 100812. DOI: 10.1016/j.est.2019.100812
- AlHajri, I., Ahmadian, A., Elkamel, A., 2021. Stochastic day-ahead unit commitment scheduling of integrated electricity and gas networks with hydrogen energy storage (HES), plug-in electric vehicles (PEVs) and renewable energies. *Sustainable Cities and Society* 67, 102736. DOI: 10.1016/j.scs.2021.102736
- Ali, H., Hussain, A., Bui, V., Kim, H., 2020. Consensus algorithm-based distributed operation of microgrids during grid-connected and islanded modes. *IEEE Access* 8, 78151–78165. DOI: 10.1109/access.2020.2989457
- Alipour, M., Zare, K., Abapour, M., 2018. MINLP probabilistic scheduling model for demand response programs integrated energy hubs. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 14 (1), 79–88. DOI: 10.1109/tii.2017.2730440
- Allegrini, J., Orehounig, K., Mavromatidis, G., Ruesch, F., Dorer, V., Evins, R., 2015. A review of modelling approaches and tools for the simulation of district-scale energy systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 52, 1391–1404. DOI: 10.1016/j.rser.2015.07.123
- Bakken, B. H., Skjelbred, H. I., Wolfgang, O., 2007. eTransport: Investment planning in energy supply systems with multiple energy carriers. *Energy* 32 (9), 1676–1689. DOI: 10.1016/j.energy.2007.01.003
- Baringo, A., Baringo, L., Arroyo, J. M., 2019. Day-ahead self-scheduling of a virtual power plant in energy and reserve electricity markets under uncertainty. *IEEE Transactions on Power Systems* 34 (3), 1881–1894. DOI: 10.1109/tpwrs.2018.2883753

- Batic, M., Tomasevic, N., Beccuti, G., Demiray, T., Vranes, S., 2016. Combined energy hub optimisation and demand side management for buildings. *Energy and Buildings* 127, 229–241.
DOI: 10.1016/j.enbuild.2016.05.087
- Beigvand, S. D., Abdi, H., La Scala, M., 2017. A general model for energy hub economic dispatch. *Applied Energy* 190, 1090–1111.
DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.12.126
- Bisschop, J., Meeraus, A., 1982. On the development of a general algebraic modeling system in a strategic planning environment. In: *Applications*. Vol. 20 of *Mathematical programming studies*. Springer Berlin Heidelberg, pp. 1–29.
DOI: 10.1007/BFb0121223
- Bolzoni, A., Parisio, A., Todd, R., Forsyth, A., 2021. Model predictive control for optimizing the flexibility of sustainable energy assets: An experimental case study. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 129, 106822.
DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.106822
- Bordons, C., Garcia-Torres, F., Ridao, M. Á., 2020. Control predictivo en microrredes interconectadas y con vehículos eléctricos. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática industrial* 17 (3), 239–253.
DOI: 10.4995/riai.2020.13304
- Bozchalui, M. C., Cañizares, C. A., Bhattacharya, K., 2015. Optimal energy management of greenhouses in smart grids. *IEEE Transactions on Smart Grid* 6 (2), 827–835.
DOI: 10.1109/tsg.2014.2372812
- Brahman, F., Honarmand, M., Jadid, S., 2015. Optimal electrical and thermal energy management of a residential energy hub, integrating demand response and energy storage system. *Energy and Buildings* 90, 65–75.
DOI: 10.1016/j.enbuild.2014.12.039
- Braun, M., Strauss, P., 2008. A review on aggregation approaches of controllable distributed energy units in electrical power systems. *International Journal of Distributed Energy Resources* 4 (4), 297–319.
- Burnham, J. F., 2006. Scopus database: a review. *Biomedical digital libraries* 3 (1), 1.
DOI: 10.1186/1742-5581-3-1
- Chen, B., Wang, J., Shahidehpour, M., 2018. Cyber–physical perspective on smart grid design and operation. *IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications* 3 (3), 129–141.
DOI: 10.1049/iet-cps.2017.0143
- Chicco, G., Mancarella, P., 2009. Distributed multi-generation: A comprehensive view. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 13 (3), 535–551.
DOI: 10.1016/j.rser.2007.11.014
- Clegg, S., Mancarella, P., 2019a. Integrated electricity-heat-gas modelling and assessment, with applications to the Great Britain system. Part I: High-resolution spatial and temporal heat demand modelling. *Energy* 184, 180–190.
DOI: 10.1016/j.energy.2018.02.079
- Clegg, S., Mancarella, P., 2019b. Integrated electricity-heat-gas modelling and assessment, with applications to the Great Britain system. Part II: Transmission network analysis and low carbon technology and resilience case studies. *Energy* 184, 191–203.
DOI: 10.1016/j.energy.2018.02.078
- Crawley, D. B., Pedersen, C. O., Lawrie, L. K., Winkelmann, F. C., 2000. Energyplus: Energy simulation program. *ASHRAE Journal* 42, 49–56.
- Czyzyk, J., Mesnier, M. P., Moré, J. J., 1998. The NEOS server. *IEEE Journal on Computational Science and Engineering* 5 (3), 68–75.
DOI: 10.1109/99.714603
- Dagoumas, A. S., Koltsaklis, N. E., 2019. Review of models for integrating renewable energy in the generation expansion planning. *Applied Energy* 242, 1573–1587.
DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.03.194
- Dall’Anese, E., Guggilam, S. S., Simonetto, A., Chen, Y. C., Dhople, S. V., 2018. Optimal regulation of virtual power plants. *IEEE Transactions on Power Systems* 33 (2), 1868–1881.
DOI: 10.1109/tpwrs.2017.2741920
- Dolan, E. D., 2001. The NEOS server 4.0 administrative guide. Technical Memorandum ANL/MCS-TM-250, Mathematics and Computer Science Division, Argonne National Laboratory.
- Ehsan, A., Yang, Q., 2018. Optimal integration and planning of renewable distributed generation in the power distribution networks: A review of analytical techniques. *Applied Energy* 210, 44–59.
DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.10.106
- Elkamel, M., Ahmadian, A., Diabat, A., Zheng, Q. P., 2021. Stochastic optimization for price-based unit commitment in renewable energy-based personal rapid transit systems in sustainable smart cities. *Sustainable Cities and Society* 65, 102618.
DOI: 10.1016/j.scs.2020.102618
- Evins, R., 2015. Multi-level optimization of building design, energy system sizing and operation. *Energy* 90, 1775–1789.
DOI: 10.1016/j.energy.2015.07.007
- Evins, R., Orehounig, K., Dorer, V., Carmeliet, J., 2014. New formulations of the ‘energy hub’ model to address operational constraints. *Energy* 73, 387–398.
DOI: 10.1016/j.energy.2014.06.029
- Fabrizio, E., Branciforti, V., Costantino, A., Filippi, M., Barbero, S., Tecco, G., Mollo, P., Molino, A., 2017. Monitoring and managing of a micro-smart grid for renewable sources exploitation in an agro-industrial site. *Sustainable Cities and Society* 28, 88–100.
DOI: 10.1016/j.scs.2016.08.026
- Fabrizio, E., Corrado, V., Filippi, M., 2010. A model to design and optimize multi-energy systems in buildings at the design concept stage. *Renewable Energy* 35 (3), 644–655.
DOI: 10.1016/j.renene.2009.08.012
- Fan, H., Yuan, Q., Xia, S., Lu, J., Li, Z., 2020. Optimally coordinated expansion planning of coupled electricity, heat and natural gas infrastructure for multi-energy system. *IEEE Access* 8, 91139–91149.
DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2993035
- Fang, Y., Zhao, S., Wang, N., Li, Z., Liu, J., 2019. Power system stochastic optimal dispatch considering thermal and electrical coordination. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 110, 772–780.
DOI: 10.1016/j.ijepes.2019.03.065
- Faraji, J., Hashemi-Dezaki, H., Ketabi, A., 2021. Stochastic operation and scheduling of energy hub considering renewable energy sources’ uncertainty and n-1 contingency. *Sustainable Cities and Society* 65, 102578.
DOI: 10.1016/j.scs.2020.102578
- Farhangi, H., 2010. The path of the smart grid. *IEEE Power and Energy Magazine* 8 (1), 18–28.
DOI: 10.1109/mpe.2009.934876
- Firouzmakan, P., Hooshmand, R.-A., Bornapour, M., Khodabakhshian, A., 2019. A comprehensive stochastic energy management system of micro-CHP units, renewable energy sources and storage systems in microgrids considering demand response programs. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 108, 355–368.
DOI: 10.1016/j.rser.2019.04.001
- Foroughi, M., Pasban, A., Moeini-Aghtaie, M., Fayaz-Heidari, A., 2021. A bi-level model for optimal bidding of a multi-carrier technical virtual power plant in energy markets. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 125, 106397.
DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.106397
- Fourer, R., Gay, D. M., Kernighan, B., 1989. AMPL: A mathematical programming language. In: Wallace, S. W. (Ed.), *Algorithms and model formulations in mathematical programming*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, pp. 150–151.
- Freire, V. A., De Arruda, L. V. R., Bordons, C., Márquez, J. J., 2020. Optimal demand response management of a residential microgrid using model predictive control. *IEEE Access* 8, 228264–228276.
DOI: 10.1109/ACCESS.2020.3045459
- Fu, Y., Lu, Z., Hu, W., Wu, S., Wang, Y., Dong, L., Zhang, J., 2019. Research on joint optimal dispatching method for hybrid power system considering system security. *Applied Energy* 238, 147–63.
DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.034
- Gabrielli, P., Gazzani, M., Martelli, E., Mazzotti, M., 2018. Optimal design of multi-energy systems with seasonal storage. *Applied Energy* 219, 408–424.
DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.07.142
- García, C. E., Pretz, D. M., Morari, M., 1989. Model predictive control: Theory and practice—A survey. *Automatica* 25 (3), 335–348.
DOI: 10.1016/0005-1098(89)90002-2
- Garcia-Torres, F., Vilaplana, D. G., Bordons, C., Roncero-Sanchez, P., Ridao, M. A., 2019. Optimal management of microgrids with external agents including battery/fuel cell electric vehicles. *IEEE Transactions on Smart Grid* 10 (4), 4299–4308.
DOI: 10.1109/tsg.2018.2856524
- Geidl, M., Andersson, G., 2007. Optimal power flow of multiple energy carriers. *IEEE Transactions on Power Systems* 22 (1), 145–155.
