

1

**OBJETIVOS Y
PLANTEAMIENTO DE LA
TESIS DOCTORAL**

1.1 GENERALIDADES.

El progreso y desarrollo actual acarrearán desequilibrios socio-económicos e impactos medioambientales. La aplicación del concepto de desarrollo sostenible garantiza el crecimiento económico, el progreso social y el uso racional de los recursos. El desarrollo energético sostenible permite satisfacer las necesidades energéticas presentes sin comprometer las necesidades de las generaciones futuras, y el acceso a la energía de determinadas regiones y grupos de población.

El Protocolo de Kyoto, aprobado a finales de 1997, establece la reducción global de las emisiones de los principales gases que provocan el efecto invernadero. Para la Unión Europea el compromiso es la reducción de un 8 % para el año 2010. La generación eléctrica con fuentes de energías renovables contribuye de forma decisiva al desarrollo energético sostenible y a alcanzar los compromisos adquiridos en Kyoto.

La política de fomento de las energías renovables en la Unión Europea se basa en el Libro Blanco de las Energías Renovables. En él se establece como objetivo que las fuentes de energías renovables deben cubrir un 12 % del total de la demanda energética en el año 2010. Asimismo, la Directiva 2001/77/CE [37] obliga a los Estados miembros a adoptar medidas para el crecimiento de la producción de energía eléctrica mediante fuentes renovables. La fuente energética principal que puede permitir alcanzar este objetivo es la biomasa.

La biomasa es una de las fuentes renovables principales que conlleva además de la producción de energía, la generación de empleo y riqueza sobre todo en zonas rurales, allí donde se produce, contribuyendo al desarrollo sostenible. Con el aprovechamiento de la biomasa la emisión global de CO₂ a la atmósfera es nula. La producción de electricidad con energías renovables está totalmente vinculada con la Generación Eléctrica Distribuida (GD).

En una primera aproximación, la GD contempla la producción de energía eléctrica mediante sistemas modulares descentralizados, próximos al usuario final, conectados a la red de distribución o aislados. La capacidad máxima de los generadores que se incluyen en la GD ha ido aumentando en los últimos años (hasta 10 MW, 50 o incluso 100 MW). Se consideran sistemas de GD las plantas fotovoltaicas, las solares térmicas de alta temperatura, aerogeneradores, mini-hidráulica, plantas de biomasa, pilas de combustible, turbinas y micro-turbinas de gas, máquinas de combustión interna, etc. [10, 23, 39].

La implantación de sistemas de Generación Distribuida conlleva numerosas ventajas. Para la sociedad, el principal beneficio es la reducción de las emisiones de gases contaminantes a la atmósfera. Además:

- Generan energía eléctrica de forma modular.
- Aumentan la fiabilidad y seguridad del sistema eléctrico.
- Mejoran la calidad y flexibilidad del suministro de energía eléctrica.
- Aumentan la capacidad de la red de distribución.
- Reducen las pérdidas de distribución y, por consiguiente, los costes.
- La generación está muy próxima al lugar de consumo de energía eléctrica.
- Reducen las inversiones en infraestructura eléctrica.

Las compañías suministradoras de energía eléctrica se benefician por el impacto que producen los sistemas de generación distribuida. No obstante, la implantación de sistemas GD mal planificados no resulta ventajosa. Para que los beneficios anteriores se produzcan, la GD necesita optimizarse, tanto en su ubicación dentro de la red de distribución, en su tamaño o potencia nominal, configuración y condiciones de funcionamiento [16, 19, 20, 66, 67, 90].

La biomasa es la materia orgánica de origen biológico utilizable para otros fines distintos a los alimentarios como, por ejemplo, los energéticos o industriales. Constituye un recurso energético renovable. Los residuos forestales son una forma de biomasa, se

originan en los aprovechamientos forestales madereros, tratamientos silvícolas y trabajos para la prevención de incendios. No son extraídos habitualmente por no ser convertibles en subproductos pero pueden ser utilizados como combustible orgánico.

