



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

# MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

## TRABAJO FIN DE MÁSTER EVALUACIÓN DE FIABILIDAD EN SISTEMAS CON MICRORREDES

Autor: Iria Basanta Vázquez  
Director: Carlos Mateo Domingo  
Co-Director: Fernando Postigo Marcos

Madrid  
Julio de 2020



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título Evaluación de fiabilidad en sistemas con microrredes en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas en el curso académico 2019/2020 es de mi autoría, original e inédito y no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos. El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Iria Basanta Vázquez

Fecha: ..21../ ..07../ 2020..

Autorizada la entrega del proyecto

EL DIRECTOR DEL PROYECTO



Fdo.: Carlos Mateo Domingo

Fecha: ..21../ ..07../ 2020..



Fdo.: Fernando Postigo Marcos

Fecha: ...21../ ..7.../2020..





**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

# MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA INDUSTRIAL

## TRABAJO FIN DE MÁSTER EVALUACIÓN DE FIABILIDAD EN SISTEMAS CON MICRORREDES

Autor: Iria Basanta Vázquez  
Director: Carlos Mateo Domingo  
Co-Director: Fernando Postigo Marcos

Madrid  
Julio de 2020



## Resumen

Este estudio explora el papel de las microrredes conectadas en la mejora de la fiabilidad global de la red. El primer objetivo de este trabajo es estudiar y cuantificar el efecto sobre la continuidad del suministro de las microrredes dentro de la red principal. El segundo objetivo es proponer un método para la optimización del plan de brigadas en sistemas con microrredes. Cuantificar la aportación a la calidad del suministro de las microrredes integradas en la red principal permite evaluar propuestas de implantación de microrredes. Para la evaluación de la fiabilidad se utilizan los índices de continuidad de suministro SAIDI y SAIFI. Estos índices proporcionan una medida de la frecuencia y la duración de las interrupciones en una red. Se ha desarrollado una herramienta informática que permite calcular los índices de continuidad de suministro de una red eléctrica teniendo en cuenta la posibilidad de que existan microrredes conectadas. Para el cálculo de los índices de calidad se tiene en cuenta la planificación de brigadas de la red. Se propone una planificación de brigadas basada en árboles de decisión. En cuanto a la optimización de brigadas, se presentan y se comparan los resultados de dos métodos alternativos: los algoritmos genéticos y el generador de árboles de decisión aleatorios. Tras comparar ambos métodos se concluye que el generador de árboles aleatorios es más eficaz en computo global. A pesar de que no garantiza encontrar el óptimo y de que para redes pequeñas el algoritmo genético puede encontrar soluciones mejores, el generador de árboles funciona bien para todos los tamaños de red, tiene un tiempo de computación mucho menor y garantiza siempre que se localice la falta con la mayor precisión. Mientras, el algoritmo genético empeora su rendimiento a medida que se agranda la red y el tiempo de computación es sensiblemente mayor.



## Abstract

This paper studies the role of on-grid microgrids in the improvement of global grid reliability. The first objective of this work is to study and quantify the effect of on-grid microgrids on the supply continuity. The second objective is to propose a method for maintenance crew management optimization. Quantifying the contribution of microgrids to supply continuity allows for microgrid implementation proposals evaluation. To evaluate the reliability two international indexes are used: SAIDI and SAIFI. These indexes provide a measurement of the frequency and duration of supply interruptions in a grid. An informatic tool has been developed that allows to calculate the supply continuity indexes of a user-defined grid where it is possible to introduce microgrids. In order to calculate the supply continuity indexes, it is necessary to account for the maintenance crew planning. This work proposes a maintenance crew planning based on decision trees. Regarding the optimization of the maintenance crew planning, two methodologies are presented and compared: genetic algorithms and a decision tree random generator. After comparison of the two methods it is concluded that the decision tree generator is the most effective one in global terms. Despite the fact that it doesn't guarantee finding the optimum solution and that for small grids the genetic algorithm may find better solutions, the decision tree generator always finds a good solution independently of the size of the grid, has a low computational time and guarantees precise localization of the fault. Meanwhile, the genetic algorithm's performance worsens as the grid enlarges and it has a significantly higher computational time.



# EVALUACION DE FIABILIDAD EN SISTEMAS CON MICRORREDES

A handwritten signature in black ink, consisting of a stylized, cursive 'B' followed by the name 'Basanta' written in a similar cursive style.

**Autora: Basanta Vázquez, Iria.**

Directores: Mateo Domingo, Carlos; Postigo Marcos, Fernando.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## RESUMEN DEL PROYECTO

### 1. Introducción

Actualmente, el sector eléctrico español, como ocurre en gran parte de los países, se enfrenta a un proceso de transición hacia un modelo más sostenible íntimamente ligado a las energías renovables. Esta transición trae consigo la posibilidad de mejorar la calidad del suministro a través de nuevos métodos de generación. Particularmente, la descentralización de la generación permite mejorar la continuidad del suministro.

El concepto de calidad del suministro incluye distintos aspectos como son la continuidad del suministro, la calidad del producto, y la calidad de atención y relación al cliente. En este proyecto, sin embargo, cuando se hace referencia a la calidad del suministro se alude en concreto a la continuidad del suministro, es decir, a la frecuencia y duración de las interrupciones del mismo.

Las microrredes son una tecnología emergente que actualmente goza de amplia popularidad. Según el departamento de energía de los Estados Unidos una microrred es: “un grupo de cargas interconectadas y de generación distribuida dentro de unos límites claros establecidos y que funciona como una única entidad controlable con respecto a la red. Una microrred puede conectarse o desconectarse de la red principal para su operación conectada a la red o en modo isla.” [1] Es decir, una microrred suele estar compuesta por elementos de generación distribuida, típicamente renovables, pero también a menudo grupos electrógenos de apoyo, un grupo de cargas, y un sistema de control y comunicaciones. En ocasiones, las microrredes también pueden contar con un sistema de almacenamiento, por ejemplo, con baterías. La definición de microrred da cabida a un amplio espectro de configuraciones y tamaños, por lo que se pueden encontrar ejemplos muy diversos. Debido al auge de las energías renovables y del autoconsumo, las microrredes se han convertido en una solución muy atractiva. Principalmente, las microrredes pueden ofrecer tres ventajas: alta fiabilidad del suministro, óptima eficiencia y mejora en la sostenibilidad [2]. El grado en el que una microrred cumple con estas características varía dependiendo de la configuración y complejidad de la misma. En muchos casos las microrredes se proponen como solución en aquellos lugares donde la calidad de la red principal es muy baja (lugares remotos, países poco desarrollados, falta de generación etc.) o en lugares donde la fiabilidad del suministro es crucial (bases militares, hospitales, cárceles, etc.).

Fruto de la transición energética y del auge de las microrredes, surge un nuevo paradigma de sistema eléctrico donde las microrredes se integran dentro de la red principal. Dichas microrredes operan conectadas a la red e interactúan con el resto de los elementos conectados, a la vez que podrían llegar a ser capaces de funcionar aisladas ante un corte en el suministro. En este proyecto se estudia el efecto que tiene la integración de las microrredes en la red principal sobre la continuidad del suministro.

### 2. Estado del Arte

Típicamente los índices de calidad de una red se calculan a partir de un historial de medidas a lo largo de un periodo de tiempo. Sin embargo, este procedimiento de cálculo requiere que la red exista y se encuentre en funcionamiento durante un cierto tiempo. En ocasiones, se desea conocer los índices de calidad de una red proyectada, por ejemplo, para tomar decisiones sobre inversiones. Algunos autores, utilizan el método analítico basado en la enumeración de contingencias, pero el método más popular es el método probabilista, en concreto las simulaciones de Monte Carlo, ya que reflejan el carácter estocástico de los fallos de los elementos, cosa que no hacen los modelos deterministas. Este método se ha desarrollado, por ejemplo, en [3] y [4]. Otros autores, combinan las simulaciones de Monte Carlo con algoritmos de optimización como los algoritmos de enjambre de partículas [5] o las redes neuronales [6].

Por su parte el cálculo determinista tiene como virtud que es un método ágil y relativamente sencillo con bajo coste computacional. Existen algunos ejemplos de cálculo determinista de los índices de calidad, aunque no es un método muy común. En [7] se modifican las formulas de calculo del SAIDI y del SAIFI para plantearlas en función de la fiabilidad de los elementos del sistema y de la ubicación de los elementos de protección de la red. Finalmente, en [8] se desarrolla una formulación binaria del SAIDI que expresa el SAIDI como función de la ubicación de distintos elementos de la red como interruptores, fusibles, reconectores etc. Esta formulación se demuestra válida para calcular el SAIDI global de una red, además de útil a la hora de optimizar la fiabilidad de esta. Respecto a la comparación de distintos métodos, [9] calcula la fiabilidad de tres casos de estudio mediante tres metodologías: análisis de árboles de fallas, diagramas de bloques y simulaciones de Monte Carlo. Los resultados obtenidos con los tres métodos son muy similares, con lo que se valida el modelado de la fiabilidad. Se comenta que para sistemas complejos las simulaciones de Monte Carlo son más fáciles de implementar.

En el caso de este proyecto, se desea calcular el tiempo de interrupción, para lo cual simularemos el recorrido óptimo de la brigada de mantenimiento con el fin de aislar la falta. En el caso de [10], se hace uso de las redes bayesianas para la toma de decisiones basada en reglas para resolver el problema de forma analítica. En [11] se determina el área afectada por la falta usando la búsqueda en anchura basada en la configuración del sistema y de las protecciones. El área afectada se determina encontrando los seccionadores que han despejado la falta, a su vez la distribución del sistema se representa usando un árbol dinámico como estructura de datos. Además, se hace una clasificación del tipo de punto de carga según el tiempo de restauración para determinar, una vez localizada la falta, el tiempo de restauración del servicio en cada punto. Por ejemplo, los puntos de carga de clase 'a' son los que no se ven afectados por la falta, mientras que la clase 'b' son los puntos aguas arriba de la falta que recuperan el servicio a través de la subestación principal mediante la acción de interruptores telemandados. Por otro lado, el problema de optimizar el recorrido de la brigada en la red está relacionado con el problema de optimizar la ubicación de los interruptores seccionadores, o del nivel de automatización de la red. A este respecto [12] utiliza un algoritmo determinista basado en diagramas de árbol, mientras que [13] utiliza un modelo de red de referencia junto con un análisis económico.

Finalmente, también existen diversos estudios en cuanto a la integración de microrredes en la red principal y su impacto en la fiabilidad del sistema. En [14] se determina una serie de

requerimientos para que una unidad de generación distribuida (GD) pueda contribuir a mejorar la continuidad en un sistema de distribución radial. Mientras que [15] recomienda modelar cada unidad de GD como una carga negativa y una fuente de tensión, ya que probablemente necesiten ser desconectadas de la red cuando ocurra una falta. Modelar las unidades GD como cargas negativas (a efectos del flujo de cargas) puede tener un impacto positivo en la continuidad del suministro si el análisis considera las limitaciones de capacidad durante la reconfiguración post-falta del sistema. Además, también mejora la fiabilidad de la red, durante la operación normal, disminuyendo la carga en las líneas. En [16] se utiliza el análisis modal de fallos y efectos para evaluar el impacto de las microrredes en la red, y en [17] los indicadores de la frecuencia y la duración de las interrupciones. De nuevo, el método probabilista con simulaciones de Monte Carlo aparece en [18], donde se considera el aislamiento intencionado de la GD y de las microrredes presentes en la red, en situaciones de falta, para distintos tipos de red de distribución. También en [19] se utilizan las simulaciones de Monte Carlo, pero además se hace una clasificación del tipo de faltas según el tiempo de restauración del servicio aguas-abajo de la falta. En este caso, las simulaciones de Monte Carlo permiten considerar escenarios donde ocurran distintas faltas simultáneamente. Además, para determinar las cargas que se pueden reponer, sin exceder la capacidad de la GD, se utiliza un proceso cíclico, que considera una rama redundante cada vez, y escoge la rama que represente la mayor carga repuesta. Por último, [20] determina la equivalencia de la instalación de GD a la alternativa de crear nuevas ramas que permitan la reconfiguración del sistema, de forma que se pueda determinar la inversión óptima. Para evaluar la fiabilidad, utiliza el programa DISREL. DISREL calcula los índices de continuidad del suministro a partir de las tasas de fallo de los componentes de la red.

En este estudio se opta por un método de cálculo analítico de los índices de calidad. Esto se debe a que, para redes de pequeño tamaño, el método analítico obtiene buenos resultados, y su aplicación en comparación con las simulaciones de Monte Carlo, supone una carga computacional mucho menor.

### 3. Motivación

Este estudio explora el papel de las microrredes conectadas en la mejora de la fiabilidad global de la red. Cuantificar la aportación a la calidad del suministro, de las microrredes integradas en la red principal, permite evaluar propuestas de implantación de microrredes. Las mejoras en los índices de calidad de la red se pueden traducir a términos económicos para determinar la idoneidad de una inversión, o comparar distintos proyectos de inversión. Esto resulta útil dado que los recursos para realizar este tipo de proyectos son limitados.

Por otra parte, en España la normativa vigente contempla unos niveles mínimos de continuidad del suministro exigibles. La garantía de la seguridad del suministro es especialmente importante tanto para la industria como para el sector servicios. Por lo que se establecen unos objetivos zonales y también unos mínimos por cliente. La remuneración de las compañías distribuidoras depende de la continuidad del suministro. El incumplimiento en la calidad de suministro individual de un cliente supone una retribución al mismo de hasta el 10% del importe de su factura anual. Pero la continuidad del suministro es un aspecto muy relevante en el sector eléctrico, no solamente como un objetivo de mínimos sino también por la importancia de brindar el mejor servicio posible a los clientes.

Como ya se ha comentado, las microrredes son una tecnología relativamente nueva y, por motivos de coste, su presencia es limitada. Por tanto, hay mucha investigación al respecto pendiente de una implantación masiva. En resumen, la creciente popularidad de las microrredes junto a la posibilidad de explotar nuevas líneas de investigación las convierte en un tema de gran interés para un trabajo de investigación.

#### 4. Objetivos del proyecto

Este proyecto tiene dos objetivos principales. En primer lugar desarrollar una herramienta informática que permita calcular los índices de continuidad de suministro de una red eléctrica, definida por el usuario, donde además se tenga en consideración la posibilidad de que existan microrredes conectadas a la red principal. Los índices considerados son SAIDI y SAIFI. En segundo lugar, desarrollar una herramienta capaz de optimizar el recorrido de las brigadas de mantenimiento ante la necesidad de localizar una falta. De forma última, ambas herramientas podrán usarse para optimizar el plan de brigadas de una red y calcular la calidad del suministro resultante.

Para comenzar, se pretende resolver el problema clásico, que no incluye microrredes, para redes de cualquier tamaño y topología. A la vez que se calculan los índices de calidad, el programa debe ser también capaz de, para una falta en una zona determinada, informar al usuario del tiempo que se tarda en aislar la falta, del tiempo de restablecimiento del servicio, del número de clientes afectados y de la potencia contratada afectada.

Más adelante, una vez que la herramienta sea capaz de calcular el caso clásico, el objetivo es incluir en las topologías posibles la conexión de microrredes a la red principal. Con esto, se busca desarrollar un método para cuantificar el impacto de las microrredes 'on-grid' en la fiabilidad total de la red.

En última instancia, el objetivo es desarrollar un método que permita valorar la contribución de las microrredes a la fiabilidad de la red principal, ofreciendo valores medibles y evaluables, a la vez que proponer la mejor estrategia de mantenimiento para dicha red. Los objetivos del trabajo se pueden listar según el orden en el que se abordan en el estudio como:

1. Cálculo de los índices de continuidad del suministro en redes convencionales
2. Optimización del plan de brigadas en redes convencionales
3. Cálculo de los índices de continuidad del suministro en redes con generación distribuida
4. Optimización del plan de brigadas en redes con generación distribuida

#### 5. Metodología de trabajo

Para la evaluación de la fiabilidad de los sistemas se utilizarán los índices SAIFI y SAIDI. Los cuales son índices de calidad de suministro internacionales. Por un lado, el SAIFI indica el promedio de interrupciones que un cliente sufre y el SAIDI la duración promedio de las interrupciones por cliente. Se calculan de la siguiente forma:

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^n(k_i)}{N}$$

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^n(k_i \times t_i)}{N}$$

Donde:

$k_i$ : Número de puntos de suministro afectados por la interrupción  $i$

$t_i$ : Tiempo total de la interrupción  $i$

$n$ : Número total de interrupciones

$N$ : Número total de usuarios del sistema eléctrico o distribuidora al final del periodo

Será necesario calcular el tiempo de duración de las interrupciones, el cual puede obtenerse como la suma de distintos tiempos definidos como: tiempo de alerta, tiempo de localización de la falta y tiempo de reparación. El tiempo de localización de la falta dependerá de la estrategia que siga la brigada de mantenimiento a la hora de desplazarse por la red y hacer pruebas. Por lo que una parte de este estudio se centrará en proponer una estrategia óptima de movimiento de la brigada que minimice el tiempo de localización de falta.