DOI: 10.1109/tpwrs.2006.888988
- Geidl, M., Koeppl, G., Favre-Perrod, P., Klöckl, B., Andersson, G., Fröhlich, K., 2006. Energy hubs for the future. *IEEE Power and Energy Magazine* 5 (1), 24–30.

- DOI: 10.1109/mpae.2007.264850
- Ghaemi Sigarchian, S., Orosz, M. S., Hemond, H. F., Malmquist, A., 2016. Optimum design of a hybrid PV-CSP-LPG microgrid with particle swarm optimization technique. *Applied Thermal Engineering* 109, 1031–1036.
DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2016.05.119
- Ghaemi, S., Salehi, J., Moeini-Aghtaie, M., 2021. Estimating abilities of distributed energy resources in providing flexible ramp products for active distribution networks. *Sustainable Cities and Society* 65, 102593.
DOI: 10.1016/j.scs.2020.102593
- Ghedamsi, K., Aouzellag, D., 2010. Improvement of the performances for wind energy conversions systems. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 32 (9), 936–945.
DOI: 10.1016/j.ijepes.2010.02.012
- Gil, J. D., Álvarez, J., Roca, L., Sánchez-Molina, J., Berenguel, M., Rodríguez, F., 2019. Optimal thermal energy management of a distributed energy system comprising a solar membrane distillation plant and a greenhouse. *Energy Conversion and Management* 198, 111791.
DOI: 10.1016/j.enconman.2019.111791
- Givler, T., Lilienthal, P., 2005. Using HOMER software, NREL's micropower optimization model, to explore the role of gen-sets in small solar power systems—Case study: Sri Lanka. Tech. rep., National Renewable Energy Laboratory, Golden, Colorado, United States.
- Gong, X., Dong, F., Mohamed, M. A., Abdalla, O. M., Ali, Z. M., 2020. A secured energy management architecture for smart hybrid microgrids considering pem-fuel cell and electric vehicles. *IEEE Access* 8, 47807–47823.
DOI: 10.1109/access.2020.2978789
- Good, N., Mancarella, P., 2019. Flexibility in multi-energy communities with electrical and thermal storage: A stochastic, robust approach for multi-service demand response. *IEEE Transactions on Smart Grid* 10 (1), 503–513.
DOI: 10.1109/tsg.2017.2745559
- Groissböck, M., 2019. Are open source energy system optimization tools mature enough for serious use? *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 102, 234–248.
DOI: 10.1016/j.rser.2018.11.020
- Groover, M. P., 2015. *Automation, production systems, and computer-integrated manufacturing*, 4th Edition. Pearson.
- Gropp, W., Moré, J. J., 1997. Optimization environments and the NEOS server. In: Buhman, M. D., Iserles, A. (Eds.), *Approximation theory and optimization*. Cambridge University Press, pp. 167–182.
- Gu, W., Wu, Z., Bo, R., Liu, W., Zhou, G., Chen, W., Wu, Z., 2014. Modeling, planning and optimal energy management of combined cooling, heating and power microgrid: A review. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 54, 26–37.
DOI: 10.1016/j.ijepes.2013.06.028
- Guelpa, E., Bischì, A., Verda, V., Chertkov, M., Lund, H., 2019. Towards future infrastructures for sustainable multi-energy systems: A review. *Energy* 184, 2–21.
DOI: 10.1016/j.energy.2019.05.057
- Gurobi Optimization, LLC, 2019. *Gurobi Optimizer Reference Manual*. [Online]. Available: <http://www.gurobi.com>. Accessed on: Sep. 20, 2020.
- Hatzigiorgiou, N., Asano, H., Irvani, R., Marnay, C., 2007. Microgrids. *IEEE Power and Energy Magazine* 5 (4), 78–94.
DOI: 10.1109/mpae.2007.376583
- Hemmati, M., Mirzaei, M. A., Abapour, M., Zare, K., Mohammadi-ivatloo, B., Mehrjerdi, H., Marzband, M., 2021. Economic-environmental analysis of combined heat and power-based reconfigurable microgrid integrated with multiple energy storage and demand response program. *Sustainable Cities and Society* 69, 102790.
DOI: 10.1016/j.scs.2021.102790
- Heredia, F. J., Cuadrado, M. D., Corchero, C., 2018. On optimal participation in the electricity markets of wind power plants with battery energy storage systems. *Computers & Operations Research* 96, 316–329.
DOI: 10.1016/j.cor.2018.03.004
- Holmström, K., Göran, A. O., Edvall, M. M., 2010. User's Guide for TOMLAB 7. [Online]. Available: <https://tomopt.com/docs/TOMLAB.pdf>. Accessed on: Sep. 20, 2020.
- Hou, W., Liu, Z., Ma, L., Wang, L., 2020. A real-time rolling horizon chance constrained optimization model for energy hub scheduling. *Sustainable Cities and Society* 62, 102417.
DOI: 10.1016/j.scs.2020.102417
- Huang, W., Zhang, N., Yang, J., Wang, Y., Kang, C., 2019. Optimal configuration planning of multi-energy systems considering distributed renewable energy. *IEEE Transactions on Smart Grid* 10 (2), 1452–1464.