Las operaciones forestales que generan estos residuos vienen reguladas por los Planes de Ordenación de los Montes e Inventarios Forestales. En ellos se definen los tipos de trabajos a realizar cada año y en que zonas, de acuerdo a la densidad de vegetación, tipo de especies, su edad, diámetro, etc.

Realizados los tratamientos, los residuos quedan dispersos sobre la zona de actuación existiendo, al menos, la obligatoriedad de amontonarlos para su posterior quema controlada. Sin embargo, los residuos cercanos a carreteras y pistas forestales se pueden acopiar mediante maquinaria apropiada. Estos residuos no se incineran y se pueden aprovechar energéticamente en una planta de generación.

Los residuos transportados a la planta de aprovechamiento, se almacenan al aire libre y son sometidos a procesos de secado, astillado y molienda. Posteriormente, se produce su combustión, gasificación, producción de biocarburantes, etc., para su utilización como combustible [13].

Los costes de recogida y transporte de estos residuos hasta planta pueden considerarse elevados. La viabilidad de un proyecto de aprovechamiento de biomasa residual está totalmente condicionada a estos costes, a la inversión inicial y al precio de venta de la energía producida. Por ello, la necesidad de optimización del proceso productivo para el inversor resulta imprescindible.

La gasificación de la biomasa se consigue mediante la acción de calor y la carencia de oxígeno. El recurso se descompone térmicamente en un gas combustible permitiendo obtener mayor rendimiento que con la combustión directa y reduciendo la emisión de gases contaminantes. Existen diferentes tecnologías de gasificación:

gasificador de corrientes paralelas, gasificador en contracorriente, de lecho de fluido, etc. [9, 111, 124, 127].

Una pila de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte energía química en energía eléctrica de forma directa. Se basa en la reacción inversa de la electrolisis, la combinación de un gas rico en hidrógeno y un oxidante dan como resultado energía eléctrica. Existen diferentes tipos de pilas con sus particulares características de funcionamiento y componentes, su clasificación se realiza en función del electrolito utilizado: pilas de combustible de membrana (PEMFC), alcalinas (AFC), de ácido fosfórico (PAFC), de carbonatos fundidos (MCFC), de óxido sólido (SOFC), etc.

Las pilas de combustible presentan una elevada eficiencia y baja contaminación medioambiental. No producen ruido por carecer de partes móviles. Su diseño modular tan flexible responde a una demanda versátil de los consumidores. Debido a estas características, se espera que en el futuro estos sistemas tengan importantes aplicaciones en la generación eléctrica.

La pila de combustible de óxido sólido, SOFC, se compone de un electrolito óxido metálico no poroso y buen conductor. Su temperatura de operación oscila entre los 800 °C y los 1000 °C. Las características de funcionamiento de la pila SOFC permiten un reformado interno, aceptando como combustible hidrocarburos y determinados gases que para otro tipo de pilas resultan contaminantes, tales como el monóxido y el dióxido de carbono.

Además, las altas temperaturas de funcionamiento provocan una temperatura elevada en los gases de escape. Esta particularidad posibilita el acoplamiento de otros sistemas de generación en una configuración híbrida que aumenta la eficiencia global del proceso. El sistema compuesto por pila SOFC y turbina de gas (TG) es uno de los más atractivos, con gran capacidad y posibilidades de desarrollo. Puede alcanzar eficiencias superiores al 60 % [45, 57, 127].

Por otro lado, en los últimos años han aparecido numerosos problemas que presentan una gran complejidad en su estudio, análisis u optimización. Sirvan como ejemplo de estos problemas los siguientes: la planificación y optimización de la logística del transporte, el seguimiento de la posición de los usuarios de telefonía móvil conocido como la gestión del área de localización, la interpretación de las relaciones funcionales de los genes humanos, etc.