Las tareas de este trabajo son las siguientes:

1. Revisión del estado del arte y bibliografía existente
2. Planificación óptima del movimiento de las brigadas de mantenimiento
  - a. Sin microrredes integradas en la red
  - b. Con microrredes integradas en la red
3. Cálculo de la fiabilidad
  - a. Sin microrredes integradas en la red
  - b. Con microrredes integradas en la red
4. Redacción de la memoria

El primer apartado consiste en revisar el estado del arte y la bibliografía existente. En segundo lugar, es necesario calcular el movimiento óptimo de las brigadas para estimar el tiempo de localización de la falta. Este apartado se llevará a cabo en dos fases. En un principio, sin incluir microrredes integradas en la red, y una vez resuelto se progresará a un modelo con microrredes. A continuación, tras realizar la planificación óptima del movimiento de las brigadas sin microrredes (2.a.) se continuará con el cálculo de la fiabilidad al completo de la red sin microrredes. De igual forma, cuando se haya logrado la planificación óptima del movimiento de las brigadas con microrredes (2.b.) se procederá a realizar el cálculo de la fiabilidad al completo de la red con microrredes (3.b.). La redacción de la memoria se llevará a cabo en paralelo al resto de tareas, desde que se consiga alcanzar el primer hito de cálculo.

En cuanto al cálculo del movimiento óptimo de las brigadas, la decisión acerca de los recursos a emplear es objeto del propio estudio, y por tanto no es definitiva. En un principio, se plantea la posibilidad de utilizar algoritmos de optimización genéticos para crear un árbol de decisiones. La idea es que, dada una configuración de red, se genere un árbol de decisiones que indique a la brigada de mantenimiento los movimientos que debe tomar hasta el aislamiento de la falta. Este árbol debe ser el óptimo, aunque para algunas faltas sea menos efectivo que para otras. El algoritmo genético se utilizará para calcular el punto de la red al que debe moverse la brigada en cada toma de decisión.

## 6. Recursos a emplear

Se ha escogido la herramienta software MATLAB® como entorno para programar el código del proyecto. Dentro del propio software de MATLAB®, se escoge también el paquete adicional MATPOWER que permite definir redes eléctricas y resolver el flujo de cargas. Dado que la carga computacional no será muy elevada, un computador convencional será suficiente. En este caso se ha utilizado un Macbook Pro con un procesador 2,6 GHz Intel Core i5 y una memoria 8 GB 1600 MHz DDR3.

## 7. Objetivos de desarrollo sostenible (SDGs)

Este estudio está orientado a la mejora de la calidad del suministro de la red mediante la optimización del proceso de localización de faltas en la red eléctrica. Un suministro eléctrico de calidad es fundamental para el desarrollo de un país, pues sienta las bases para desarrollar el tejido industrial. Por tanto, el principal SDG al que contribuye este trabajo es el noveno objetivo: innovación industrial e infraestructura. Asimismo, de forma secundaria, también afecta a los objetivos octavo y undécimo: trabajo decente y crecimiento económico y ciudades y comunidades sostenibles. Por un lado, la presencia de la industria se traduce en empleo de calidad y crecimiento económico. Por otro lado, la mejora de las técnicas de mantenimiento de la red facilita la integración de la generación distribuida en la misma.

Para desarrollar y mantener un tejido industrial fuerte, en un país, es necesario disponer de una red eléctrica robusta. Muchos sectores industriales dependen del suministro eléctrico para la producción, y la falta de acceso o la mala calidad de la red pueden hacer económicamente inviable su implantación en una zona. Por ejemplo, la industria metalúrgica, que lleva a cabo procesos como la electrólisis, requiere un suministro sin interrupciones para evitar grandes pérdidas económicas. En consecuencia, para que sea posible la innovación industrial es necesario primero que exista un entorno propicio para el desarrollo de la industria misma. Además, la red eléctrica es en si misma una infraestructura y es importante llevar a cabo acciones de mejora que eleven la calidad del servicio. Es por tanto que, la innovación industrial y la infraestructura se ven fuertemente afectadas por la calidad del suministro eléctrico. La mejora de las técnicas para la localización de faltas, reduciendo el tiempo de falta, contribuyen a unos mejores índices de calidad.

A su vez, la presencia de la industria está íntimamente ligada a la creación de empleo de calidad y al fomento del crecimiento económico. Las mejoras en los índices de calidad del suministro incentivan a los inversores a localizar fábricas y empresas en la zona, trayendo empleo de calidad. El empleo de calidad, inyecta nuevos ingresos en la sociedad en forma de salarios, impulsando el crecimiento económico en la zona.

Finalmente, para que en un futuro sea posible transitar a la integración de las microrredes y de la generación distribuida dentro de la red principal es necesario seguir mejorando las técnicas de gestión y mantenimiento de redes. El nuevo paradigma de generación eléctrica presenta un reto a nivel de estabilidad de la red y de control de todos los subelementos de la misma, dada la complejidad operacional que supone.

En resumen, este estudio se encuadra principalmente en la dimensión económica de los SDGs, pero también, en menor medida, en la escala social. Mediante la mejora de los índices de calidad de la red se puede apoyar el desarrollo y la innovación industrial, así como fomentar el empleo de calidad y el crecimiento económico, y contribuir a la transición hacia una red más limpia y sostenible.

## 8. Cronograma

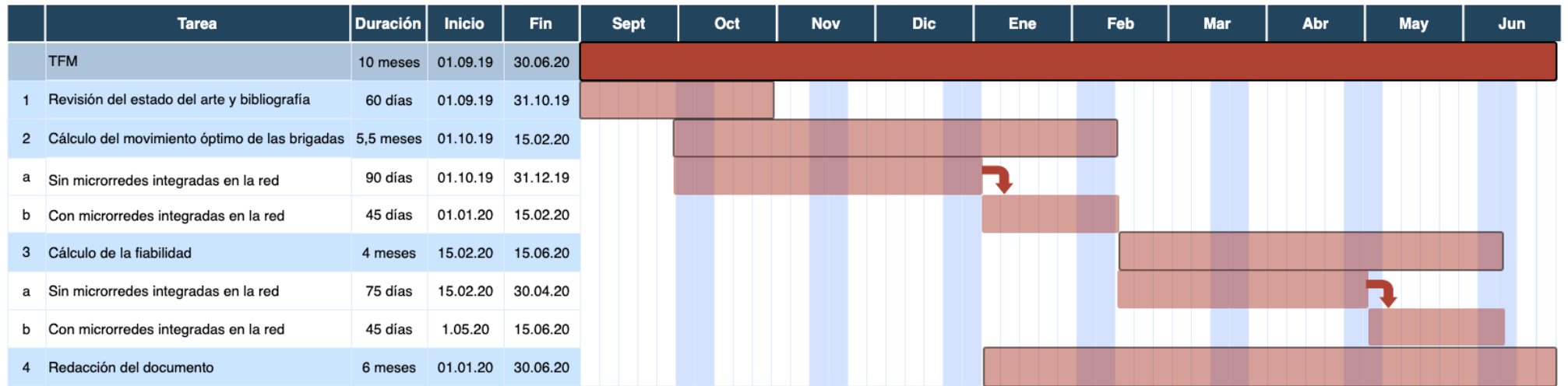


Fig. 1 Cronograma del proyecto



## Índice

<b>1</b>	<b>Introducción</b>	<b>23</b>
1.1	Estado del arte	25
<b>2</b>	<b>Metodología en redes convencionales</b>	<b>29</b>
2.1	Planteamiento del problema	29
2.2	Índices de continuidad del suministro	31
2.2.1	Cálculo experimental	31
2.2.2	Cálculo analítico	31
2.3	Cálculo de los índices de calidad del suministro de un árbol de decisiones	32
2.4	Planificación de brigadas	34
2.4.1	Algoritmos genéticos	34
2.4.2	Aplicación de los algoritmos genéticos al problema	36
2.4.3	Generador de árboles de decisiones	42
2.5	Cálculo e implementación de los índices de continuidad en Matlab	43
2.6	Implementación del algoritmo genético en Matlab	46
2.7	Implementación del generador de árboles en Matlab	46
<b>3</b>	<b>Casos de estudio de redes convencionales</b>	<b>49</b>
3.1	Calculo de los índices de continuidad del suministro	49
3.1.1	Línea recta de 9 tramos	49
3.1.2	Línea de 14 tramos con una bifurcación en tres caminos	52
3.1.3	Línea de 16 tramos con bifurcaciones	55
3.2	Optimización de la planificación de brigadas	59
3.2.1	Línea recta de 9 tramos	59
3.2.2	Línea de 14 tramos con una bifurcación en tres caminos	61
3.2.3	Línea de 16 tramos con varias bifurcaciones	63
3.3	Conclusiones comparación de métodos para planificación de brigadas	64
3.4	Optimización del generador de árboles de decisiones	66
3.5	Análisis de sensibilidad del SAIDI	68
<b>4</b>	<b>Metodología en redes con generación distribuida</b>	<b>73</b>
4.1	Introducción	73
4.2	Interruptores telemandados	73
4.3	Instalaciones de generación distribuida (DG)	74
4.4	Operación ante faltas	75
4.5	Cálculo de los índices de continuidad del suministro con microrredes	78
4.5.1	Cálculo del tiempo de localización	79
4.6	Planificación de brigadas en redes con instalaciones de generación distribuida	80

<b>5</b>	<b><i>Casos de estudio de redes con generación distribuida</i></b> .....	<b>81</b>
<b>5.1</b>	<b>Calculo de los índices de continuidad del suministro</b> .....	<b>81</b>
5.1.1	Línea recta de 9 tramos con interruptores teledirigidos y unidad DG .....	81
5.1.2	Línea de 14 tramos con interruptor teledirigido y unidad DG .....	85
5.1.3	Conclusiones .....	89
<b>5.2</b>	<b>Optimización planificación de brigadas en redes con generación distribuida</b> .....	<b>90</b>
5.2.1	Línea recta de 9 tramos con interruptores teledirigidos y unidad DG .....	90
5.2.2	Línea de 14 tramos con interruptor teledirigido y unidad DG .....	91
<b>6</b>	<b><i>Conclusiones</i></b> .....	<b>95</b>
<b>6.1</b>	<b>Conclusiones sobre la metodología</b> .....	<b>95</b>
<b>6.2</b>	<b>Conclusiones sobre los resultados</b> .....	<b>96</b>
<b>6.3</b>	<b>Recomendaciones para futuros estudios</b> .....	<b>96</b>
<b>7</b>	<b><i>Bibliografía</i></b> .....	<b>99</b>
	<b><i>Anexo I: Objetivos de desarrollo sostenible (SDGs)</i></b> .....	<b>103</b>

## 1 Introducción

Actualmente, el sector eléctrico español, como ocurre en gran parte de los países, se enfrenta a un proceso de transición hacia un modelo más sostenible íntimamente ligado a las energías renovables. Dentro de este proceso de transición surge una tendencia hacia la generación distribuida frente a la típica generación centralizada. Cuando se habla de generación distribuida se hace referencia a la generación de potencia eléctrica dentro de las propias redes de distribución [21]. Aunque la generación distribuida suele ser de origen renovable no necesariamente es siempre así, un grupo electrógeno, por ejemplo, también puede formar parte de una instalación de generación distribuida. La integración de la generación distribuida en la red conlleva beneficios técnicos, económicos y medioambientales [22]. Entre los beneficios técnicos se incluye la reducción de las pérdidas en las líneas, la mejora del soporte de la tensión y la mejora de la fiabilidad y la seguridad del sistema. Entre los beneficios económicos se puede contar el carácter diferido de las inversiones que favorece la escalabilidad del sistema, la mejora de la productividad del sistema mediante la diversificación de los recursos, en el caso de fotovoltaica y eólica una reducción en el coste de operación y mantenimiento entre otros. Finalmente, gracias a la generación distribuida se pueden reducir las emisiones de contaminantes ambientales. Sin embargo, la generación distribuida también puede tener un efecto negativo sobre la calidad del suministro. Uno de los aspectos más complejos de esta transición es mantener la calidad del suministro de red, puesto que muchas de las energías limpias no son controlables y presentan retos para su integración en el sistema eléctrico. Por lo que garantizar la calidad del suministro cobra una renovada importancia.

Si bien es cierto que la integración de energías renovables en la red puede conllevar un deterioro de la calidad del suministro debido a perturbaciones [23], también puede tener un efecto positivo en la continuidad del suministro. El concepto de calidad del suministro incluye distintos aspectos como son la continuidad del suministro, la calidad del producto, y la calidad de atención y relación al cliente. En este proyecto, sin embargo, cuando se hace referencia a la calidad del suministro se alude particularmente a la continuidad del suministro, es decir, a la frecuencia y duración de las interrupciones del mismo. Ante una falta en el sistema que causa una interrupción en el suministro, la generación distribuida ofrece alternativas para la reposición del servicio. Si en una zona de la red no es posible reconectar a los clientes al punto de suministro principal debido a que la falta ha interrumpido la conexión, pero existe una instalación de generación distribuida en dicha zona, se podrá reponer el suministro abasteciendo la demanda con la instalación de generación distribuida. El beneficio derivado de las instalaciones de generación distribuida dependerá de la localización y capacidad de dichas instalaciones, pero también de la rapidez de respuesta y del plan de actuación ante faltas. La planificación de las brigadas, es decir, la planificación de los movimientos de las brigadas de mantenimiento ante una falta para localizar el tramo donde se encuentra juega un papel importante en maximizar el efecto positivo de las instalaciones de generación distribuida sobre la continuidad del suministro.

Las instalaciones de generación distribuida también pueden localizarse en microrredes. Las microrredes son una tecnología emergente que actualmente goza de amplia popularidad. Según

el departamento de energía de los Estados Unidos una microrred es: “un grupo de cargas interconectadas y de generación distribuida dentro de unos límites claros establecidos y que funciona como una única entidad controlable con respecto a la red. Una microrred puede conectarse o desconectarse de la red principal para su operación conectada a la red o en modo isla.” [1] Es decir, una microrred suele estar compuesta por elementos de generación distribuida, típicamente renovables, pero también a menudo grupos electrógenos de apoyo, un grupo de cargas, y un sistema de control y comunicaciones. En ocasiones, las microrredes también pueden contar con un sistema de almacenamiento, por ejemplo, con baterías. La definición de microrred da cabida a un amplio espectro de configuraciones y tamaños, por lo que se pueden encontrar ejemplos muy diversos. Debido al auge de las energías renovables y del autoconsumo, las microrredes se han convertido en una solución muy atractiva. Principalmente, las microrredes pueden ofrecer tres ventajas: alta fiabilidad del suministro, óptima eficiencia y mejora en la sostenibilidad [2]. El grado en el que una microrred cumple con estas características varía dependiendo de la configuración y complejidad de la misma. En muchos casos las microrredes se proponen como solución en aquellos lugares donde la calidad de la red principal es muy baja (lugares remotos, países poco desarrollados, etc.) o en lugares donde la fiabilidad del suministro es crucial (bases militares, hospitales, cárceles etc.). Fruto de la transición energética y del auge de las microrredes, surge un nuevo paradigma de sistema eléctrico donde las microrredes se integran dentro de la red principal. Dichas microrredes operan conectadas a la red e interactúan con el resto de los elementos conectados, a la vez que podrían llegar a ser capaces de funcionar aisladas ante un corte en el suministro. En este caso, una microrred desempeña un papel similar al de una simple instalación de generación distribuida. En caso de falta una microrred puede desconectarse de la red principal y abastecer de forma autónoma a sus propios clientes. De hecho, si es capaz de realizar el cambio y restablecer el suministro a sus clientes en menos de tres minutos, la falta no se contabiliza dentro del cálculo de los índices de continuidad según la normativa española.

El primer objetivo de este trabajo es estudiar y cuantificar el efecto sobre la continuidad del suministro de las instalaciones de generación distribuida o microrredes dentro de la red principal. El segundo objetivo es proponer un método para la optimización del plan de brigadas en redes con instalaciones de generación distribuida o microrredes. Para cuantificar dicho efecto se utilizan los índices internacionales de continuidad del suministro: SAIDI y SAIFI. Estos índices proporcionan una medida de la frecuencia y la duración de las interrupciones de suministro en una red. En primer lugar, se desarrolla un programa en el entorno Matlab para el cálculo del SAIDI y del SAIFI en redes convencionales sin instalaciones de generación distribuida. Para a continuación, progresar al cálculo de los índices en redes modernizadas con instalaciones de generación distribuida, que típicamente incluyen interruptores telemandados. En segundo lugar, se desarrolla un programa para la optimización del movimiento de las brigadas de mantenimiento ante una falta. La planificación de brigadas afecta directamente al tiempo de falta y por tanto se refleja en el índice SAIDI. De nuevo se realiza un primer programa de planificación de brigadas en redes convencionales para luego avanzar al problema en redes con generación distribuida e interruptores telemandados. Para la planificación de brigadas se presentan y se comparan los resultados de dos metodologías: los algoritmos genéticos y el generador de árboles aleatorios. El trabajo se ha organizado en dos partes, la primera parte la conforman el cálculo de los índices de continuidad de suministro y la planificación de brigadas

en redes convencionales y la segunda parte trata el cálculo de los índices de continuidad de suministro y la planificación de brigadas en redes con instalaciones de generación distribuida.