DOI: 10.1109/tsg.2017.2767860
- IBM, 2019. *IBM ILOG CPLEX Optimization Studio*. [Online]. Available: <https://www.ibm.com/es-es/products/ilog-cplex-optimization-studio>. Accessed on: Sep. 20, 2020.
- Jamalzadeh, F., Mirzahosseini, A. H., Faghihi, F., Panahi, M., 2020. Optimal operation of energy hub system using hybrid stochastic-interval optimization approach. *Sustainable Cities and Society* 54, 101998.
DOI: 10.1016/j.scs.2019.101998
- Jiang, Y., Xu, J., Sun, Y., Wei, C., Wang, J., Ke, D., Li, X., Yang, J., Peng, X., Tang, B., 2017. Day-ahead stochastic economic dispatch of wind integrated power system considering demand response of residential hybrid energy system. *Applied Energy* 190, 1126–1137.
DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.01.030
- Ju, L., Zhao, R., Tan, Q., Lu, Y., Tan, Q., Wang, W., 2019. A multi-objective robust scheduling model and solution algorithm for a novel virtual power plant connected with power-to-gas and gas storage tank considering uncertainty and demand response. *Applied Energy* 250, 1336–1355.
DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.05.027
- Klessmann, C., Held, A., Rathmann, M., Ragwitz, M., 2011. Status and perspectives of renewable energy policy and deployment in the European Union—What is needed to reach the 2020 targets? *Energy policy* 39 (12), 7637–7657.
DOI: 10.1016/j.enpol.2011.08.038
- Kong, X., Xiao, J., Wang, C., Cui, K., Jin, Q., Kong, D., 2019. Bi-level multi-time scale scheduling method based on bidding for multi-operator virtual power plant. *Applied Energy* 249, 178–189.
DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.04.130
- Koraki, D., Strunz, K., 2018. Wind and solar power integration in electricity markets and distribution networks through service-centric virtual power plants. *IEEE Transactions on Power Systems* 33 (1), 473–485.
DOI: 10.1109/tpwrs.2017.2710481
- Kriechbaum, L., Scheiber, G., Kienberger, T., 2018. Grid-based multi-energy systems-modelling, assessment, open source modelling frameworks and challenges. *Energy, Sustainability and Society* 8 (35), 1–19.
DOI: 10.1186/s13705-018-0176-x
- Kyriakarakos, G., Dounis, A., Rozakis, S., Arvanitis, K., Papadakis, G., 2011. Polygeneration microgrids: A viable solution in remote areas for supplying power, potable water and hydrogen as transportation fuel. *Applied Energy* 88 (12).
DOI: 10.1016/j.apenergy.2011.05.038
- Lekvan, A. A., Habibifar, R., Moradi, M., Khoshjahan, M., Nojavan, S., Jermisittiparsert, K., 2021. Robust optimization of renewable-based multi-energy micro-grid integrated with flexible energy conversion and storage devices. *Sustainable Cities and Society* 64, 102532.
DOI: 10.1016/j.scs.2020.102532
- Li, H., Rezvani, A., Hu, J., Ohshima, K., 2021. Optimal day-ahead scheduling of microgrid with hybrid electric vehicles using MSFLA algorithm considering control strategies. *Sustainable Cities and Society* 66, 102681.
DOI: 10.1016/j.scs.2020.102681
- Li, P., Liu, Y., Xin, H., Jiang, X., 2018. A robust distributed economic dispatch strategy of virtual power plant under cyber-attacks. *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 14 (10), 4343–4352.
DOI: 10.1109/tii.2017.2788868
- Liang, Z., Alsafasfeh, Q., Jin, T., Pourbabak, H., Su, W., 2019. Risk-constrained optimal energy management for virtual power plants considering correlated demand response. *IEEE Transactions on Smart Grid* 10 (2), 1577–1587.
DOI: 10.1109/tsg.2017.2773039
- Liu, C., Wang, D., Yin, Y., 2019. Two-stage optimal economic scheduling for commercial building multi-energy system through internet of things. *IEEE Access* 7, 174562–174572.
DOI: 10.1109/access.2019.2957267
- Liu, J., Wang, A., Song, C., Tao, R., Wang, X., 2020. Cooperative operation for integrated multi-energy system considering transmission losses. *IEEE Access* 8, 96934–96945.
DOI: 10.1109/access.2020.2996913
- Liu, X., Mancarella, P., 2016. Modelling, assessment and Sankey diagrams of integrated electricity-heat-gas networks in multi-vector district energy systems. *Applied Energy* 167, 336–352.
DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.08.089
- Löfberg, J., 2004. YALMIP : a toolbox for modeling and optimization in MATLAB. In: *Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Robotics and Automation*. pp. 284–289.
