



**UNIVERSIDAD  
DEL AZUAY**

**FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA  
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA**

**Uso del principio fractal como estrategia para facilitar la integración técnica de los  
DERs en el sistema eléctrico**

**Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:**

**INGENIERO ELECTRÓNICO**

**Autores:**

**William Andrés Goercke Abad  
Roberth Andrés Romero Romero**

**Director:**

**Juan Carlos Sarmiento Vintimilla**

**CUENCA, ECUADOR**

**2026**

## **Dedicatoria**

A mis padres, William y Karina, por su amor incondicional, su guía constante y por los valores que me han inculcado a lo largo de mi vida. Gracias por ser mi ejemplo y mi mayor apoyo en cada paso de este camino.

A mis amigos Mateo Estévez, Francisco Gálvez, Berenice Guerrero y Evelyn Ochoa, por estar presentes en las alegrías y en los retos, convirtiendo cada esfuerzo en un recuerdo valioso.

A mis primos, Santiago y Juan Diego, por los años de compañía, las risas compartidas y los buenos momentos que han formado parte de esta etapa.

Con todo mi cariño y reconocimiento, este trabajo es un tributo a su influencia y enseñanzas. Este logro también les pertenece por su apoyo, su presencia y por todo lo que han cultivado en mí.

William Andrés Goercke Abad

## **Dedicatoria**

A mis padres, María Patricia Romero Aguilar y Robert René Romero Valarezo, por su amor incondicional, su apoyo constante y por ser el pilar fundamental en mi vida. Gracias por cada esfuerzo y por guiarme en cada etapa de mi formación personal y profesional.

A mi compañera de vida, Génesis Mariel Alvarado Romero, por su amor, comprensión y compañía incondicional a lo largo de este camino.

A mis hijos, Iker y Alana, quienes son mi mayor motivación y la razón para seguir superándome cada día.

A mi familia, por estar siempre presente, por su apoyo, sus consejos y por brindarme la fortaleza necesaria para alcanzar este logro.

Con todo mi cariño, dedico este trabajo a cada uno de ustedes, quienes han sido parte fundamental de este sueño hecho realidad.

Roberth Andrés Romero Romero

## **AGRADECIMIENTOS**

Expresamos nuestro más sincero agradecimiento a la Universidad del Azuay por el alto nivel académico y la formación integral que nos ha brindado. De igual manera, agradecemos a los docentes de la Escuela de Ingeniería Electrónica por compartir sus conocimientos y experiencias, impulsando nuestro aprendizaje y crecimiento profesional.

Un agradecimiento especial al Ing. Juan Carlos Sarmiento Vintimilla, por su guía, apoyo constante y por la amistad brindada durante este proceso; su acompañamiento hizo posible la realización de este trabajo

# USO DEL PRINCIPIO FRACTAL COMO ESTRATEGIA PARA FACILITAR LA INTEGRACIÓN TÉCNICA DE LOS DERS EN EL SISTEMA ELÉCTRICO

Este trabajo propone la integración técnica de recursos energéticos distribuidos en los sistemas eléctricos, basado en el principio fractal y la utilización de centrales eléctricas virtuales. Se aborda la problemática de sistemas eléctricos caracterizados por una alta dependencia hidroeléctrica y vulnerabilidad ante eventos climáticos, planteando una transición desde esquemas tradicionales centralizados (Top-Down) hacia arquitecturas descentralizadas (Bottom-Up).

Metodológicamente, se desarrolla un modelo de optimización matemática que coordina la operación de dos microrredes cooperativas basadas en el sistema IEEE de nueve barras, integrando generación renovable, generación térmica y almacenamiento en baterías. Se evalúan escenarios de operación desagregada y coordinada, considerando perfiles reales de demanda y generación. Los resultados son obtenidos mediante algoritmos CPLEX en GAMS y la validación técnica se realiza en PowerFactory.

Los resultados evidencian que la operación coordinada mejora el balance energético global, reduce la necesidad de generación térmica de respaldo y fortalece la confiabilidad del sistema.

**Palabras clave:** Cooperación energética, Microrredes, Optimización, Principio Fractal, Recursos Energéticos Distribuidos, VPP.

# USE OF THE FRACTAL PRINCIPLE AS A STRATEGY TO FACILITATE THE TECHNICAL INTEGRATION OF DERs IN THE ELECTRICAL SYSTEM

This work proposes the technical integration of distributed energy resources into electrical systems, based on the fractal principle and the use of virtual power plants. It addresses the challenges of electrical systems characterized by high hydroelectric dependence and vulnerability to climatic events, proposing a transition from traditional centralized schemes (Top-Down) toward decentralized architectures (Bottom-Up).

Methodologically, a mathematical optimization model is developed to coordinate the operation of two cooperative microgrids based on the IEEE nine-bus system, integrating renewable generation, thermal generation, and battery energy storage. Disaggregated and coordinated operation scenarios are evaluated considering real demand and generation profiles. The results are obtained using CPLEX algorithms in GAMS, while the technical validation is performed in PowerFactory.

The results demonstrate that coordinated operation improves the overall energy balance, reduces the need for backup thermal generation, and strengthens system reliability.

**Keywords:** Distributed Energy Resources, energy cooperation, fractal, microgrids, optimization, Virtual Power Plant.