## 1.1 Estado del arte

Típicamente los índices de calidad de una red se calculan a partir de un historial de medidas a lo largo de un periodo de tiempo. Sin embargo, este procedimiento de cálculo requiere que la red exista y se encuentre en funcionamiento durante un cierto tiempo. En ocasiones, se desea conocer los índices de calidad de una red proyectada, por ejemplo, para tomar decisiones sobre inversiones. Algunos autores, utilizan el método analítico basado en la enumeración de contingencias, pero el método más popular es el método probabilista, en concreto las simulaciones de Monte Carlo, ya que reflejan el carácter estocástico de los fallos de los elementos, cosa que no hacen los modelos deterministas. Este método se ha desarrollado, por ejemplo, en [3] y [4]. En [3] se utilizan las simulaciones de Monte Carlo para calcular el TIEPI de una red, modelando el número de fallos de la red durante un periodo de tiempo, y posteriormente evaluar posibles opciones de inversión. Se escoge Monte Carlo porque tiene en cuenta la volatilidad de la tasa de fallos de cada uno de los elementos del sistema, cosa que no ocurre con el método determinista. En [4] también se utiliza el método de Monte Carlo para simular la operación de un sistema de distribución durante un determinado periodo, modelando los ciclos de operación y reparación de cada elemento. A partir de las simulaciones se calcula el SAIDI y el SAIFI del sistema. Otros autores, combinan las simulaciones de Monte Carlo con algoritmos de optimización como los algoritmos de enjambre de partículas [5] o las redes neuronales [6]. Las simulaciones de Monte Carlo tienen como ventaja que pueden modelar casi cualquier tipo de sistema y de fallo. Sin embargo, como debilidad requieren un número de muestras muy alto. Otro método probabilístico para calcular los índices de calidad de la red es el modelo estocástico de Markov. Las cadenas de Markov, a diferencia de las simulaciones de Monte Carlos, son “procesos estocásticos en donde la distribución de probabilidad del valor futuro de la variable aleatoria depende únicamente de su valor presente (estado actual) y no de una historia de estados o eventos (propiedad markoviana)” [24]. En [24] se utiliza Markov para la frecuencia del estado de operación y del estado de falta en la red. A partir de estos datos se calculan los índices SAIDI y SAIFI.

Por su parte el cálculo determinista tiene como virtud que es un método ágil y relativamente sencillo con bajo coste computacional. Existen algunos ejemplos de cálculo determinista de los índices de calidad, aunque no es un método muy común. En [7] se modifican las formulas de calculo del SAIDI y del SAIFI para plantearlas en función de la fiabilidad de los elementos del sistema y de la ubicación de los elementos de protección de la red. Finalmente, en [8] se desarrolla una formulación binaria del SAIDI que expresa el SAIDI como función de la ubicación de distintos elementos de la red como interruptores, fusibles, reconectores etc. Esta formulación se demuestra válida para calcular el SAIDI global de una red, además de útil a la hora de optimizar la fiabilidad de esta. Respecto a la comparación de distintos métodos, [9] calcula la fiabilidad de tres casos de estudio mediante tres metodologías: análisis de árboles de fallas, diagramas de bloques y simulaciones de Monte Carlo. Los resultados obtenidos con los tres métodos son muy similares, con lo que se valida el modelado de la fiabilidad. Se comenta que para sistemas complejos las simulaciones de Monte Carlo son más fáciles de implementar.

En el caso de este proyecto, se desea calcular el tiempo de interrupción, para lo cual simularemos el recorrido óptimo de la brigada de mantenimiento con el fin de aislar la falta. En el caso de [10], se hace uso de las redes bayesianas para la toma de decisiones basada en reglas para resolver el problema de forma analítica. En [11] se determina el área afectada por la falta usando la búsqueda en anchura basada en la configuración del sistema y de las protecciones. El área afectada se determina encontrando los seccionadores que han despejado la falta, a su vez la distribución del sistema se representa usando un árbol dinámico como estructura de datos. Además, se hace una clasificación del tipo de punto de carga según el tiempo de restauración para determinar, una vez localizada la falta, el tiempo de restauración del servicio en cada punto. Por ejemplo, los puntos de carga de clase 'a' son los que no se ven afectados por la falta, mientras que la clase 'b' son los puntos aguas arriba de la falta que recuperan el servicio a través de la subestación principal mediante la acción de interruptores telemandados. Por otro lado, el problema de optimizar el recorrido de la brigada en la red está relacionado con el problema de optimizar la ubicación de los interruptores seccionadores, o del nivel de automatización de la red. A este respecto [12] utiliza un algoritmo determinista basado en diagramas de árbol, mientras que [13] utiliza un modelo de red de referencia junto con un análisis económico.

También existen diversos estudios en cuanto a la integración de microrredes en la red principal y su impacto en la fiabilidad del sistema. Estos estudios suelen constar de dos partes: el modelaje de las microrredes dentro de la red y el cálculo de los índices de calidad a partir del modelo realizado. De nuevo las simulaciones de Monte Carlo son el método más popular para calcular los índices de calidad. Dentro de las simulaciones de Monte Carlo se puede distinguir entre no-secuencial y secuencial. Las simulaciones no-secuenciales no tienen en cuenta el concepto del tiempo mientras que las simulaciones secuenciales modelan el estado del sistema en orden cronológico durante su vida útil. Un ejemplo, de aplicación del método de Monte Carlo no-secuencial para calcular la fiabilidad de un sistema de distribución con múltiples microrredes integradas se encuentra en [25]. Aquí se desarrollan modelos multi-estado a través de tablas generalizadas de capacidad de falta, en inglés *generalized capacity outage tables* (GCOT) para representar los distintos tipos de generación distribuida (GD). Los modelos multi-estado, a diferencia de los tradicionales modelos de dos estados, permiten modelar el carácter aleatorio e intermitente de la generación renovable. Para construir un modelo multi-estado es necesario discretizar la potencia de salida de la GD en varios niveles y calcular la probabilidad y la probabilidad acumulada de cada nivel. Posteriormente, para facilitar la evaluación de los estados se utilizan dos técnicas: división zonal y búsqueda del recorrido mínimo. La división zonal consiste en dividir el sistema de distribución en varias zonas de acuerdo con la posición de interruptores, seccionadores o demás elementos de separación. La búsqueda de recorrido mínimo consiste en encontrar, para cada zona, el camino más corto a una fuente de generación de energía. Si una parte del camino queda fuera de servicio por una falta la conectividad se pierde. Finalmente, se usan las simulaciones de Monte Carlo para calcular los índices de fiabilidad. Como ejemplo de simulación de Monte Carlo secuencial se tiene [26]. En [26] se propone una nueva metodología para evaluar la fiabilidad de los sistemas activos de distribución. El término sistemas activos de distribución hace referencia a sistemas de distribución que, en comparación con los sistemas tradicionales, incluyen más elementos como instalaciones GD y sistemas de almacenamiento de baterías. Para modelar el impacto de la

generación distribuida se utiliza de nuevo la GCOT. También se vuelve a hacer uso de la división zonal para evaluar los estados de la red. Después se evalúa la fiabilidad mediante las simulaciones de Monte Carlo.

En relación con el modelado de las unidades GD y análisis del impacto en la fiabilidad se existen otras aportaciones interesantes. En [14] se determina una serie de requerimientos para que una unidad GD pueda contribuir a mejorar la continuidad en un sistema de distribución radial. Mientras que [15] recomienda modelar cada unidad de GD como una carga negativa y una fuente de tensión, ya que probablemente necesiten ser desconectadas de la red cuando ocurra una falta. Modelar las unidades GD como cargas negativas (a efectos del flujo de cargas) puede tener un impacto positivo en la continuidad del suministro si el análisis considera las limitaciones de capacidad durante la reconfiguración post-falta del sistema. Además, también mejora la fiabilidad de la red, durante la operación normal, disminuyendo la carga en las líneas. En [16] se utiliza el análisis modal de fallos y efectos para evaluar el impacto de las microrredes en la red, y en [17] los indicadores de la frecuencia y la duración de las interrupciones. De nuevo, el método probabilista con simulaciones de Monte Carlo aparece en [18], donde se considera el aislamiento intencionado de la GD y de las microrredes presentes en la red, en situaciones de falta, para distintos tipos de red de distribución. También en [19] se utilizan las simulaciones de Monte Carlo, pero además se hace una clasificación del tipo de faltas según el tiempo de restauración del servicio aguas-abajo de la falta. En este caso, las simulaciones de Monte Carlo permiten considerar escenarios donde ocurran distintas faltas simultáneamente. Además, para determinar las cargas que se pueden reponer, sin exceder la capacidad de la GD, se utiliza un proceso cíclico, que considera una rama redundante cada vez, y escoge la rama que represente la mayor carga repuesta. Por último, [20] determina la equivalencia de la instalación de GD a la alternativa de crear nuevas ramas que permitan la reconfiguración del sistema, de forma que se pueda determinar la inversión óptima. Para evaluar la fiabilidad, utiliza el programa DISREL. DISREL calcula los índices de continuidad del suministro a partir de las tasas de fallo de los componentes de la red.

En este estudio sin embargo, se opta por un método de cálculo analítico de los índices de calidad. Esto se debe a que para redes de pequeño tamaño, el método analítico obtiene buenos resultados, y su aplicación en comparación con las simulaciones de Monte Carlo, supone una carga computacional mucho menor.



## 2 Metodología en redes convencionales

En este capítulo se presentan las metodologías usadas tanto para el cálculo de los índices de continuidad del suministro como para la optimización de la planificación de brigadas. En primer lugar, se hace una breve introducción a la planificación de brigadas y el planteamiento del problema. A continuación, se presentan los índices de continuidad de suministro y los métodos existentes de cálculo de los mismos. Después, se explica el método de cálculo elegido en este estudio. Luego, se presentan los algoritmos genéticos y se explica su adaptación a la planificación de brigadas mediante árboles de decisiones. Finalmente, se presenta el generador de árboles de decisiones como método alternativo al algoritmo genético.

### 2.1 Planteamiento del problema

La mayoría de las redes de más de 30 kV en España están teledirigidas. Esto quiere decir, que cuando una protección actúa, el reenganche se produce de forma automática. En caso de que la protección vuelva a actuar, se intenta un segundo reenganche y, si esta vuelve a actuar una vez más, se envía una brigada para localizar y aislar la falta. En el caso de redes no teledirigidas el reenganche debe hacerse de forma manual, por tanto, es necesaria la acción de una brigada de mantenimiento siempre que ocurre una falta.

La labor de las brigadas de mantenimiento consiste en desplazarse a los distintos interruptores que existen en la red y operarlos para localizar y aislar la falta de forma que se pueda restablecer el suministro en cada tramo lo antes posible [27] [13]. En la Figura 1 se muestra un ejemplo sencillo del movimiento de las brigadas en una red ejemplo de ocho tramos conectados en línea recta. Una falta en el tramo '3' hace disparar la protección de cabecera de la subestación y deja a toda la red sin suministro de energía. La brigada se desplaza primero a un punto medio de la red (interruptor entre '4' y '5') y abre el interruptor desconectando la red aguas abajo de '4'. A continuación, se reengancha la protección de cabecera, que en este caso, al seguir existiendo una falta en el tramo '3', vuelve a actuar. En este punto, la brigada conoce ya que la falta se encuentra aguas arriba del interruptor operado, por lo que se vuelve a desplazar a un punto medio de la red aguas arriba, en este caso el interruptor entre '2' y '3'. Mientras tanto, si existe la posibilidad, los tramos '5', '6', '7' y '8' pueden reconectarse a otro punto de suministro. Tras operar el segundo interruptor la brigada comprueba que la falta está aguas abajo del tramo '2', puesto que la protección de cabecera no actúa al conectarse '1' y '2'. La brigada repite la misma operación hasta conseguir aislar el tramo con falta a la vez que restablece el suministro en el resto de los tramos cuando es posible. En este caso, harían falta tres movimientos de la brigada para localizar la falta.

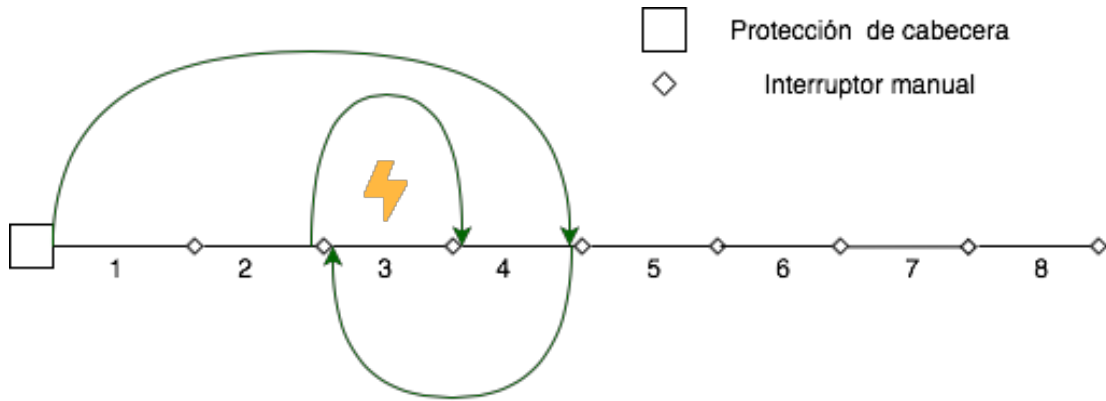


Figura 1 Movimiento de brigadas en línea recta

En el ejemplo anterior, donde se tiene una red sencilla con tramos conectados sucesivamente en línea recta, la optimización del movimiento de las brigadas es simple. Basta con encontrar el punto medio a cada paso. Sin embargo, cuando encontramos redes complejas con múltiples derivaciones el movimiento óptimo de las brigadas deja de ser evidente.

La planificación de brigadas consiste en optimizar la secuencia de movimientos de las brigadas para minimizar el tiempo de corte de suministro para el máximo número de clientes afectados y/o máxima potencia contratada. Es decir, que la planificación de las brigadas está estrechamente relacionada con los índices de continuidad de suministro como SAIDI y SAIFI.

En este estudio se propone una planificación de las brigadas basada en árboles de decisiones [28]. El árbol de decisiones indica, en cada etapa, el siguiente interruptor al que debe desplazarse la brigada, dependiendo de si la falta se encuentra aguas arriba o aguas abajo de la red. Un ejemplo de árbol de decisiones se ilustra para la red del ejemplo anterior (Figura 1) en la Figura 2. Desde cada interruptor de la red se tienen dos opciones de movimiento, una si la falta está aguas arriba del interruptor y la otra si la falta está aguas abajo del interruptor. Para cada red debe existir un único árbol de decisiones que minimice el SAIDI de la red. Por supuesto, dicho árbol de decisiones no contiene el movimiento óptimo de la brigada para cada falta de forma individual sino para el conjunto de faltas posibles de la red, teniendo en cuenta la probabilidad de ocurrencia de cada una.

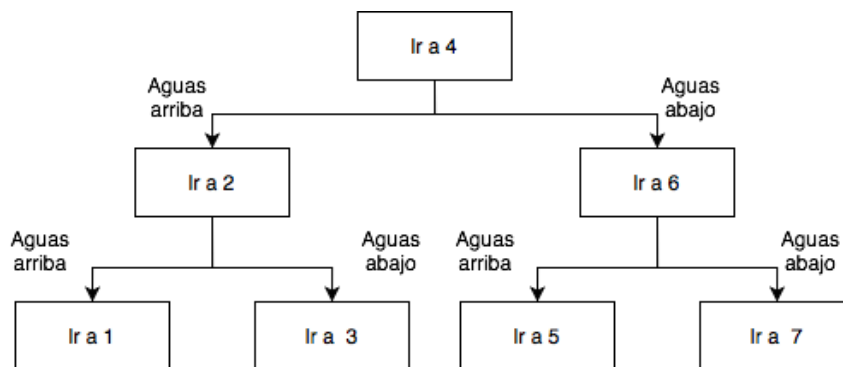


Figura 2 Árbol de decisiones de la red ejemplo

## 2.2 Índices de continuidad del suministro

En este apartado se presentan los índices de continuidad del suministro que se tratan en el estudio y los distintos métodos para su cálculo. Para la evaluación de la fiabilidad de los sistemas de distribución se utilizan diversos índices de calidad. Los índices SAIDI y SAIFI son habitualmente usados en el contexto internacional, mientras que en España se suelen utilizar el TIEPI y el NIEPI. A continuación, se describen dichos índices y dos métodos de cálculo: experimental y analítico.

### 2.2.1 Cálculo experimental

Para el cálculo experimental de los índices de calidad es necesaria la toma de datos durante un periodo de tiempo determinado. Esto implica que la red debe existir y debe funcionar durante al menos un tiempo para poder tomar datos como la frecuencia de las faltas o el tiempo que se tarda en reponer el suministro.

El SAIFI indica el promedio de interrupciones que un cliente sufre y el SAIDI la duración promedio de las interrupciones por cliente [29]. Se calculan de la siguiente forma:

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^n (k_i)}{N}$$
$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^n (k_i \times t_i)}{N}$$

Donde:

$k_i$ : Número de puntos de suministro afectados por la interrupción  $i$

$t_i$ : Tiempo total de la interrupción  $i$

$n$ : Número total de interrupciones

$N$ : Número total de usuarios del sistema eléctrico o distribuidora al final del periodo

Será necesario calcular el tiempo de duración de las interrupciones, el cual puede obtenerse como la suma de distintos tiempos definidos como: tiempo de alerta, tiempo de localización de la falta y tiempo de reparación. El tiempo de localización de la falta dependerá de la estrategia que siga la brigada de mantenimiento a la hora de desplazarse por la red y hacer pruebas. Por lo que una parte de este estudio se centrará en proponer una estrategia óptima de movimiento de la brigada que minimice el tiempo de localización de falta.