DOI: 10.1109/cacsd.2004.1393890
- Long, S., Marjanovic, O., Parisio, A., 2019. Generalised control-oriented mo-

- delling framework for multi-energy systems. *Applied Energy* 235, 320–331. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.10.074
- Lu, S., Gu, W., Zhou, J., Zhang, X., Wu, C., 2018. Coordinated dispatch of multi-energy system with district heating network: Modeling and solution strategy. *Energy* 152, 358–370. DOI: 10.1016/j.energy.2018.03.088
- Luo, X., Xia, J., Liu, Y., 2021. Extraction of dynamic operation strategy for standalone solar-based multi-energy systems: A method based on decision tree algorithm. *Sustainable Cities and Society* 70, 102917. DOI: 10.1016/j.scs.2021.102917
- Mancarella, P., 2014. MES (multi-energy systems): An overview of concepts and evaluation models. *Energy* 65, 1–17. DOI: 10.1016/j.energy.2013.10.041
- Mansour-Saatloo, A., Mirzaei, M. A., Mohammadi-Ivatloo, B., Zare, K., 2020. A risk-averse hybrid approach for optimal participation of power-to-hydrogen technology-based multi-energy microgrid in multi-energy markets. *Sustainable Cities and Society* 63, 102421. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102421
- Mansouri, S. A., Ahmarinejad, A., Nematbakhsh, E., Javadi, M. S., Jordehi, A. R., Catalão, J. P., 2021. Energy management in microgrids including smart homes: A multi-objective approach. *Sustainable Cities and Society* 69, 102852. DOI: 10.1016/j.scs.2021.102852
- Marnay, C., Venkataramanan, G., Stadler, M., Siddiqui, A., Firestone, R., Chandran, B., 2008. Optimal technology selection and operation of commercial-building microgrids. *IEEE Transactions on Power Systems* 23 (3), 975–982. DOI: 10.1109/tpwrs.2008.922654
- Maroufshat, A., Taqvi, S. T., Miragha, A., Fowler, M., Elkamel, A., 2019. Modeling and optimization of energy hubs: A comprehensive review. *Inventions* 4 (3), 50. DOI: 10.3390/inventions4030050
- Martinez Cesena, E. A., Mancarella, P., 2019. Energy systems integration in smart districts: Robust optimisation of multi-energy flows in integrated electricity, heat and gas networks. *IEEE Transactions on Smart Grid* 10 (1), 1122–1131. DOI: 10.1109/tsg.2018.2828146
- Mavromatidis, G., Petkov, I., 2021. Mango: A novel optimization model for the long-term, multi-stage planning of decentralized multi-energy systems. *Applied Energy* 288, 116585. DOI: 10.1016/j.apenergy.2021.116585
- Mehdi, M., Kim, C., Saad, M., 2020. Robust centralized control for dc islanded microgrid considering communication network delay. *IEEE Access* 8, 77765–77778. DOI: 10.1109/access.2020.2989777
- Mehrabadi, R. A., Moghaddam, M. P., Sheikh-El-Eslami, M. K., 2020. Regulatory-intervented sustainable generation expansion planning in multi-electricity markets. *Sustainable Cities and Society* 52, 101794. DOI: 10.1016/j.scs.2019.101794
- Menezes Morato, M., da Costa Mendes, P. R., Normey-Rico, J. E., Bordons, C., 2017. Optimal operation of hybrid power systems including renewable sources in the sugar cane industry. *IET Renewable Power Generation* 11 (8), 1237–1245. DOI: 10.1049/iet-rpg.2016.0443
- Minutillo, M., Perna, A., Sorce, A., 2019. Combined hydrogen, heat and electricity generation via biogas reforming: Energy and economic assessments. *International Journal of Hydrogen Energy* 44 (43), 23880–23898. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.07.105
- Mirzapour-Kamanaj, A., Majidi, M., Zare, K., Kazemzadeh, R., 2020. Optimal strategic coordination of distribution networks and interconnected energy hubs: A linear multi-follower bi-level optimization model. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 119, 105925. DOI: 10.1016/j.ijepes.2020.105925
- Mohamed, M. A., Abdullah, H. M., El-Meligy, M. A., Sharaf, M., Soliman, A. T., Hajjiah, A., 2021. A novel fuzzy cloud stochastic framework for energy management of renewable microgrids based on maximum deployment of electric vehicles. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 129, 106845. DOI: 10.1016/j.ijepes.2021.106845
- Mohammadi, M., Ghasempour, R., Astaraei, F. R., Ahmadi, E., Aligholian, A., Toopshekan, A., 2018. Optimal planning of renewable energy resource for a residential house considering economic and reliability criteria. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 96, 261–273. DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.10.017
- Mohammadi, M., Noorollahi, Y., Mohammadi-ivatloo, B., Yousefi, H., 2017a. Energy hub: From a model to a concept—A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 80, 1512–1527. DOI: 10.1016/j.rser.2017.07.030
- Mohammadi, M., Noorollahi, Y., Mohammadi-ivatloo, B., Yousefi, H., Jalilinasrabad, S., 2017b. Optimal scheduling of energy hubs in the presence of uncertainty—A review. *Journal of Energy Management and Technology* 1 (1), 1–17. DOI: 10.22109/jem.2017.49432
- Mohammed, A., Refaat, S. S., Bayhan, S., Abu-Rub, H., 2019. AC micro-grid control and management strategies: Evaluation and review. *IEEE Power Electronics Magazine* 6 (2), 18–31. DOI: 10.1109/mpe.2019.2910292