Este tipo de problemas necesitan de un tiempo de ejecución o de cálculo muy elevado para su resolución mediante técnicas exactas que muchas veces los hacen inabordables. Por ello, han aparecido métodos que utilizan un menor tiempo de ejecución pero que no garantizan la solución óptima aunque si muy aproximada. Estos métodos son las llamadas técnicas metaheurísticas, se fundamentan en estrategias genéricas de alto nivel que usan diferentes métodos heurísticos para explorar en grandes espacios de búsqueda la mejor solución posible. Algunas de estas técnicas metaheurísticas están basadas en comportamientos de la naturaleza, por lo que también se suelen llamar técnicas o algoritmos bioinspirados. La idea de reutilizar mecanismos que siempre han existido en la naturaleza para su aplicación en problemas reales supone un campo totalmente abierto a la investigación, por lo que suscita un gran interés por parte de la comunidad científica.

Una de estas técnicas metaheurísticas basadas en la naturaleza son los algoritmos basados en cúmulos, enjambres o nubes de partículas (“Particle Swarm Optimization”), PSO. Es una técnica reciente e innovadora. En 1995 fue introducida por primera vez por James Kennedy y Russ C. Eberhart. PSO incorpora comportamientos colectivos observados en las bandadas de aves, los bancos de peces, las colmenas de abejas e incluso en el comportamiento social de los humanos [95, 96, 97, 98].

1.2 ORIGEN Y MOTIVACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.

Los sistemas de generación con fuentes de energía renovable se están asentando en el mercado eléctrico actual. Principalmente, porque son muy favorables desde el punto de vista medioambiental, ya que prácticamente no emiten gases contaminantes a la atmósfera. En su construcción no se presentan tantas restricciones técnicas como en las grandes centrales eléctricas y sus rendimientos y fiabilidad son elevados.

La producción de energía eléctrica con combustibles fósiles resulta cada vez más inviable desde el punto de vista social, técnico y económico. La dependencia crítica de los combustibles fósiles provoca inseguridad e incertidumbre económica y energética.

La investigación en sistemas de generación de energía eléctrica que aprovechan la biomasa como combustible se considera importante y emergente [9, 53, 56, 82, 90, 94, 111, 127, 160, 162].

La resolución de problemas de optimización y búsqueda mediante algoritmos inspirados en la naturaleza, despierta en la actualidad un inusitado interés. Con la aplicación de estas técnicas se persiguen abordar problemas de forma más eficiente, optimizando el uso de los recursos disponibles para el cálculo (tiempo de ejecución, recursos computacionales y humanos) [2, 5, 30, 40, 81, 95, 96, 97, 98, 141, 146, 154].

El planteamiento y desarrollo de esta Tesis se fundamenta en los períodos de docencia e investigación realizados por el doctorando. Durante varios años, el autor de este trabajo ha encaminado sus estudios de tercer ciclo a las siguientes materias:

- ◆ Planificación y explotación de sistemas eléctricos.

- ◆ Aplicaciones de la Inteligencia Artificial a la Ingeniería Eléctrica.

- ◆ Aplicaciones eléctricas de las energías renovables.
- ◆ Generación Distribuida.
- ◆ Calidad eléctrica en las redes de distribución.
- ◆ Pilas de Combustible.

1.3 OBJETIVOS Y PLANTEAMIENTO DE LA TESIS.

El objetivo principal de esta Tesis es el estudio, análisis y optimización de sistemas de generación eléctrica constituidos por pila de combustible de óxido sólido (SOFC), combinada con otros sistemas como la turbina de gas, empleando como combustible el gas producido mediante un proceso de gasificación de residuos forestales, aplicando técnicas metaheurísticas basadas en optimización por enjambre o nubes de partículas.

Este objetivo general se apoya en los siguientes antecedentes que fortalecen la investigación planteada:

- La creciente evolución de los sistemas de GD y, especialmente, el desarrollo y posibilidades que presentan las pilas SOFC.
- Las necesidades actuales de aprovechamiento de la biomasa, en particular de los residuos procedentes de operaciones forestales.
- El interés existente y reciente por la utilización de técnicas metaheurísticas basadas en la naturaleza para la optimización de problemas.