### 2.2.2 Cálculo analítico

En ocasiones, se desea conocer los índices de calidad de una red proyectada, por ejemplo, para tomar decisiones sobre inversiones. En estos casos no existe la posibilidad de tomar datos y por tanto no se puede usar el cálculo experimental antes presentado. Para estos casos se hace un cálculo analítico de los índices de calidad.

El SAIFI y el SAIDI calculan de la siguiente forma:

$$SAIFI = \frac{\sum_{i=1}^n (\lambda_i \times N_i)}{N}$$

$$SAIDI = \frac{\sum_{i=1}^n (t_i \times N_i)}{N}$$

Donde:

$\lambda_i$ : Tasa de fallos del tramo i

$t_i$ : Tiempo total de la interrupción debido a una falta en el tramo i

$N_i$ : Número de clientes afectados por una falta en el tramo i

n: Número total de tramos

N: Número total de usuarios del sistema eléctrico o distribuidora al final del periodo

Nótese que aquí el sumatorio se hace para una hipotética falta en cada tramo de la red, mientras que en el cálculo experimental el sumatorio es sobre cada falta observada durante el periodo observado.

### 2.3 Cálculo de los índices de calidad del suministro de un árbol de decisiones

Para evaluar cada árbol de decisiones se calcula el SAIDI asociado a dicho árbol. Se calcula el SAIDI y no el SAIFI porque la estructura del árbol de decisiones afecta al tiempo que se tarda en localizar una falta y no a la frecuencia con la que se producen dichas faltas. El cálculo se hace de forma teórica, puesto que no es factible la toma de datos para cada árbol de decisiones.

Para el cálculo del SAIDI es necesario reconstruir el camino que sigue la brigada para localizar la falta, esto debe hacerse para la falta en cada tramo de la red. Se considera que una falta ha sido aislada cuando se ha visitado el interruptor inmediatamente aguas arriba y el interruptor inmediatamente aguas abajo. Es decir, los interruptores en los extremos de la zona con falta. Siguiendo con el ejemplo de la red de la Figura 1 y el árbol de decisiones de la Figura 2 se pueden reconstruir los siguientes caminos. En la columna 'secuencia de movimientos de la brigada' se indican los tramos que visita la brigada en el orden de visita de izquierda a derecha.

Tabla 1 Ejemplo tabla de secuencia de movimientos de la brigada

Tramo con falta	Secuencia de movimientos de la brigada (tramos)
1	4, 2, 1
2	4, 2, 1
3	4, 2, 3
4	4, 2, 3
5	4, 6, 5
6	4, 6, 5
7	4, 6, 7
8	4, 6, 7

A partir del conjunto de secuencias de movimientos de la brigada se calculan los tiempos de aislamiento para todas las faltas posibles. Para esto hace falta definir unos parámetros de tiempos, distancias y velocidades que se incluyen en Tabla 2 [30].

Tabla 2 Parámetros adicionales para el cálculo del SAIDI

Parámetro	Descripción
$t_{alerta}$	Tiempo que transcurre desde que ocurre la falta hasta que la distribuidora recibe aviso de ella
$D_{i,j}$	Distancia entre dos interruptores i y j
$Vel_{brigada}$	Velocidad a la que se desplaza la brigada
$t_{operación}$	Tiempo que tarda la brigada en operar un interruptor una vez que ya está en el interruptor
$t_{reposición}$	Tiempo que tarda en reponerse el suministro en e tramo de la falta una vez que la falta ya está localizada

Una vez que se han definido unos valores para los parámetros de la Tabla 2, se puede calcular el SAIDI de la siguiente forma:

$$SAIDI = \frac{\sum_{k=1}^n [(t_{alerta} + \sum (t_{operación} + D_{i,j} \div Vel_{Brigada})) \times (N_{total}) + t_{reposición} \times N_{afectados,k}]}{N_{total}}$$

Donde:

$N_{afectados,k}$ : Número de clientes aguas abajo de la falta en el tramo k

n: Número total de tramos

$N_{Total}$ : Número total de usuarios del sistema eléctrico o distribuidora al final del periodo

Esta fórmula es una aportación del estudio, y se ha desarrollado a partir de la definición oficial del SAIDI y de la definición de los parámetros de tiempos [30]. Según esta fórmula se

asume que una vez localizada la falta se puede restablecer el servicio en los tramos aguas arriba de la falta simplemente reconectándolos al suministro original, mientras que los tramos aguas abajo deben esperar a que se despeje la falta para poder reconectarse. Por supuesto esto no siempre ocurre así, puesto que a veces existe la posibilidad de restablecer el suministro a través de un interruptor normalmente abierto. En la Figura 3 se muestra un ejemplo de restablecimiento del suministro tanto aguas arriba como aguas abajo de la falta. En este caso, los tramos aguas arriba (verde) se abastecen desde la protección de cabecera y los tramos aguas abajo se abastecen conectando al tramo '8' otro punto de suministro alternativo. En ese caso  $N_{afectados,k}$  incluye sólo los clientes que permanecen sin suministro hasta que no se despeja la falta.

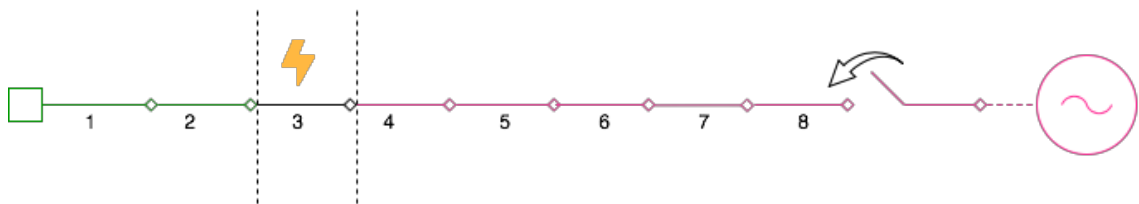


Figura 3 Ejemplo de reconexión mediante interruptor normalmente abierto

## 2.4 Planificación de brigadas

En este apartado se describen dos metodologías alternativas para llevar a cabo la optimización de la planificación de brigadas. En primer lugar, se hace una introducción a los algoritmos genéticos. En segundo lugar, se desarrolla la adaptación de los algoritmos genéticos a la planificación de brigadas. Por último, se presenta como método alternativo al algoritmo genético el generador de árboles de decisiones.

### 2.4.1 Algoritmos genéticos

Los algoritmos genéticos (AGs) son una herramienta que se usa para resolver problemas de búsqueda y optimización. Se denominan algoritmos genéticos porque imitan el comportamiento de los genes de los organismos vivos y el proceso de evolución. Dentro de una especie existen individuos con mejores características para la supervivencia que otros. Puesto que los individuos de una especie compiten entre sí por los recursos y por la posibilidad de reproducirse, estos individuos tienen una mayor probabilidad de tener mayor número de descendientes. A su vez los descendientes, comparten algunos de los genes de sus progenitores. De esta forma, a través de un proceso repetitivo de cruce de genes de los individuos más capaces, la población evoluciona adquiriendo mejores capacidades de supervivencia. Los AGs funcionan de modo análogo a los genes. El AG parte de una población inicial de soluciones a un problema, en la cual los individuos reciben una puntuación referida a la bondad de la solución. Los individuos con puntuaciones más altas se cruzan entre sí para producir nuevos individuos, descendientes de los anteriores, que combinan las características de sus padres [30]. Mediante un proceso repetitivo se generan nuevas poblaciones de individuos con mejores características que las anteriores. Si el problema ha sido definido y diseñado adecuadamente debe converger en la solución óptima [31].

El éxito del AG reside en ser una técnica robusta y que se puede adaptar a gran variedad de problemas. El AG no garantiza que se encuentre la solución óptima, pero obtiene resultados aceptables en tiempos competitivos. Cuando existen técnicas especializadas para resolver un tipo de problema concreto, estas suelen desbancar al AG tanto en resultados como en tiempo. El AG encuentra su campo de aplicación en problemas donde no existen técnicas especializadas. También es posible realizar mejoras de dichas técnicas hibridándolas con el AG.

#### 2.4.1.1 Elementos del algoritmo genético

En este apartado se definen los elementos y conceptos principales que existen en un algoritmo genético, siendo estos: la función de adaptación, la población inicial, la selección de padres, el operador de cruce y el operador de mutación.

**Función de adaptación:** es la función que evalúa la capacidad de cada individuo asignándole un número real. Se debe diseñar específicamente para el problema que se quiera abordar.

**Población inicial:** es el conjunto de individuos con el que comienza el algoritmo. Es decir, son los primeros padres.

**Selección de padres:** la selección de padres se realiza semi-aleatoriamente. Los padres con mejor puntuación tienen mayor probabilidad de ser seleccionados para cruzarse y producir descendientes.

**Operador de cruce:** el operador de cruce consiste en seleccionar dos padres y partirlos por un punto seleccionado al azar. A continuación, se recombinan los cromosomas cruzando ambos padres. Este proceso se ilustra en la Figura 4. El operador de cruce no se aplica a todos los pares de individuos sino a una selección aleatoria.

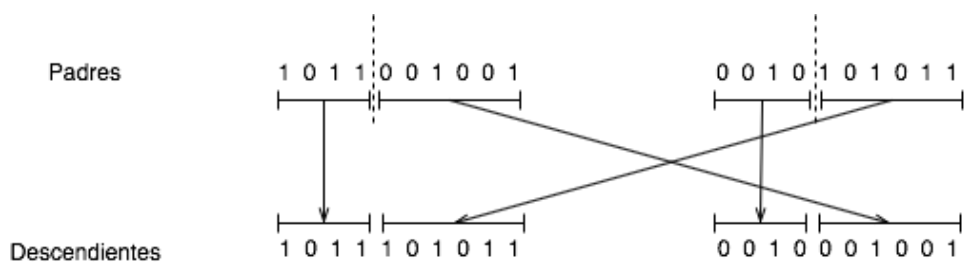


Figura 4 Ejemplo de cruce de cromosomas

**Operador de mutación:** el operador de mutación consiste en realizar una alteración aleatoria al cromosoma de un hijo. Se aplica a todos los hijos de manera individual. Este proceso se ilustra en la Figura 5.



Figura 5 Ejemplo de mutación de cromosoma

## 2.4.2 Aplicación de los algoritmos genéticos al problema

En este apartado se explica en detalle como se adapta el AG al problema de la planificación de brigadas. En concreto, se trata la interpretación del árbol de decisiones como una cadena de genes, la generación de la población y el caso particular del problema del comercial viajante. Este último caso, se trata de un problema típico resuelto mediante AGs y que sirve de base a la adaptación del AG a la planificación de brigadas.

### 2.4.2.1 Interpretación del árbol de decisiones como cadena de genes

Se desea utilizar los AGs para encontrar el árbol de decisiones óptimo que minimice el SAIDI de una red predefinida. Para ello se ha de establecer una forma de interpretar los genes como árboles de decisiones. En este trabajo se ha decidido escribir los distintos niveles de árbol de decisiones de manera sucesiva comenzando desde el primer nivel y leyendo de izquierda a derecha. En la Figura 6 se muestra un ejemplo de un árbol de decisiones con los distintos niveles marcados en colores. En el primer nivel (amarillo) está sólo el 5, en el segundo nivel (rojo) están el 3 y el 7, y así sucesivamente.

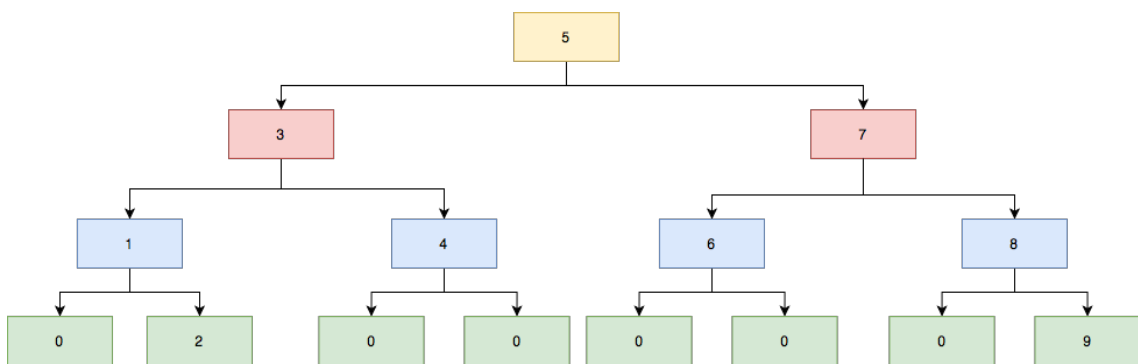


Figura 6 Ejemplo árbol de decisiones con niveles definidos por colores

Nótese que el numerado de los interruptores comienza en el 1 y por tanto no existe el interruptor 0. Los ceros se utilizan para completar el nivel cuando comienza a haber ramas de distintas longitudes. Esto es indispensable para luego poder interpretar el árbol en formato de genoma.

El árbol de decisiones de la Figura 6 se traduce como el siguiente genoma:

[ 5 3 7 1 4 6 8 0 2 0 0 0 0 9 ]

Como se comenta previamente, es necesario el uso de los ceros para poder interpretar correctamente el árbol. Un cero indica que esa rama del árbol ya se ha recorrido entera. De no incluirse los ceros no sería posible saber que números preceden al 2 y al 9.

#### 2.4.2.2 Generación de la población

La herramienta de AGs de Matlab está ya programada para que sea posible usarla con el mínimo esfuerzo. A esta función predefinida es sólo necesario indicarle la función de adaptación y el número de variables. Sin embargo, también permite un alto grado de personalización por el usuario si este lo desea. En este caso el algoritmo predefinido no sirve y es necesario adaptarlo al problema. A continuación, se explica el proceso de adaptación.

El AG por defecto genera una población inicial de cien individuos, cada uno con una cantidad de genes igual al número de variables indicado por el usuario. Cada gen es un número **real** escogido al azar. Esto significa que es prácticamente imposible que el algoritmo por defecto genere un genoma que sea válido como árbol de decisiones. La estructura de un árbol de decisiones, en principio, debe seguir unas ciertas normas:

- Sólo pueden aparecer números **naturales** en el gen (en representación de un interruptor)
- Todos los interruptores de la red deben estar presentes
- Cada interruptor debe aparecer una única vez en el árbol
- No debe haber números que no representen a ningún interruptor, excepto los ceros que indican la finalización de una rama
- El genoma debe tener un número de variables que sea un sumatorio de potencias de 2. Esto ocurre porque a cada nivel del árbol aparecen dos nuevas variables por cada una anterior, comenzando desde  $2^0=1$ .
- No puede haber ceros en el medio de un camino, puesto que esto no tiene sentido
- Desde cada punto debe haber una opción de movimiento aguas arriba y otra aguas abajo
- Los puntos colindantes no deben estar en caminos distintos. Si no es imposible aislar de forma exacta el tramo con falta. Véase la Figura 7.
- Hay ciertas secuencias que no tienen sentido puesto que se visitan partes del árbol ya descartadas. Véase la Figura 8.

En la Figura 7 se muestra un ejemplo de un árbol donde dos interruptores adyacentes están en caminos separados, quiere decirse, que no existe un camino posible que pase por ambos interruptores. De este modo la falta entre los interruptores '3' y '4' no se puede aislar de forma exacta porque no es posible visitar '3' y '4' en la misma actuación según el árbol de decisiones.

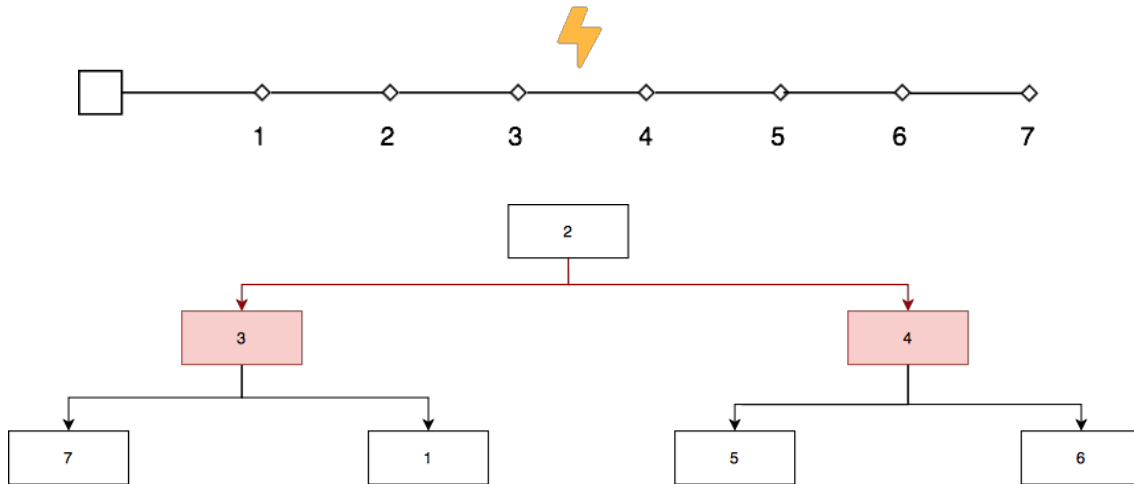


Figura 7 Ejemplo puntos adyacentes en caminos separados

En la Figura 8 el ‘movimiento 2’ y el ‘movimiento 3’ se contradicen. El movimiento ‘2’ sólo tiene sentido si la falta está aguas debajo de ‘4’, en ese caso el movimiento ‘3’ no tiene sentido porque ya se habría descartado esta parte de la red. Es decir, aunque teóricamente se puede definir un árbol en el que existen movimientos innecesarios, puesto que no aportan información nueva a la brigada, en la realidad este árbol no se aplicaría nunca en la práctica. Esto es porque la brigada, que está formada por personas humanas, no visitará nunca zonas de la red donde ya sabe que no está la falta. Igualmente, añadir movimientos innecesarios en los árboles de decisiones incrementa el tiempo de localización de la falta y por ende el SAIDI. Por ello se espera que el algoritmo genético descarte por si mismo estas opciones.