- Nasiri, N., Yazdankhah, A. S., Mirzaei, M. A., Loni, A., Mohammadi-Ivatloo, B., Zare, K., Marzband, M., 2020. A bi-level market-clearing for coordinated regional-local multi-carrier systems in presence of energy storage technologies. *Sustainable Cities and Society* 63, 102439. DOI: 10.1016/j.scs.2020.102439
- Naval, N., Sánchez, R., Yusta, J. M., 2020. A virtual power plant optimal dispatch model with large and small-scale distributed renewable generation. *Renewable Energy* 151, 57–69. DOI: 10.1016/j.renene.2019.10.144
- Nosratabadi, S. M., Jahandide, M., Guerrero, J. M., 2021. Robust scenario-based concept for stochastic energy management of an energy hub contains intelligent parking lot considering convexity principle of chp nonlinear model with triple operational zones. *Sustainable Cities and Society* 68, 102795. DOI: 10.1016/j.scs.2021.102795
- Ombach, J., 2014. A short introduction to stochastic optimization. *Schedae Informaticae* 23, 9–20. DOI: 10.4467/20838476si.14.001.3018
- Orehounig, K., Ewins, R., Dorer, V., 2015. Integration of decentralized energy systems in neighbourhoods using the energy hub approach. *Applied Energy* 154, 277–289. DOI: 10.1016/j.apenergy.2015.04.114
- Pandžić, H., Kuzle, I., Capuder, T., 2013. Virtual power plant mid-term dispatch optimization. *Applied Energy* 101, 134–141. DOI: 10.1016/j.apenergy.2012.05.039
- Parisio, A., Del Vecchio, C., Vaccaro, A., 2012. A robust optimization approach to energy hub management. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems* 42 (1), 98–104. DOI: 10.1016/j.ijepes.2012.03.015
- Pasetti, M., Rinaldi, S., Manerba, D., Pasetti, M., Rinaldi, S., Manerba, D., 2018. A virtual power plant architecture for the demand-side management of smart prosumers. *Applied Sciences* 8 (3), 432. DOI: 10.3390/app8030432
- Pei, W., Ma, X., Deng, W., Chen, X., Sun, H., Li, D., 2019. Industrial multi-energy and production management scheme in cyber-physical environments: A case study in a battery manufacturing plant. *IET Cyber-Physical Systems: Theory & Applications* 4 (1), 13–21. DOI: 10.1049/iet-cps.2018.5029
- Phurailatpam, C., Rajpurohit, B. S., Wang, L., 2018. Planning and optimization of autonomous DC microgrids for rural and urban applications in India. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 82, 194–204. DOI: 10.1016/j.rser.2017.09.022
- Pudjianto, D., Ramsay, C., Strbac, G., 2007. Virtual power plant and system integration of distributed energy resources. *IET Renewable Power Generation* 1 (1), 10–16. DOI: 10.1049/iet-rpg:20060023
- Ramos-Teodoro, J., 2021. Estrategias de gestión energética en entornos productivos con apoyo de energía solar. Tesis doctoral, Universidad de Almería.
- Ramos-Teodoro, J., Gil, J. D., Roca, L., Rodríguez, F., Berenguel, M., 2021. Optimal water management in agro-industrial districts: An energy hub's case study in the southeast of Spain. *Processes* 9 (2), 333. DOI: 10.3390/pr9020333
- Ramos-Teodoro, J., Rodríguez, F., Berenguel, M., Torres, J. L., 2018. Heterogeneous resource management in energy hubs with self-consumption: Contributions and application example. *Applied Energy* 229, 537–550. DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.08.007
- Rodríguez-Blanco, T., Sarabia, D., De Prada, C., 2018. Optimización en tiempo real utilizando la metodología de adaptación de modificadores. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial* 15 (2), 133–144. DOI: 10.4995/riai.2017.8846
- Sadeghi, H., Rashidinejad, M., Moeini-Aghtaie, M., Abdollahi, A., 2019. The energy hub: An extensive survey on the state-of-the-art. *Applied Thermal Engineering* 161, 114071.

- DOI: 10.1016/j.applthermaleng.2019.114071
- Sadeghian, O., Oshnoei, A., Khezri, R., Muyeen, S., 2020. Risk-constrained stochastic optimal allocation of energy storage system in virtual power plants. *Journal of Energy Storage* 31, 101732.
DOI: 10.1016/j.est.2020.101732
- Sadeghian, O., Shotorbani, A. M., Mohammadi-ivatloo, B., 2019. Generation maintenance scheduling in virtual power plants. *IET Generation, Transmission & Distribution* 13 (12), 2584–2596.
DOI: 10.1049/iet-gtd.2018.6751
- Sahinidis, N. V., 2019. BARON v. 2019.7.13: Global Optimization of Mixed-Integer Nonlinear Programs, *User's Manual*. [Online]. Available: <http://www.minlp.com/downloads/docs/baron/%20manual.pdf>. Accessed on: Sep. 20, 2020.
- Salehpour, M. J., Alishavandi, A. M., Hossain, M. J., Rostami, S. M. H., Wang, J., Yu, X., 2021. A stochastic decentralized model for the privately interactive operation of a multi-carrier energy system. *Sustainable Cities and Society* 64, 102551.
DOI: 10.1016/j.scs.2020.102551
- Suman, G. K., Guerrero, J. M., Roy, O. P., 2021. Optimisation of solar/wind/bio-generator/diesel/battery based microgrids for rural areas: A PSO-GWO approach. *Sustainable Cities and Society* 67, 102723.