Los objetivos específicos que se marcan con la realización de esta Tesis son:

- Definir los sistemas de generación distribuida, el impacto y beneficios que se obtienen con su implantación de forma adecuada y planificada. Particularmente, los sistemas con pila de combustible de óxido sólido.
- Analizar la utilización de los residuos forestales como recurso energético mediante su evaluación técnica, económica y energética, la complejidad de su aprovechamiento, el estudio de los métodos o sistemas de recogida, el análisis de los costes de recogida, tratamiento y transporte, etc., para su posterior utilización como combustible en los sistemas de generación SOFC, previo proceso de gasificación.
- Describir y formular las variables, funciones y restricciones económicas, eléctricas y energéticas vinculadas con la optimización de sistemas de generación SOFC alimentados por biomasa residual.
- Proponer un algoritmo basado en nubes de partículas para optimizar el aprovechamiento de biomasa residual dispersa, así como el tamaño y ubicación de los sistemas de generación SOFC.
- Simular la optimización planteada mediante MATLAB analizando los resultados, y en definitiva, obtener conclusiones y valoraciones positivas.

1.4 ESTRUCTURA DE LA TESIS.

La Tesis se ha estructurado en nueve capítulos. La figura 1.1 nos muestra de forma esquemática su ordenación. El presente capítulo sirve de introducción y planteamiento general. A continuación se expone brevemente el contenido del resto de capítulos:

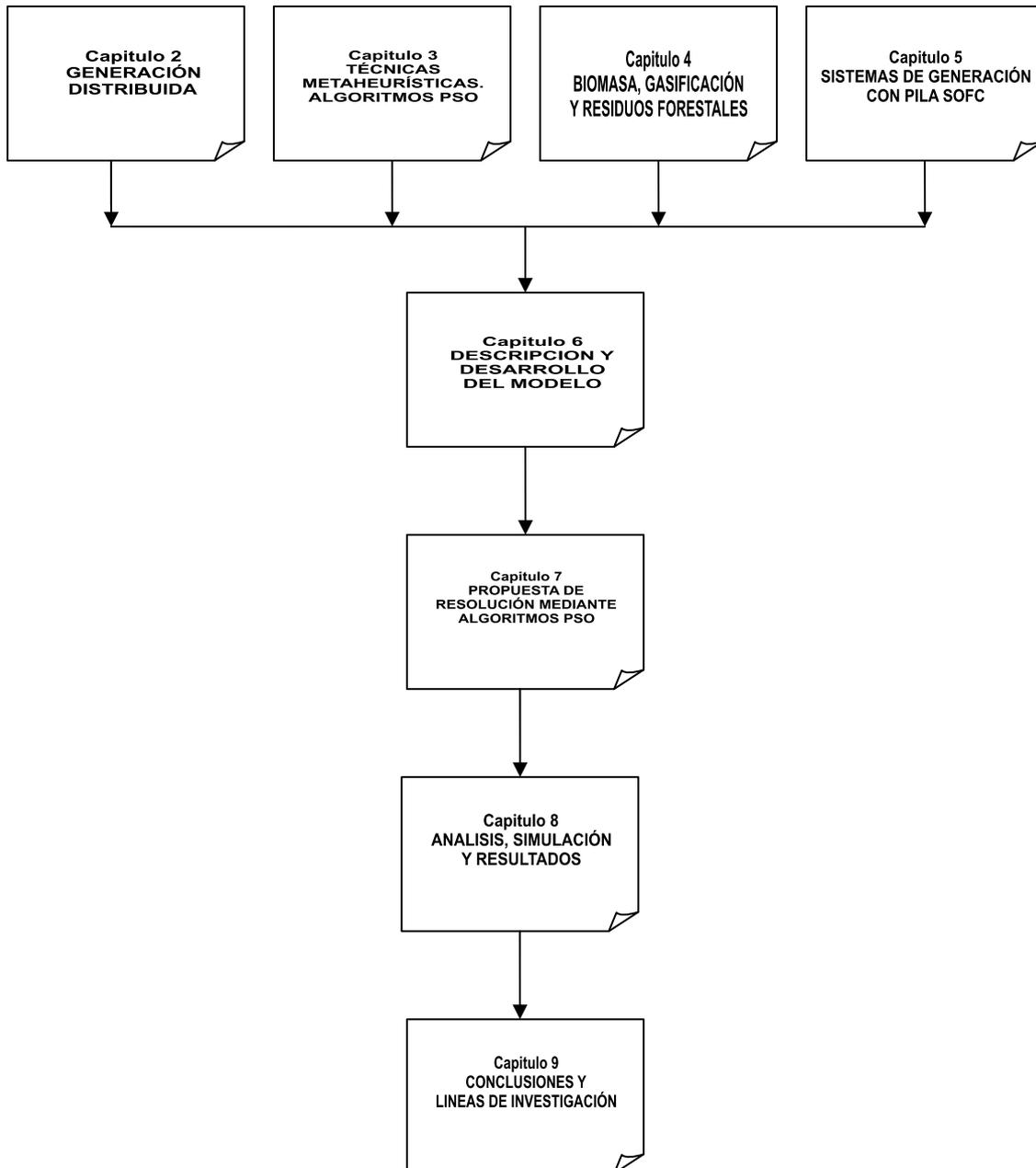


Figura 1.1: Esquema de la estructura de la Tesis Doctoral.

- El **capítulo 2** describe el estado del arte de la Generación Distribuida. Se repasa el concepto de GD de las publicaciones más relevantes que se han consultado en esta materia. Se detallan las características principales de la GD, los tipos de tecnología existentes, aplicaciones, duración del suministro, tipo de energía generada, etc. Se indican los beneficios técnicos y económicos de la implantación de esta nueva forma de generación. El capítulo finaliza con una introducción a la necesidad de la optimización de sistemas de GD.
- El **capítulo 3** comienza con una introducción a la optimización con técnicas metaheurísticas clasificándolas en dos grupos, las metaheurísticas basadas en trayectoria y las basadas en población. Al segundo grupo pertenece el algoritmo PSO que se basa en el comportamiento del vuelo de bandadas de aves o el movimiento de bancos de peces. Por ello, PSO se considera un algoritmo inspirado en la naturaleza. Su descripción, funcionamiento, características y tipos, se exponen en los siguientes apartados. Posteriormente, se muestran los pseudocódigos correspondientes al algoritmo PSO para codificación continua y codificación binaria.
- El **capítulo 4** se inicia con la definición de biomasa, sus ventajas y características energéticas, se clasifica la biomasa atendiendo a su origen y se describen los sistemas de aprovechamiento energético existentes. En el siguiente apartado se analiza la gasificación, los tipos de gasificadores y su funcionamiento y el gas resultante del proceso. Los residuos forestales son aquellos que se generan en las operaciones silvícolas y aprovechamientos madereros realizados directamente en el medio forestal. Se indican los residuos generados en cada una de las actividades forestales. Se manifiesta la complejidad del aprovechamiento y evaluación de los residuos condicionado por numerosos factores (tipo de especie forestal, edad, densidad de vegetación, diámetros y alturas de las plantas, necesidades de las operaciones forestales, la periodicidad de los tratamientos, planificación de las

intervenciones, etc.). A continuación se exponen los distintos métodos de recogida o extracción de la biomasa forestal y se describen los niveles de evaluación de la biomasa y los métodos de estimación. El capítulo concluye con una formulación que permite valorar los costes asociados a la recogida y transporte de los residuos a la planta de aprovechamiento.