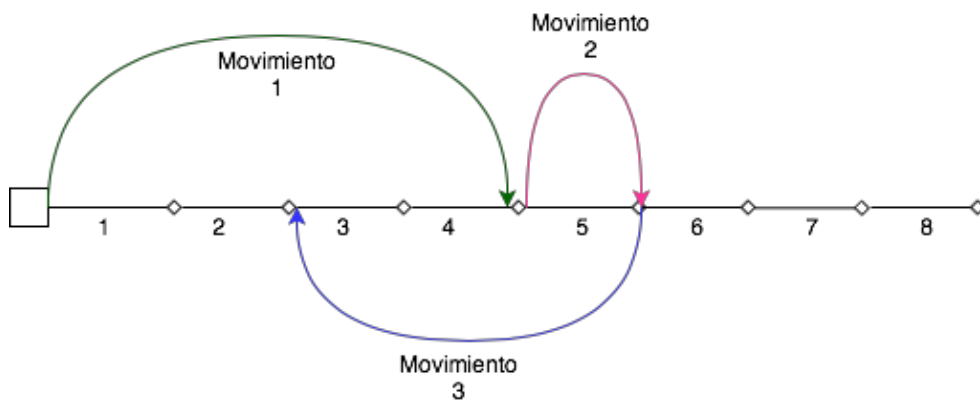


Figura 8 Ejemplo de movimiento no lógico

Una vez descrito el problema, se procede a programar el algoritmo genético en Matlab para resolver la planificación de brigadas. Para ello el problema tipo del comercial viajante ha servido de inspiración y modelo base sobre el que trabajar. Dicho problema se describe a continuación.

#### 2.4.2.3 El problema del comercial viajante

El problema del comercial viajante es un clásico problema de optimización. Un comercial debe visitar unas ciertas ciudades sin importar el orden y quiere encontrar la ruta que minimice

su tiempo de viaje. Para plantear este problema como un AG en Matlab es necesario crear funciones de creación, de cruce y de mutación personalizadas. Las ciudades son numeradas y se define su posición en el espacio. Las funciones personalizadas funcionan de tal manera que los individuos del AG son combinaciones aleatorias del conjunto de números de las ciudades. Por ejemplo, si se tienen diez ciudades se crea un vector conteniendo los números del 1 al 10 y se realizan permutaciones aleatorias del vector hasta generar tantos individuos como se especifique en la configuración de la población inicial. A su vez la función de cruce no funciona como en el genético clásico explicado en 2.4.1.1 ya que esto supondría eliminar algunas ciudades y duplicar otras en la ruta. La nueva función de cruce funciona como se muestra en Figura 9. Se selecciona al azar una parte del genoma del padre y se revierte el orden sólo en esa parte. La mutación también se realiza de forma diferente. En este caso se intercambian de posición dos números al azar.



Figura 9 Ejemplo de cruce de genes en el problema del comercial viajante

El problema del comercial viajante es interesante para este caso porque sirve como primer paso para adaptar el AG al problema de planificación de brigadas. De idéntica manera se tiene una serie de puntos que se quiere visitar (interruptores, ciudades...) y se busca la forma de optimizar los movimientos. El comercial viajante satisface algunas de las condiciones que deben de cumplir los genomas para ser árboles de decisiones: compuesto de números naturales, aparecen todos los interruptores y sólo una vez cada interruptor. Sin embargo, esto no es suficiente. Por ejemplo, no se generan los ceros que necesitan algunos árboles y además el número de variables es igual al número de interruptores el cual no es necesariamente una función del sumatorio de potencias de dos.

Los ceros pueden ser introducidos modificando la función de población. Es necesario que el usuario defina previamente el número de variables que desea como un sumatorio de potencias de dos (siempre mayor o igual al número de interruptores de la red). Por ejemplo, si una red tiene nueve interruptores los genomas deben tener al menos quince variables. Esto implica que el genoma debe tener al menos 6 ceros. Al introducirse de forma aleatoria, algunos de los ceros acabarán en puntos intermedios de los caminos, lo cual no tiene sentido puesto que no representan ningún punto de la red. En estos casos la función de adaptación devolverá un SAIDI de valor infinito indicando que no es una buena solución.

$$2^0 + 2^1 + 2^2 + 2^3 = 15 \text{ variables}$$

$$15 \text{ variables} - 9 \text{ interruptores} = 6 \text{ ceros}$$

Finalmente, sólo quedarían tres especificaciones por cumplir: que desde cada punto una opción de movimiento aguas arriba y otra aguas abajo, que no haya interruptores adyacentes en caminos separados y que los movimientos no visiten zonas ya descartadas de la red. Dada la dificultad que supone comprobar estas condiciones, especialmente en redes complejas, se considera que el propio AG debe descartar estas opciones por estar asociadas a resultados peores.

#### 2.4.2.4 Ejemplo cálculo del SAIDI con árbol no lógico

Como se ha comentado en 2.4.2, en algunos casos el árbol de decisiones generado por el AG no es perfecto. Por ejemplo, puede ser que algunas faltas no sea posible aislarlas de forma exacta. Es decir, que en algunos casos la zona aislada contiene más de un tramo. En estos casos, el SAIDI se calcula teniendo en cuenta que la zona aislada es mayor. En la Figura 10 se muestra un árbol de decisiones para una línea recta donde la falta entre 6 y 7 no puede ser aislada de forma exacta por estar dichos interruptores en caminos distintos. En este caso el camino a seguir que escogería la herramienta de cálculo es (2,3,7). Esto daría lugar a una zona aislada de cuatro tramos en lugar de uno, tal y como muestra la Figura 11. Esto aumenta el SAIDI ya que este también depende del número de clientes sin suministro.

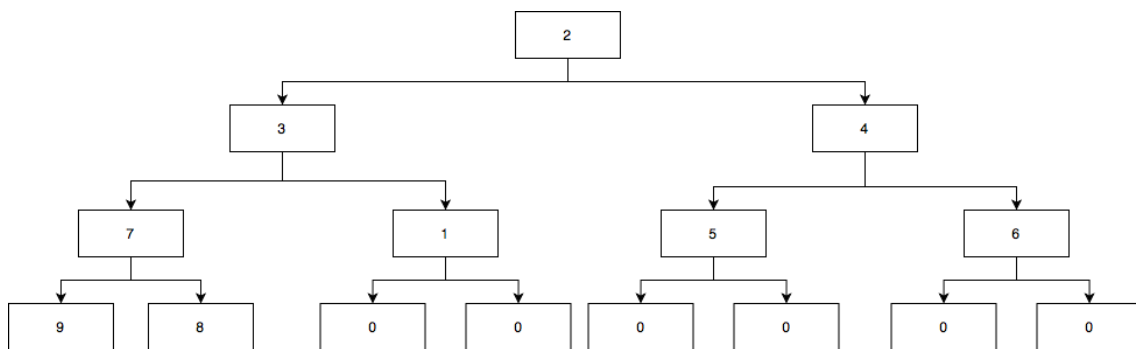


Figura 10 Ejemplo árbol de decisiones sin orden lógico

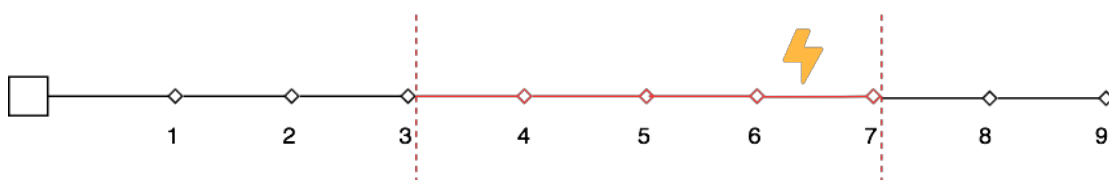


Figura 11 Ejemplo línea zona aislada

#### 2.4.2.5 Comparación cálculo del SAIDI con distintos árboles

Se quiere comparar el SAIDI obtenido para distintos árboles de decisiones. Para la red de nueve interruptores mostrada en la Figura 12, se han escogido dos árboles de decisiones. Uno que cumple todos los requisitos listados en 2.4.2 (Figura 13), otro con puntos adyacentes en caminos opuestos y movimientos a puntos ya visitados o con dos opciones en la misma

dirección (Figura 10). Al primer árbol se le denomina árbol A, y al segundo árbol B. El árbol B ha sido hallado por el AG.

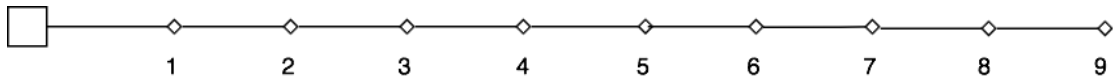


Figura 12 Red línea recta con nueve interruptores

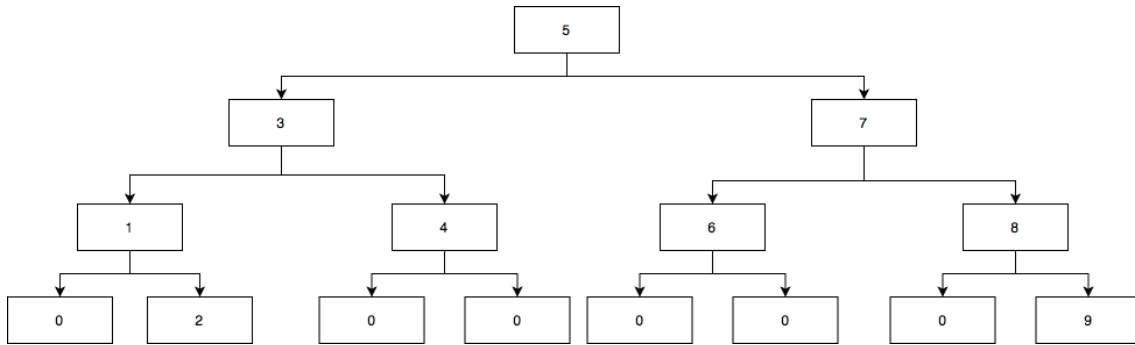


Figura 13 árbol de decisiones adecuado (A)

Para el cálculo del SAIDI se han fijado los siguientes valores para los parámetros que aparecen en la Tabla 3.

Tabla 3 Valores de los parámetros de tiempos

Parámetro	Valor
$t_{alerta}$	10 minutos
$Vel_{brigada}$	1 tramo/minuto
$t_{operación}$	5 minutos
$t_{reposición}$	100 minutos

A continuación, en la Tabla 4 se muestra un desglose de los tiempos de localización de la falta en cada tramo de la línea y del número de clientes afectados total en cada caso.

Tabla 4 Desglose cálculo del SAIDI comparación de árboles

Falta	Tiempo localización árbol A (min)	Cientes afectados Árbol A	Tiempo localización árbol B (min)	Cientes afectados Árbol B
1-2	34	200	33	200
2-3	34	250	24	250
3-4	27	250	24	500
4-5	27	150	25	150
5-6	27	200	25	350
6-7	27	300	25	300
7-8	27	100	25	400
8-9	34	250	25	650

	<i>Árbol A</i>	<i>Árbol B</i>
<i>SAIDI (min)</i>	717	745

El resultado del SAIDI es mejor para el árbol A que para el árbol B. En la Tabla 4 se puede comprobar que el tiempo de localización de la falta es menor para el árbol B en todos los casos, sin embargo, para la falta en 3-4, 5-6, 7-8 y 8-9 el número de clientes afectados es mayor. Esto se debe a que con el árbol B no se llega a localizar con toda precisión el tramo con falta, sino que se delimita una zona de más de un tramo como zona con falta. En el computo final el tiempo ahorrado en la localización de las faltas es insuficiente para compensar el aumento de los clientes dentro de la zona de falta. Cada cliente extra en la zona de falta debe esperar el tiempo de reposición del servicio para recuperar el suministro. Dado que el tiempo de reposición suele ser bastante mayor que el tiempo de localización, el SAIDI resultante con el árbol B es mayor. Por lo tanto, en este ejemplo de comparativa se observa como el árbol B, que no cumple los requisitos para ser un árbol de decisiones lógico obtiene un resultado del SAIDI peor que el árbol A, que sí es un árbol lógico. Esto no quiere decir, que los árboles lógicos encuentren siempre mejores soluciones que los no-lógicos. Es posible que dependiendo del valor del tiempo de reposición, el número de clientes en cada tramo y los tiempos de localización existan casos de árboles no-lógicos con SAIDI menores que árboles lógicos para una misma red.

#### 2.4.3 Generador de árboles de decisiones

Como método alternativo al AG se presenta el generador de árboles de decisiones. En un principio se plantea utilizar el método de la búsqueda exhaustiva. Es decir, generar todos los árboles de decisiones posibles para una red, calcular su SAIDI asociado y seleccionar el árbol con el SAIDI mínimo. Sin embargo, calcular el número de árboles posibles de una configuración de red no es trivial y generarlos todos de forma metódica también es un proceso complejo. Por lo tanto, se presenta una estrategia alternativa más sencilla de implementar que puede ofrecer resultados de calidad.

La generador de árboles consiste en crear un código de Matlab que, para una red dada, genere un árbol de decisiones válido aleatorio. A partir de este código se puede crear una herramienta que evalúe el SAIDI de un número elevado de árboles generados al azar y seleccione aquel con el valor mínimo de SAIDI. Cuanto mayor sea el número de generaciones, más probabilidad habrá de generar todos los árboles posibles para una red, pero a su vez aumentará el tiempo de ejecución del programa. Existe un compromiso entre estos dos parámetros, por lo que debe optimizarse el número de generaciones.

El generador de árboles tiene ciertas ventajas respecto al método del AG. Los árboles generados pueden ser de cualquier longitud (dentro de las permitidas), mientras que el AG genera sólo árboles de una predeterminada longitud por cada vez que se ejecuta el código. Además, todos los árboles que se generan son válidos mientras que en el AG la gran mayoría no lo son.

El generador de árboles consiste en una función que a partir de una configuración de red devuelve un árbol de decisiones aleatorio. La forma de calcular dicho árbol viene ilustrada de forma esquemática en Figura 14. Se comienza eligiendo un punto al azar de todos los disponibles. A partir de ese punto, se parte la red en aguas arriba y aguas abajo, almacenando cada partición en un vector que contiene los interruptores que pertenecen a esa parte de la red. A continuación, de los vectores almacenados se vuelve a escoger una posición de forma aleatoria y de nuevo se vuelve a dividir cada subred en dos: aguas arriba y aguas abajo. El proceso se repite sucesivamente hasta que todos los vectores quedan vacíos.

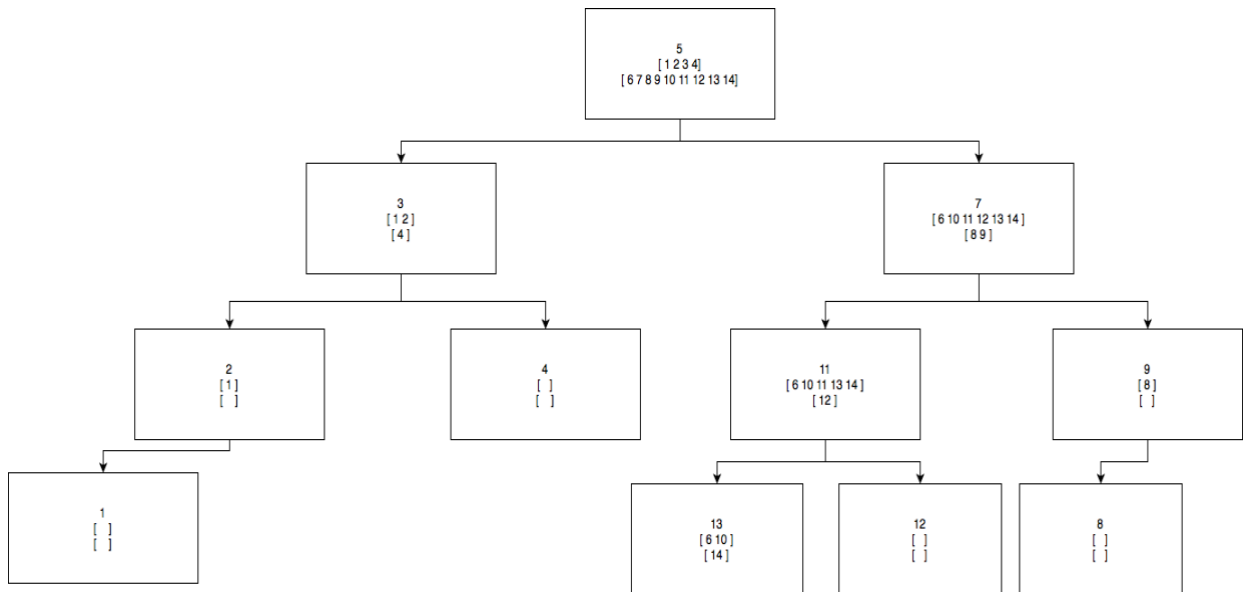


Figura 14 Ejemplo de generación de un árbol

## 2.5 Cálculo e implementación de los índices de continuidad en Matlab

Para el cálculo de los índices de continuidad a partir de un árbol de decisiones en Matlab se ha programado una función específica. La sintaxis de la función es la siguiente:

```
[SAIDI, SAIFI] = CalculoIndices(A, mpc, T_fallos, N_clientes, G, d)
```

Las entradas a la función son: el árbol de decisiones (A), la estructura de la red (mpc), el vector de tasas de fallos de los tramos de la red (T\_fallos), el vector de número de clientes de los tramos de la red (N\_clientes), el grafo de la red (G) y la matriz de distancias entre interruptores de la red (d). Las salidas de la función son los dos índices de continuidad calculados: SAIDI y SAIFI.