DOI: 10.1016/j.scs.2021.102723
- Tahir, M. F., Haoyong, C., Mehmood, K., Ali, N., Bhutto, J. A., 2019. Integrated energy system modeling of china for 2020 by incorporating demand response, heat pump and thermal storage. *IEEE Access* 7, 40095–40108.
DOI: 10.1109/access.2019.2905684
- Taylor, M., Long, S., Marjanovic, O., Parisio, A., 2021. Model predictive control of smart districts with fifth generation heating and cooling networks. *IEEE Transactions on Energy Conversion*.
DOI: 10.1109/TEC.2021.3082405
- The MathWorks, Inc., 2019. MATLAB R2019a. [Online]. Available: <http://es.mathworks.com/products/matlab/>. Accessed on: Sep. 20, 2020.
- Torres-Moreno, J., Gimenez-Fernandez, A., Perez-Garcia, M., Rodriguez, F., 2018. Energy management strategy for micro-grids with PV-battery systems and electric vehicles. *Energies* 11 (3), 522.
DOI: 10.3390/en11030522
- Vahedipour-Dahraie, M., Rashidzade-Kermani, H., Shafie-khah, M., Catalão, J. P., 2020. Risk-averse optimal energy and reserve scheduling for virtual power plants incorporating demand response programs. *IEEE Transactions on Smart Grid*.
DOI: 10.1109/TSG.2020.3026971
- van Beuzekom, I., Gibescu, M., Slootweg, J., 2015. A review of multi-energy system planning and optimization tools for sustainable urban development. In: *Proceedings of the 2015 IEEE Eindhoven PowerTech*. IEEE, pp. 1–7.
DOI: 10.1109/ptc.2015.7232360
- Velarde, P., Valverde, L., Maestre, J., Ocampo-Martinez, C., Bordons, C., 2017. On the comparison of stochastic model predictive control strategies applied to a hydrogen-based microgrid. *Journal of Power Sources* 343, 161–173.
DOI: 10.1016/j.jpowsour.2017.01.015
- Vergara-Dietrich, J. D., Menezes Morato, M., da Costa Mendes, P. R., Cani, A. A., Normey-Rico, J. E., Bordons, C., 2019. Advanced chance-constrained predictive control for the efficient energy management of renewable power systems. *Journal of Process Control* 74, 120–132.
DOI: 10.1016/j.jprocont.2017.11.003
- Wang, H., Riaz, S., Mancarella, P., 2020. Integrated techno-economic modeling, flexibility analysis, and business case assessment of an urban virtual power plant with multi-market co-optimization. *Applied Energy* 259, 114142.
DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.114142
- Wang, J., Hu, Z., Xie, S., 2019. Expansion planning model of multi-energy system with the integration of active distribution network. *Applied Energy* 253, 113517.
DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.113517
- Wang, Y., Zhang, N., Zhuo, Z., Kang, C., Kirschen, D., 2018. Mixed-integer linear programming-based optimal configuration planning for energy hub: Starting from scratch. *Applied Energy* 210, 1141–1150.
DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.08.114
- Wei, C., Xu, J., Liao, S., Sun, Y., Jiang, Y., Ke, D., Zhang, Z., Wang, J., 2018. A bi-level scheduling model for virtual power plants with aggregated thermostatically controlled loads and renewable energy. *Applied Energy* 224, 659–670.
DOI: 10.1016/j.apenergy.2018.05.032
- Wenzel, S., Paulen, R., Stojanovski, G., Krämer, S., Beisheim, B., Engell, S., 2016. Optimal resource allocation in industrial complexes by distributed optimization and dynamic pricing. *Automatisierungstechnik* 64 (6), 428–442.
DOI: 10.1515/auto-2016-0003
- Wirtz, M., Hahn, M., Schreiber, T., Müller, D., 2021. Design optimization of multi-energy systems using mixed-integer linear programming: Which model complexity and level of detail is sufficient? *Energy Conversion and Management* 240, 114249.
DOI: 10.1016/j.enconman.2021.114249
- Wozabal, D., Rameseder, G., 2020. Optimal bidding of a virtual power plant on the Spanish day-ahead and intraday market for electricity. *European Journal of Operational Research* 280 (2), 639–655.
DOI: 10.1016/j.ejor.2019.07.022
- Yu, S., Fang, F., Liu, Y., Liu, J., 2019. Uncertainties of virtual power plant: Problems and countermeasures. *Applied Energy* 239, 454–470.
DOI: 10.1016/j.apenergy.2019.01.224
- Yuan, Z., Wogrin, S., Hesamzadeh, M. R., 2017. Towards the Power Synergy Hub (PSHub): Coordinating the energy dispatch of super grid by modified Benders decomposition. *Applied Energy* 205, 1419–1434.
DOI: 10.1016/j.apenergy.2017.09.086
- Zamani, A. G., Zakariazadeh, A., Jadid, S., 2016. Day-ahead resource scheduling of a renewable energy based virtual power plant. *Applied Energy* 169, 324–340.
DOI: 10.1016/j.apenergy.2016.02.011
- Zamanloo, S., Abyaneh, H. A., Nafisi, H., Azizi, M., 2021. Optimal two-level active and reactive energy management of residential appliances in smart homes. *Sustainable Cities and Society*, 102972.