- El **capítulo 5** se ocupa de los sistemas con pila SOFC y se desarrolla un modelo técnico de un sistema híbrido formado por una pila SOFC y una turbina de gas. En el inicio del capítulo se realiza una descripción general de los componentes que constituyen la pila SOFC, de las configuraciones geométricas y de las reacciones químicas que suceden en su interior. A continuación, se describen los componentes básicos de una planta SOFC. El capítulo continúa con la definición y descripción de los sistemas híbridos con pila de combustible. Se desarrolla y detalla el sistema formado por una pila SOFC y una turbina de gas (sistema híbrido SOFC-TG). Se presentan dos configuraciones típicas de estos sistemas híbridos. Posteriormente, se desarrolla un modelo técnico de un sistema SOFC-TG para su aplicación al modelo completo que se desarrolla en el siguiente capítulo.
- En el **capítulo 6** se realiza la descripción del problema y el desarrollo del modelo técnico, económico y geográfico global del problema a optimizar. Se plantean diversas ecuaciones técnicas y económicas que permiten calcular los costes e ingresos del proceso productivo, los costes de pérdidas energéticas en la red de distribución eléctrica y la evaluación de funciones económicas. El análisis económico elegido es dinámico por lo que la mayoría de las funciones se adaptan a su valor actual. Se consideran varios planteamientos: la optimización del tamaño de la planta de generación mediante un planteamiento simplificado (considerando constantes la biomasa utilizable y otros parámetros relacionados con los costes de extracción y transporte); la optimización del tamaño y la ubicación de la planta de generación desde el punto de vista del inversor y considerando todas las

variables posibles; el análisis y optimización de la planta desde el punto de vista de la empresa distribuidora de energía; y la optimización del sistema desde un punto de vista global (del inversor y de la empresa distribuidora simultáneamente) considerando funciones económicas y restricciones técnicas.

- En el **capítulo 7** se propone un método de resolución al modelo desarrollado en el capítulo 6 basado en la aplicación de un algoritmo PSO. Se analiza la problemática de la resolución, se explica, se desarrolla y se justifica el algoritmo PSO propuesto. En otro apartado se describe la codificación binaria de las partículas o posibles soluciones adaptándola al algoritmo PSO. En la segunda parte del capítulo se expone el funcionamiento del algoritmo, los parámetros de entrada necesarios, los criterios para su evaluación y las modificaciones que se le realizan a la versión del algoritmo PSO para codificación binaria existente que se ha escogido como base.
- En el **capítulo 8** se presentan los resultados obtenidos durante el análisis y simulación del problema planteado. Se consideran diversos casos de estudio: se realiza un análisis aproximado con la optimización de la planta de generación mediante el planteamiento simplificado (considerando la biomasa utilizable y otros parámetros relacionados con los costes de extracción y transporte constantes); se analiza y optimiza una planta desde el punto de vista de la empresa distribuidora de energía. La parte principal de este capítulo es la optimización utilizando el algoritmo PSO binario propuesto en el capítulo 7 y para diferentes casos: sin límite y con límite de potencia, comparando distintos sistemas de generación, analizando la influencia en los resultados de la dimensión del problema o el número de parcelas considerado y añadiendo restricciones eléctricas.

- El *capítulo 9* expone las principales aportaciones originales y conclusiones de la Tesis. También plantea las futuras líneas de investigación relacionadas con el trabajo desarrollado.

A continuación, se indica la bibliografía y fuentes consultadas más relevantes para la elaboración de este documento. La Tesis se complementa con dos apéndices, en el primero se presenta el programa principal del algoritmo PSO propuesto realizado en MATLAB, y en el segundo se realiza una descripción de los algoritmos genéticos, sus principios básicos y funcionamiento, así como la implementación en MATLAB del algoritmo empleado en las simulaciones.

Por último, se realiza un breve currículum en el que se detallan las publicaciones en revistas y congresos relacionadas con la Tesis en las que ha participado el doctorando.