El funcionamiento del programa se muestra de forma conceptual en el diagrama de flujo de la Figura 15. Se comienza separando en vectores los distintos niveles del árbol de decisiones. En la Figura 6 se muestra un ejemplo de cómo distinguir los niveles en un árbol de decisiones. A continuación, se reconstruyen las secuencias de movimiento para cada falta. Es decir, para la falta en cada tramo se encuentra la secuencia de movimientos que realiza la brigada hasta

aislarla. A este punto, se verifica que ningún camino tenga ceros, ya que no corresponden a ningún punto de la red y no tiene sentido que se incluyan en un camino. En caso de existir al menos una secuencia con al menos un cero el programa termina y devuelve valores del SAIDI y del SAIFI infinitos. Esto es debido a que los ceros no corresponden a ningún interruptor y, como ya se ha comentado antes, las secuencias con ceros corresponden a árboles no válidos. Una vez que se tienen todas las secuencias de movimientos se puede calcular el vector de tiempos. El vector de tiempos contiene el tiempo de localización de falta para cada tramo. Es sencillo calcular este vector a partir de las secuencias de movimientos, los parámetros de tiempos y la matriz de distancias. Finalmente, a partir del vector de tiempos y del vector de número de clientes se puede calcular el SAIDI y a partir del vector de tasas de fallos y el vector de número de clientes se puede calcular el SAIFI.

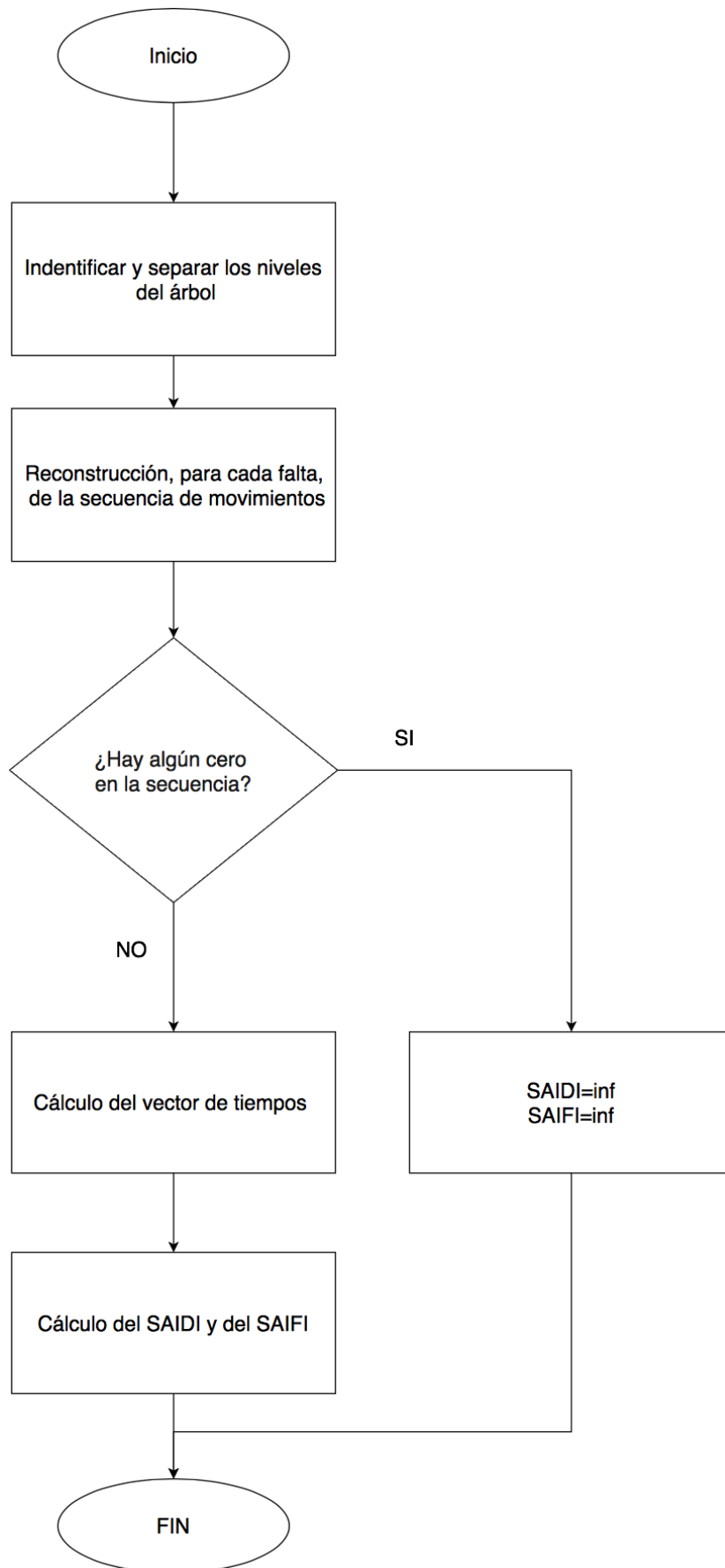


Figura 15 Diagrama de flujo del código para calcular índices de continuidad de suministro

## 2.6 Implementación del algoritmo genético en Matlab

En este apartado se explica la implementación del algoritmo genético en Matlab para la planificación de brigadas. Se muestra sólo el código correspondiente a la función de alto nivel. En primer lugar, se define la función de adaptación que es la que evalúa la capacidad de los individuos. En este caso, la función de adaptación es la función del cálculo de los índices de continuidad presentada anteriormente. A continuación, se establece el tamaño de la población y se configuran las opciones de la herramienta del algoritmo genético. De esta forma, se pueden establecer las funciones de creación, cruce y mutación de individuos personalizadas que se comentan en 2.4.2.3. Finalmente, se llama a la función del algoritmo genético.

```
%Función de adaptación
FitnessFcn = @(A) CalculoIndices(A,mpc,T_fallos,N_clientes,G,d);

% Tamaño de la población
totalPopulationSize = 100;

% Opciones
options = optimoptions('ga');

options = optimoptions(options,'PopulationSize', totalPopulationSize);

options =
optimoptions(options,'CreationFcn',@create_permutations,'CrossoverFcn',
,@crossover_permutation,'MutationFcn',@mutate_permutation);

% Genético
[x,fval,exitflag,output,population,scores] =
ga(FitnessFcn,NVARS,[],[],[],[],[],[],[],options);
```

## 2.7 Implementación del generador de árboles en Matlab

La parte principal del generador de árboles es la función usada para crear árboles de decisiones válidos correspondientes a una red. La sintaxis de la función es la siguiente:

```
[A,x]= CrearArbol(G)
```

La función tiene una única entrada que es el grafo de la red (G). Las salidas de la función son la matriz y el vector del árbol de decisiones creado (los cuales son equivalentes, se trata de una cuestión de formato).

La implementación del generador de árboles es sencilla. Se usa la función de CreaArbol para generar árboles aleatorios y la función de CalculoIndices para evaluar el SAIDI de cada árbol en un bucle y se actualiza el SAIDI mínimo en cada ciclo.

```
n=1000;% número de generaciones
SAIDI_min=100000;%SAIDI minimo inicial

for i=1:n

    [A,x]= CrearArbol(G);%Crear un árbol aleatorio

    [SAIDI,SAIFI]=
    CalculoIndices(x,mpc,T_fallos,N_clientes,G,d);%Evaluar SAIDI

    %Si el SAIDI calculado es menor que el SAIDI minimo actual
    if SAIDI<SAIDI_min

        SAIDI_min=SAIDI;%Actualizar el nuevo SAIDI minimo
        Arbol=x;%Guardar árbol

    end

end

end
```



### 3 Casos de estudio de redes convencionales

En este capítulo se aplican los métodos presentados en el capítulo 2 en tres configuraciones de red distintas. Como casos de estudio se tiene una red de nueve tramos en línea recta, una línea de catorce tramos con una bifurcación, y una línea de dieciséis tramos con varias bifurcaciones. Primero, se realizan tres ejemplos (uno para cada caso de estudio) de cálculo de los índices de calidad mediante el método analítico para un árbol de decisiones predefinido. Segundo, para cada caso de estudio se encuentra el árbol de decisiones correspondiente al SAIDI mínimo por los métodos de algoritmo genético y de generador de árboles de decisiones. Se comparan los SAIDI obtenidos, el tiempo de ejecución del programa y los árboles obtenidos. Para el cálculo del SAIDI se han utilizado los mismos valores de parámetros de tiempo que en la Tabla 3. Para el generador de árboles se ha establecido un número de generaciones aleatorias igual a 500.

#### 3.1 Cálculo de los índices de continuidad del suministro

En este apartado se incluyen los tres casos de estudio del cálculo de los índices de continuidad del suministro.

##### 3.1.1 Línea recta de 9 interruptores

La Figura 16 muestra un esquema de la línea de nueve interruptores con la que se trabaja en este caso de estudio.

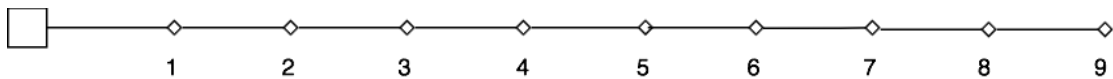
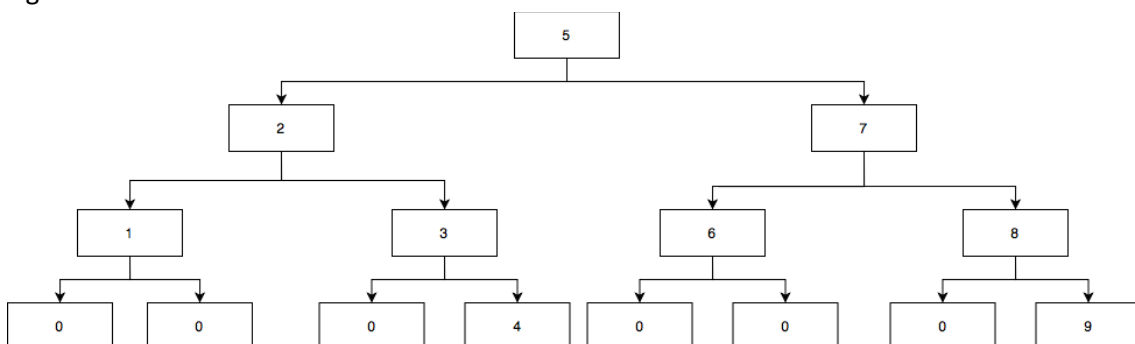


Figura 16 Red línea recta con nueve interruptores

El árbol predefinido para el cálculo de los índices de continuidad del suministro es el siguiente:



Los datos de la línea se definen a continuación en la Tabla 5.

Tabla 5 Datos de la línea de nueve tramos caso de estudio 1

Tramo	Número de clientes	Tasa de fallos (fallos/año)
1-2	200	0,50
2-3	250	0,50
3-4	250	0,75
4-5	150	1,00
5-6	200	1,00
6-7	300	1,20
7-8	100	1,20
8-9	250	2,00

Los valores de los parámetros de tiempos se indican en la Tabla 6.

Tabla 6 Valores de los parámetros de tiempos para los casos de estudio

Parámetro	Valor
$t_{alerta}$	10 minutos
$Vel_{brigada}$	1 tramo/minuto
$t_{operación}$	5 minutos
$t_{reposición}$	100 minutos

En la Tabla 7 se muestra el desglose del cálculo del SAIDI para la línea de nueve tramos. Se muestran los datos desglosados para la falta en cada tramo. La segunda columna muestra el tiempo en minutos que tarda la brigada en localizar la falta, la tercera columna muestra el total de clientes afectados que permanecerán sin suministro hasta que se despeje la falta. Es decir, el número de clientes aguas abajo del tramo con falta. La cuarta columna muestra el total de la aportación al SAIDI de la falta en dicho tramo. Este término se calcula como el tiempo de localización de la falta en ese tramo por el número total de clientes más el tiempo de reposición del servicio multiplicado por el número de clientes afectados.

*Aportación al SAIDI de un tramo*

$$= t_{localización} * N_{total_{clientes}} + t_{reposición} * N_{clientes_{afectados}}$$

Finalmente, el SAIDI se calcula sumando todas las aportaciones individuales de cada uno de los tramos y dividiendo entre el número total de clientes de la red.

Tabla 7 Desglose del cálculo del SAIDI para caso de estudio 1

Falta	Tiempo localización (min)	Clientes afectados	Aportación al SAIDI (min*cliente)
1-2	28	1.900	243.200
2-3	28	1.700	223.200
3-4	34	1.450	209.600
4-5	34	1.200	184.600
5-6	27	1.050	156.300
6-7	27	850	136.300
7-8	27	550	106.300
8-9	33	450	107.700
		Total	1.367.200

Finalmente, el SAIDI se calcula dividiendo el total de las aportaciones entre el número total de clientes:

$$SAIDI = 1.367.200 / 1900 = 719,57 \text{ min}$$

Mientras, para el cálculo del SAIFI se muestran los datos desglosados para cada tramo en la Tabla 8.

Tabla 8 Desglose del cálculo del SAIFI para caso de estudio 1

Falta	Tasa de fallos (fallos/año)	Clientes afectados	Aportación al SAIFI (interrupción*cliente)
1-2	0,50	1900	950
2-3	0,50	1700	850
3-4	0,75	1450	1087,5
4-5	1,00	1200	1200
5-6	1,00	1050	1050
6-7	1,20	850	1020
7-8	1,20	550	660
8-9	2,00	450	900
		Total	7.717,5

Finalmente, el SAIFI se calcula dividiendo el total de las aportaciones entre el número total de clientes:

$$SAIFI = 7.717,5 / 1900 = 4,06 \text{ interrupciones}$$

### 3.1.2 Línea de 14 interruptores con tres ramificaciones

La Figura 17 muestra un esquema de la línea de catorce interruptores con tres ramificaciones con la que se trabaja en este caso de estudio.

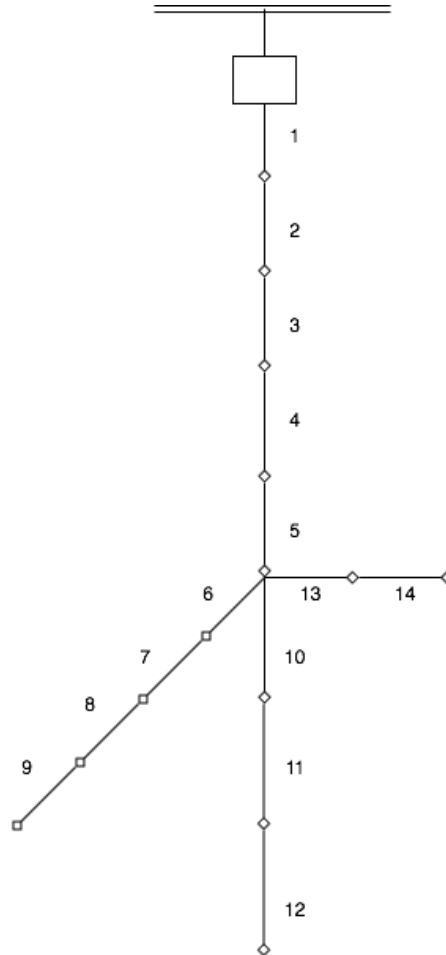
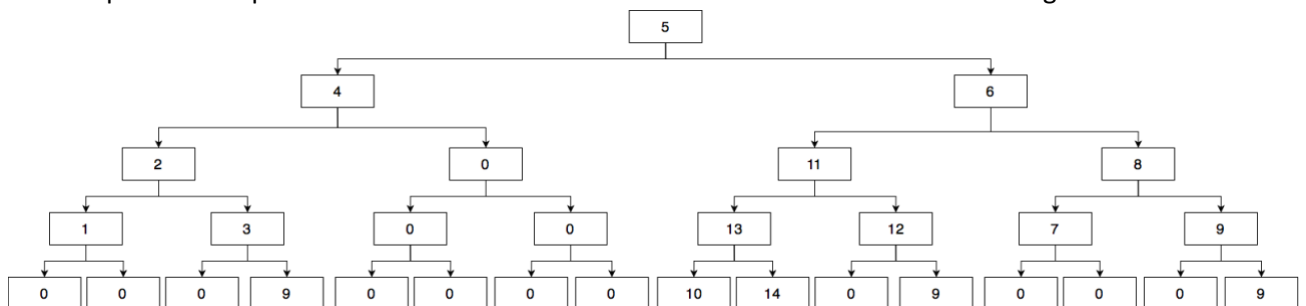


Figura 17 Red ejemplo de 14 nudos con bifurcación en tres caminos

El árbol predefinido para el cálculo de los índices de continuidad del suministro es el siguiente:



Su forma compacta es:  $A = [ \begin{matrix} 5 & 4 & 6 & 2 & 0 & 11 & 8 & 1 & 3 & 0 & 0 & 13 & 12 & 7 & 9 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 10 & 14 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix} ]$

Los datos de la línea se definen a continuación en la Tabla 9.