DOI: 10.1016/j.scs.2021.102972
- Zeng, L., Sun, Y., Zhou, X., Li, B., Qi, B., 2018. Demand dispatch in cyber-physical load aggregation system with multilevel incentives. *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy* 6 (5), 968–978.
DOI: 10.1007/s40565-018-0451-z
- Zhang, G., Jiang, C., Wang, X., 2019. Comprehensive review on structure and operation of virtual power plant in electrical system. *IET Generation, Transmission & Distribution* 13 (2), 145–156.
DOI: 10.1049/iet-gtd.2018.5880
- Zhang, Y., Zhang, T., Wang, R., Liu, Y., Guo, B., 2015. Optimal operation of a smart residential microgrid based on model predictive control by considering uncertainties and storage impacts. *Solar Energy* 122, 1052–1065.
DOI: 10.1016/j.solener.2015.10.027
- Zhong, W., Yang, C., Xie, K., Xie, S., Zhang, Y., 2018. ADMM-based distributed auction mechanism for energy hub scheduling in smart buildings. *IEEE Access* 6, 45635–45645.
DOI: 10.1109/access.2018.2865625
- Zia, M. F., Benbouzid, M., Elbouchikhi, E., Muyeen, S., Techato, K., Guerrero, J. M., 2020. Microgrid transactive energy: Review, architectures, distributed ledger technologies, and market analysis. *IEEE Access* 8, 19410–19432.
DOI: 10.1109/access.2020.2968402

Apéndice A. Siglas y acrónimos

CC	restricciones probabilísticas, del inglés <i>chance constraints</i> .
CCGA	algoritmo de generación de columnas y restricciones, del inglés <i>column-and-constraint generation algorithm</i> .
CIGRE	Consejo Internacional de Grandes Redes Eléctricas.
CPS	sistema ciberfísico, del inglés <i>cyber-physical system</i> .
CVaR	valor en riesgo condicional, del inglés <i>conditional value at risk</i> .
DP	programación dinámica, del inglés <i>dynamic programming</i> .
DPS	sistema de producción distribuido, del inglés <i>distributed production system</i> .
EH	concentrador de energía, del inglés <i>energy hub</i> .
GA	algoritmo genético, del inglés <i>genetic algorithm</i> .

HVAC	calefacción, ventilación y aire acondicionado, del inglés <i>heat ventilation air conditioning</i> .	PEGASE	Simulación y estimación de estados avanzados de la red paneuropea, del inglés <i>Pan European Grid Advanced Simulación and state Estimation</i> .
IEEE	Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos, del inglés <i>Institute of Electrical and Electronics Engineers</i> .	PEM	método de estimación puntual, del inglés <i>point estimate method</i> .
IMP	Instituto Mihajlo Pupin.	PNMPC	aproximación práctica de control predictivo basado en modelo no lineal, del inglés <i>practical nonlinear model predictive control</i> .
LP	programación lineal, del inglés <i>linear programming</i> .	PSO	optimización por enjambre de partículas, del inglés <i>particle swarm optimisation</i> .
LQP	programación lineal cuadrática, del inglés <i>linear quadratic programming</i> .	PV	fotovoltaico, del inglés <i>photovoltaic</i> .
MCS	simulación de Montecarlo, del inglés <i>Monte Carlo simulation</i> .	QP	programación cuadrática, del inglés <i>quadratic programming</i> .
MDP	procesos de decisión de Markov, del inglés <i>Markov decision processes</i> .	RES	fuentes de energía renovables, del inglés <i>renewable energy sources</i> .
MES	sistema multienergía, del inglés <i>multi-energy system</i> .	RO	optimización robusta, del inglés <i>robust optimisation</i> .
MG	microrred, del inglés <i>microgrid</i> .	RTO	optimización en tiempo real, del inglés <i>real-time optimisation</i> .
MILP	programación lineal entera mixta, del inglés <i>mixed integer linear programming</i> .	RTS	sistema de ensayos de fiabilidad, del inglés <i>reliability test system</i> .
MINLP	programación no lineal entera mixta, del inglés <i>mixed integer non-linear programming</i> .	SOCP	programación cónica de segundo orden, del inglés <i>second-order cone programming</i> .
MIQCQP	programación cuadrática entera mixta restringida cuadráticamente, del inglés <i>mixed integer quadratically constrained quadratic programming</i> .	SP	programación estocástica, del inglés <i>stochastic programming</i> .
MIQP	programación cuadrática entera mixta, del inglés <i>mixed integer quadratic programming</i> .	TIC	tecnologías de la información y la comunicación.
MPC	control predictivo basado en modelo, del inglés <i>model predictive control</i> .	UK	Reino Unido, del inglés <i>United Kingdom</i> .
MPPT	seguidor del punto de máxima potencia, del inglés <i>maximum power point tracking</i> .	UoM	Universidad de Mánchester, del inglés <i>University of Manchester</i> .
MRS	sistema multirecursos, del inglés <i>multi-resource system</i> .	US	Estados Unidos, del inglés <i>United States</i> .
MS	Microsoft.	VPP	central eléctrica virtual, del inglés <i>virtual power plant</i> .
NLP	programación no lineal, del inglés <i>non-linear programming</i> .		