Tabla 9 Datos de la línea de catorce tramos caso de estudio 2

Tramo	Número de clientes	Tasa de fallos (fallos/año)
1-2	200	0,20
2-3	250	0,20
3-4	250	0,20
4-5	150	0,20
5-6	200	0,40
6-7	300	0,40
7-8	100	0,50
8-9	250	0,50
5-10	250	0,50
10-11	150	0,70
11-12	100	0,70
5-13	200	0,60
13-14	200	0,80

Los valores de los parámetros de tiempos se mantienen como en el caso anterior.

En la Tabla 10 se muestra el desglose del cálculo del SAIDI para la línea de nueve tramos. Se muestran los datos desglosados para la falta en cada tramo. La segunda columna muestra el tiempo en minutos que tarda la brigada en localizar la falta, la tercera columna muestra el total de clientes afectados que permanecerán sin suministro hasta que se despeje la falta. Es decir, el número de clientes aguas abajo del tramo con falta. La cuarta columna muestra el total de la aportación al SAIDI de la falta en dicho tramo. Este término se calcula como el tiempo de localización de la falta en ese tramo por el número total de clientes más el tiempo de reposición del servicio multiplicado por el número de clientes afectados.

*Aportación al SAIDI de un tramo*

$$= t_{localización} * N_{totalclientes} + t_{reposición} * N_{clientes_afectados}$$

Finalmente, el SAIDI se calcula sumando todas las aportaciones individuales de cada uno de los tramos y dividiendo entre el número total de clientes de la red.

Tabla 10 Desglose del cálculo del SAIDI para caso de estudio 2

Falta	Tiempo localización (min)	Clientes afectados	Aportación al SAIDI (min*cliente)
1-2	33	2.850	379.050
2-3	33	2.650	359.050
3-4	33	2.400	334.050
4-5	20	2.150	272.000
5-6	20	2.000	257.000
6-7	33	900	184.050
7-8	33	600	154.050
8-9	33	500	144.050
5-10	43	250	147.550
10-11	43	450	167.550
11-12	34	300	126.900
5-13	36	200	122.600
13-14	42	450	164.700
		<i>Total</i>	<i>2.812.600</i>

Finalmente, el SAIDI se calcula dividiendo el total de las aportaciones entre el número total de clientes:

$$SAIDI = 2.812.600 / 2850 = 986,87 \text{ min}$$

Mientras, para el cálculo del SAIFI se muestran los datos desglosados para cada tramo en la Tabla 11.

Tabla 11 Desglose del cálculo del SAIFI para caso de estudio 2

<i>Falta</i>	<i>Tasa de fallos (fallos/año)</i>	<i>Clientes afectados</i>	<i>Aportación al SAIFI (interrupción*cliente)</i>
1-2	0,20	2850	570
2-3	0,20	2650	530
3-4	0,20	2400	480
4-5	0,20	2150	430
5-6	0,40	2000	800
6-7	0,40	900	360
7-8	0,50	600	300
8-9	0,50	500	250
5-10	0,50	250	125
10-11	0,70	450	315
11-12	0,70	300	210
5-13	0,60	200	120
13-14	0,80	450	360
		<i>Total</i>	<i>4.850</i>

Finalmente, el SAIFI se calcula dividiendo el total de las aportaciones entre el número total de clientes:

$$SAIFI = 4.850 / 2850 = 1,70 \text{ interrupciones}$$

### 3.1.3 Línea de 16 tramos con cuatro ramificaciones

La Figura 18 muestra un esquema de la línea de dieciséis interruptores con cuatro ramificaciones con la que se trabaja en este caso de estudio.

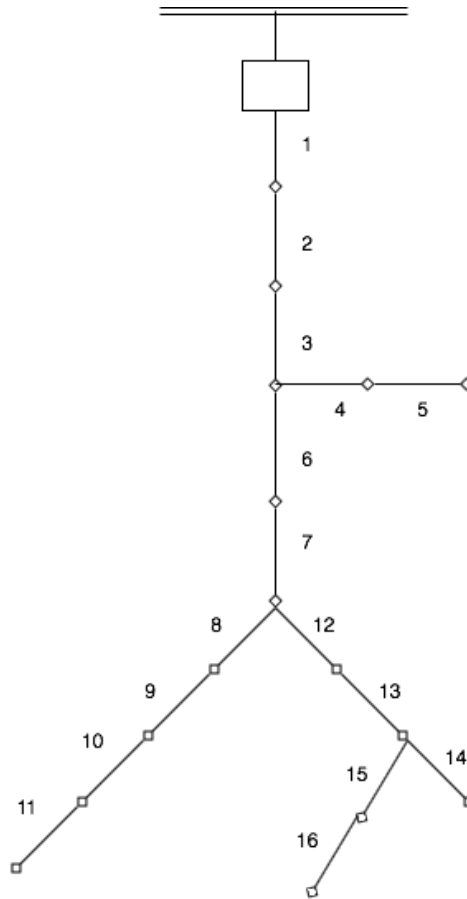


Figura 18 Red ejemplo de 16 tramos con varias bifurcaciones

El árbol predefinido para el cálculo de los índices de continuidad del suministro es el siguiente:

A=[ 3 4 6 12 5 8 7 10 15 1 2 9 11 13 16 0 0 0 0 0 0 0  
 0 0 0 0 0 0 14 0 0]

Los datos de la línea se definen a continuación en la Tabla 12.

Tabla 12 Datos de la línea de nueve tramos caso de estudio 3

Tramo	Número de clientes	Tasa de fallos (fallos/año)
1-2	200	0,10
2-3	250	0,10
3-4	250	0,10
4-5	150	0,10
3-6	200	0,10
6-7	300	0,40
7-8	100	0,30
8-9	250	0,60
10-11	250	0,80
10-11	150	0,20
7-12	100	0,20
12-13	200	0,10
13-14	200	0,70
13-15	250	0,50
15-16	150	0,30

Los valores de los parámetros de tiempos se mantienen como en el caso anterior.

En la Tabla 13 se muestra el desglose del cálculo del SAIDI para la línea de nueve tramos. Se muestran los datos desglosados para la falta en cada tramo. La segunda columna muestra el tiempo en minutos que tarda la brigada en localizar la falta, la tercera columna muestra el total de clientes afectados que permanecerán sin suministro hasta que se despeje la falta. Es decir, el número de clientes aguas abajo del tramo con falta. La cuarta columna muestra el total de la aportación al SAIDI de la falta en dicho tramo. Este término se calcula como el tiempo de localización de la falta en ese tramo por el número total de clientes más el tiempo de reposición del servicio multiplicado por el número de clientes afectados.

*Aportación al SAIDI de un tramo*

$$= t_{localización} * N_{totalclientes} + t_{reposición} * N_{clientes_afectados}$$

Finalmente, el SAIDI se calcula sumando todas las aportaciones individuales de cada uno de los tramos y dividiendo entre el número total de clientes de la red.

Tabla 13 Desglose del cálculo del SAIDI para caso de estudio 3

Falta	Tiempo localización (min)	Clientes afectados	Aportación al SAIDI (min*cliente)
1-2	32	3.100	409.200
2-3	32	2.900	389.200
3-4	18	2.650	320.800
4-5	24	350	109.400
3-6	18	200	75.800
6-7	24	2.050	279.400
7-8	24	1.750	249.400
8-9	31	750	171.100
10-11	31	500	146.100
10-11	33	250	127.300
7-12	24	100	84.400
12-13	31	900	186.100
13-14	37	700	184.700
13-15	31	250	121.100
15-16	33	250	127.300
		<i>Total</i>	<i>2.981.300</i>

Finalmente, el SAIDI se calcula dividiendo el total de las aportaciones entre el número total de clientes:

$$SAIDI = 2.981.300 / 3100 = 961,70 \text{ min}$$

Mientras, para el cálculo del SAIFI se muestran los datos desglosados para cada tramo en la Tabla 14.

Tabla 14 Desglose del cálculo del SAIFI para caso de estudio 3

Falta	Tasa de fallos (fallos/año)	Clientes afectados	Aportación al SAIFI (interrupción*cliente)
1-2	0,10	3100	310
2-3	0,10	2900	290
3-4	0,10	2650	265
4-5	0,10	350	35
3-6	0,10	200	20
6-7	0,40	2050	820
7-8	0,30	1750	525
8-9	0,60	750	450
10-11	0,80	500	400
10-11	0,20	250	50
7-12	0,20	100	20
12-13	0,10	900	90
13-14	0,70	700	490
13-15	0,50	250	125
15-16	0,30	250	75
<i>Total</i>			<b>3.965</b>

Finalmente, el SAIFI se calcula dividiendo el total de las aportaciones entre el número total de clientes:

$$SAIFI = 3.965 / 3100 = 1,28 \text{ interrupciones}$$

### 3.2 Optimización de la planificación de brigadas

En este apartado se incluyen los tres casos de estudio de la optimización de la planificación de brigadas. El algoritmo genético se ejecuta con una población inicial de 100 individuos. Los parámetros de tiempos utilizados son los mismos para ambos métodos de optimización (AG y generador de árboles) y se corresponden con los parámetros de tiempos utilizados en 3.1, y que se pueden consultar en la Tabla 6.

#### 3.2.1 Línea recta de 9 interruptores

La Figura 19 muestra un esquema de la línea de nueve interruptores con la que se trabaja en este caso de estudio. En la Tabla 15 se muestran los resultados del caso.

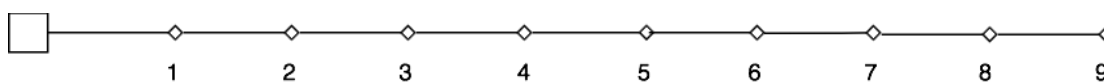


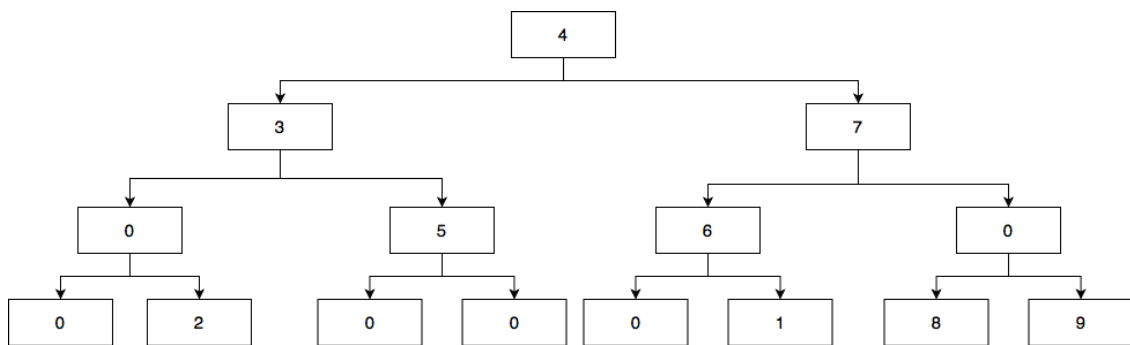
Figura 19 Red línea recta con nueve interruptores

Tabla 15 Resultados del SAIDI caso nueve interruptores

	A.Genético	Generador
SAIDI (min)	685,26	707,57
Tiempo de ejecución del programa (s)	66,57	7,97

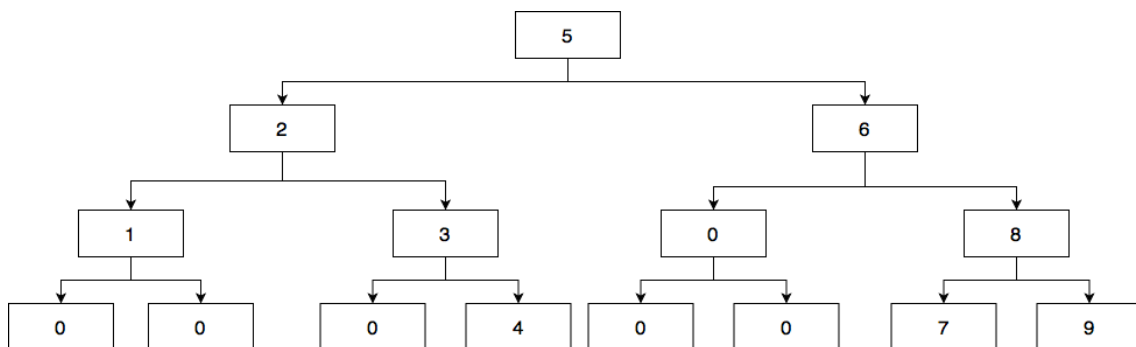
A continuación, se incluyen los árboles obtenidos mediante ambos métodos.

Árbol obtenido con el AG:



A=[4 3 7 0 5 6 0 0 2 0 0 0 1 8 9]

Árbol obtenido con el generador:



Como muestra la Tabla 15, el SAIDI obtenido mediante el AG es menor que el SAIDI obtenido mediante el generador de árboles de decisiones. Sin embargo, el árbol asociado a dicho árbol no es un árbol lógico. Para entender mejor los resultados en la Tabla 16 se presentan la ruta de la brigada para cada falta, junto con el tiempo de localización y los clientes afectados en cada caso. Se observa que las rutas de las brigadas son muy cortas, en la mayoría de los casos solo visita dos interruptores, mientras que el aumento de clientes afectados en la zona de falta no es demasiado grande. El aumento de clientes afectados está señalado en rojo en la tabla, resaltando la diferencia entre los clientes en el tramo con falta, que son los clientes afectados en caso de que se aislase el tramo con falta con total precisión, y los clientes en la zona aislada con el árbol de decisiones. En este caso el AG ha sido capaz de encontrar un árbol no-lógico que compensa la falta de precisión a la hora de localizar la falta con la rapidez de la operación de las brigadas. El generador de árboles por su parte sólo busca árboles lógicos por lo

que no es posible que encuentre esta solución. En este caso la solución del generador de árboles es peor que la del AG. Sin embargo, garantiza total precisión a la hora de aislar la falta. Además, el AG ha tardado 66,57 segundos en ejecutarse frente a 7,97 segundos del generador de árboles. Esto supone más de ocho veces el tiempo de ejecución del método del generador. Teniendo en cuenta que esta configuración de red es muy sencilla y se trata de una red con pocos tramos, se puede vaticinar que para redes grandes la diferencia de tiempos de ejecución entre ambos métodos se acentúe.

Tabla 16 Desglose cálculo del SAIDI solución AG

Falta	Ruta brigadas (secuencia de interruptores visitados)	Tiempo localización (min)	Clientes afectados	Clientes en el tramo con falta
1-2	4,3	19	200	200
2-3	4,3	19	450	250
3-4	4,3	19	250	250
4-5	4,7,6	27	150	150
5-6	4,7,6	27	350	200
6-7	4,7,6	27	300	300
7-8	4,7	21	100	100
8-9	4,7	21	350	250

### 3.2.2 Línea de 14 tramos con una bifurcación en tres caminos

La Figura 20 muestra un esquema de la línea de catorce interruptores con la que se trabaja en este caso de estudio. En la Tabla 17 se muestran los resultados del caso. Para el cálculo con el AG se ha ejecutado el código varias veces con longitudes de árboles distintas y se ha seleccionado la mejor opción, teniendo como criterio principal el SAIDI mínimo y como secundario el árbol más corto.

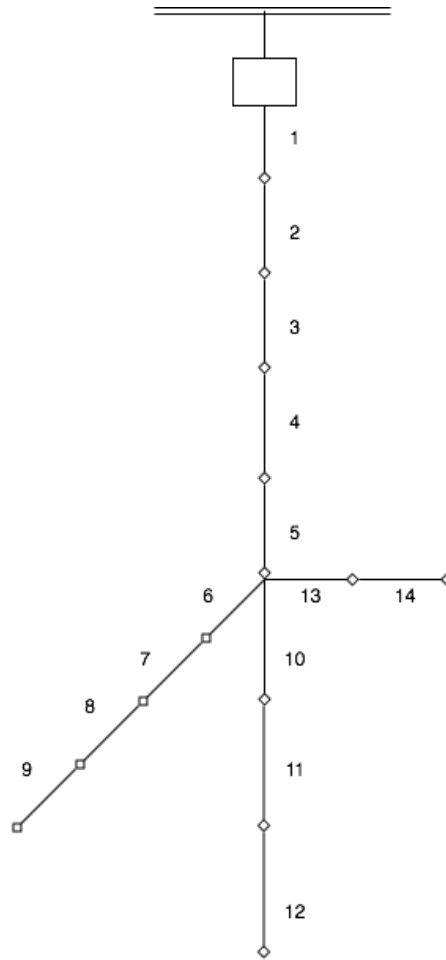


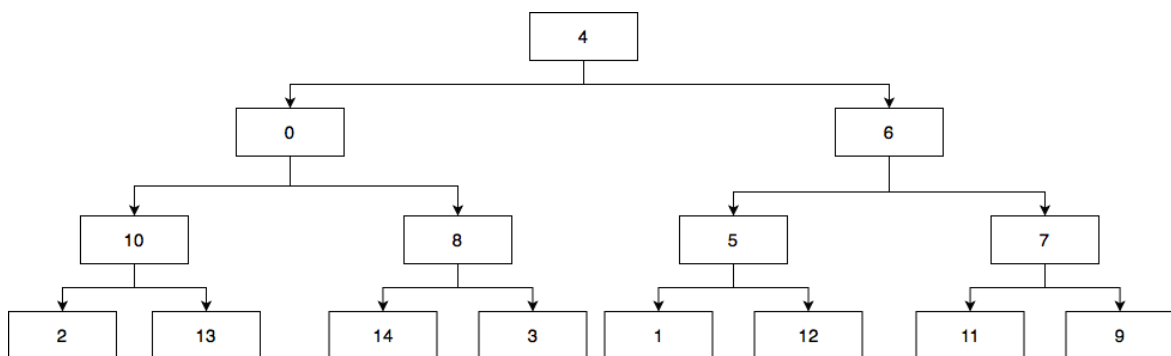
Figura 20 Red ejemplo de 14 nudos con bifurcación en tres caminos

Tabla 17 Resultados del SAIDI caso catorce interruptores

	A.Genético	Generator
SAIDI (min)	1076,1	986,87
Tiempo de ejecución del programa (s)	643,9	9,00

A continuación, se incluyen los árboles obtenidos mediante ambos métodos.

Árbol obtenido con el AG:



A=[ 4 0 6 10 8 5 7 2 13 14 3 1 12 11 9]

Árbol obtenido con el generador:

A=[ 5 4 6 2 0 11 8 1 3 0 0 13 12 7 9 0 0 0 0 0 0 0 0  
10 14 0 0 0 0 0 0]

A diferencia del caso anterior la solución del AG es peor que la del generador de árboles. De nuevo la solución del AG es un árbol no-lógico, aunque ya se ha comprobado que esto no quiere decir que por ello sea necesariamente peor. El árbol obtenido con el generador de árboles tiene un SAIDI asociado menor, es perfectamente lógico y además el tiempo de ejecución del programa es mucho menor, en concreto el AG tarda setenta y un veces más tiempo.

### 3.2.3 Línea de 16 tramos con varias bifurcaciones

La Figura 21 muestra un esquema de la línea de dieciséis interruptores con la que se trabaja en este caso de estudio. En la Tabla 18 se muestran los resultados del caso. Para el cálculo con el AG se ha ejecutado el código varias veces con longitudes de árboles distintas y se ha seleccionado la mejor opción, teniendo como criterio principal el SAIDI mínimo y como secundario el árbol más corto.

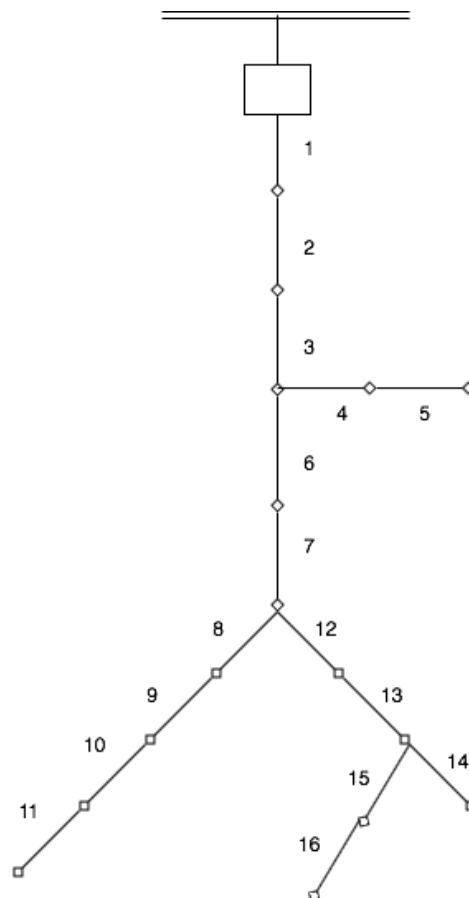


Figura 21 Red ejemplo de 16 tramos con varias bifurcaciones

Tabla 18 Resultados del SAIDI caso dieciséis interruptores

	A.Genético	Generador
SAIDI (min)	1137,0	1031,7
Tiempo de ejecución del programa(s)	1699,87	10,60

A continuación, se incluyen los árboles obtenidos mediante ambos métodos.

Árbol obtenido con el AG:

A=[ 7 6 12 4 0 8 0 3 0 0 0 0 10 15 0 0 9 0 0 13 1  
0 14 0 5 0 16 0 2 11]

Árbol obtenido con el generador:

A=[ 6 3 7 2 4 0 8 1 0 0 5 0 0 13 9 0 0 0 0 0 0 0  
0 0 0 0 12 15 0 10 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0  
0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 14 16 0 0 0 11]

El resultado del generador es mejor que el resultado del AG, ya que encuentra un plan de brigadas asociado a un SAIDI menor. De nuevo la solución del AG es un árbol no-lógico. Además, el tiempo de ejecución del AG es ya de cuarenta y una veces mayor que el tiempo de ejecución del generador.

### 3.3 Conclusiones comparación de métodos para planificación de brigadas

Dados los resultados obtenidos en los tres casos de estudio presentados, se concluye que el generador de árboles de decisiones es una herramienta más eficaz para la planificación de brigadas que los algoritmos genéticos. A pesar de que en el primer caso de estudio, la línea de nueve interruptores, el AG encontró una solución mejor que el generador de árboles gracias a que realiza la búsqueda incluyendo tanto árboles lógicos como no-lógicos (el generador de árboles sólo busca entre árboles lógicos), en los otros dos casos el generador encontró mejores soluciones. Se pudo comprobar que a medida que aumenta el tamaño de la red, el AG tiene más dificultades para encontrar una solución. Esto se refleja también en los tiempos de computación, que son en todos los casos mucho más elevados para el AG que para el generador, especialmente con tamaños mayores de red. Finalmente, el generador de árboles tiene otra ventaja, y es que siempre garantiza la localización precisa del tramo con falta, mientras que el AG tiende a sacrificar la precisión por unos tiempos de recorrido de las brigadas menores.

El principal problema del AG es que es una herramienta que funciona observando tendencias. El AG es una herramienta que funciona bien cuando trabaja en un espacio continuo, por ejemplo, si se utiliza para encontrar el mínimo en una función como la que muestra la Figura 22. En este ejemplo, cada individuo de la población tendrá una puntuación finita, y cada pequeña modificación en el gen del individuo resultará en una mejora o desmejora cuantificable

y evaluable por el AG. El problema de la planificación de brigadas, sin embargo, es un espacio discreto. Cambiar un solo gen de la cadena cambia el significado entero del árbol e incluso lo puede hacer no válido. A pesar de que se han modificado las funciones de cruce y mutación para evitar que los árboles pierdan el sentido, intercambiar un gen con otro o cambiar de sitio partes de la cadena siguen modificando el significado del árbol entero. Los saltos discontinuos en el resultado impiden al AG converger. Por ello, los AG no son una herramienta recomendada ante problemas que buscan una solución del tipo correcto/incorrecto [30].

Además, el método de búsqueda empleado en este proyecto basado en AG tampoco se adapta bien al problema. El AG selecciona los mejores individuos de una población y trata de mejorarlos mediante cruces y mutaciones. Sin embargo, en este problema, lo más probable es que ante un cruce o una mutación un árbol perfectamente válido deje de tener sentido o se convierta en uno peor. Esto dificulta mucho al AG encontrar una tendencia.

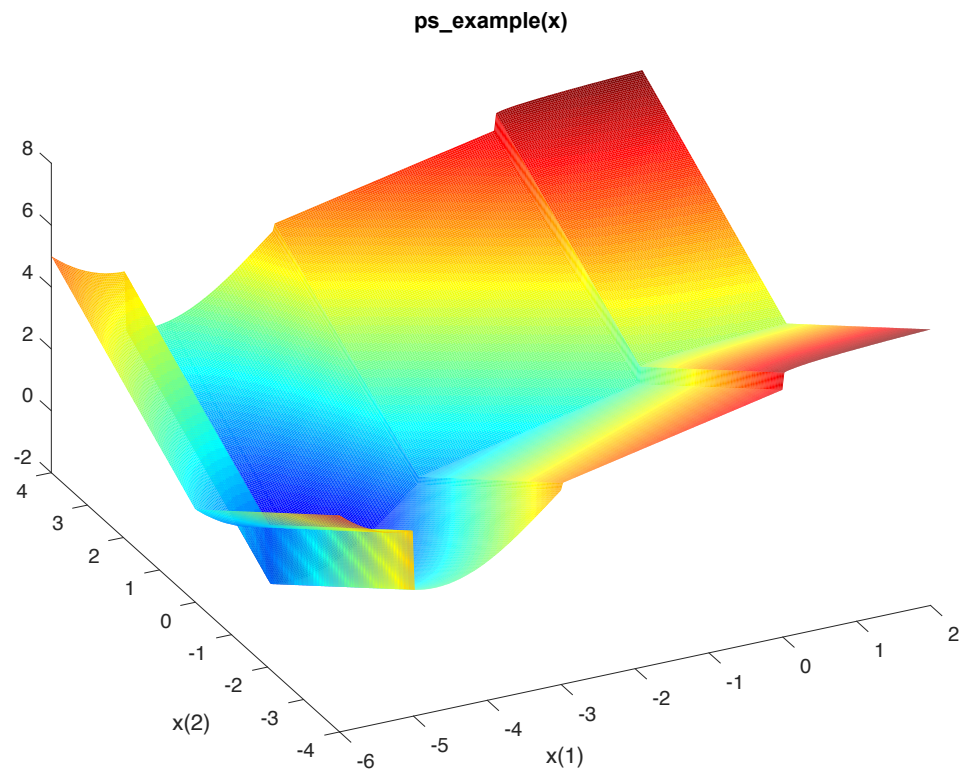


Figura 22 Función 3D ejemplo en Matlab

El generador de árboles, por su parte, al tener una componente estocástica, tiene la desventaja de que no asegura que se hayan generado todos los árboles posibles, si bien, elevando el número de generaciones se disminuye la probabilidad de que haya árboles no generados.

Teóricamente, esto se puede solucionar creando un código que genere todos los árboles posibles para una configuración de red. En este caso, se trataría de una búsqueda exhaustiva. Pero para ello es necesario calcular el número de árboles de decisiones válidos posibles para una configuración de red. Por un lado, el número de árboles válidos de una red viene

condicionado por todos los requisitos de un árbol de decisiones. Es decir, no es un simple problema combinatorio. Por otro lado, el número de árboles válidos posibles para una red depende de la configuración particular de la misma. Para crear una función que tenga como resultado el número de árboles posibles de una red, es necesario parametrizar la configuración de la red con detalle. En este estudio se propone analizar como afecta el número de generaciones al resultado del SAIDI.

### 3.4 Optimización del generador de árboles de decisiones

En este apartado se estudia el efecto del número de generaciones sobre el resultado del generador de árboles. Como ya se ha mencionado, el generador de árboles es un método estocástico, puesto que los árboles que genera son aleatorios. Cada vez que se ejecuta, el generador genera árboles distintos que, además, pueden estar repetidos. Para asegurar que el resultado obtenido sea competente el número de generaciones tiene que ser suficientemente alto. Lógicamente, a medida que aumenta el número de generaciones también lo hace el tiempo de ejecución. Por lo que es deseable establecer un número de generaciones que garantice un resultado bueno y a la vez que un tiempo de ejecución aceptable. Para ello se han observado los resultados del generador de árboles para distinto número de generaciones para cada una de las tres redes ejemplo. Los resultados se muestran en la Tabla 19. Es necesario precisar que cada resultado mostrado corresponde a una sola ejecución del programa y que dependen de variables aleatorias, por lo que si se volviese a ejecutar el programa los resultados podrían cambiar.

Tabla 19 SAIDI mínimo para distinto número de generaciones

N. Generaciones	SAIDI (min)		
	9 tramos	14 tramos	16 tramos
10	719,57	1012,9	1199,7
50	714,57	1012,9	1115,7
100	712,57	985,87	1041,7
200	709,57	989,87	1043,7
500	707,57	976,87	1058,7
1000	704,57	979,87	1046,7
3000	707,57	966,87	1043,7
5000	704,57	958,87	1034,7
10000	704,57	963,87	1028,7

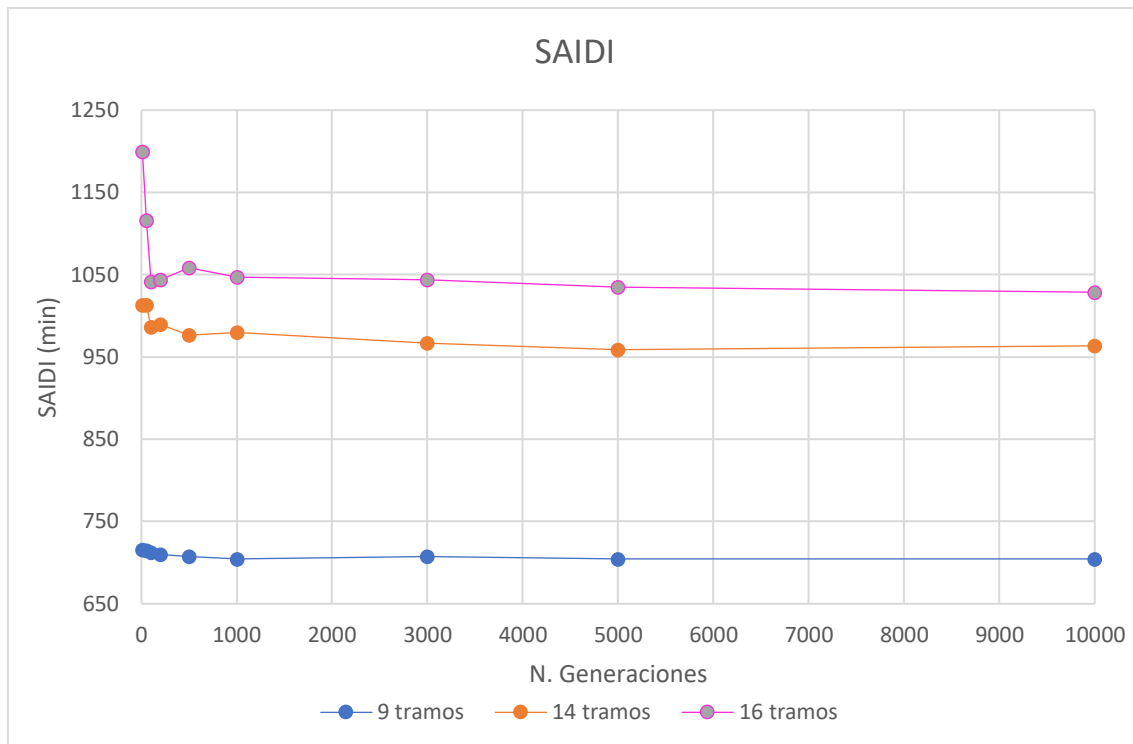


Figura 23 Gráfico de SAIDI mínimo para distinto número de árboles generados

Dado los resultados obtenidos, se observa que el SAIDI devuelto por el generador de árboles tiende a ser menor a medida que el número de generaciones crece. Sin embargo, existen casos donde esto no ocurre necesariamente, debido al carácter probabilístico de la función. Por ejemplo, para la red de 14 tramos el generador encontró un SAIDI menor en una ejecución de 5.000 generaciones que en una de 10.000 generaciones. Esto quiere decir que no es posible garantizar mejores resultados simplemente aumentando el número de generaciones.

A su vez, se ha calculado el tiempo de ejecución en función del número de generaciones. Los resultados se muestran en la Tabla 20.

Tabla 20 Tiempo de ejecución en función del número de generaciones

N. GENERACIONES	TIEMPO DE EJECUCIÓN (S)
10	0,59
50	1,58
100	2,15
200	4,18
500	9,84
1000	19,84
3000	58,17
5000	95,43
10000	191,1

De media cada generación supone 0,0255 segundos de tiempo de ejecución. Es decir, por cada 100 generaciones aumenta el tiempo de ejecución en 2,55 segundos.

### 3.5 Análisis de sensibilidad del SAIDI

En este apartado, se quiere hacer un análisis de sensibilidad del SAIDI a los parámetros de tiempos. Siendo estos, velocidad, tiempo de alerta, tiempo de operación y tiempo de reposición. Para ello se ha escogido el caso de la línea recta de nueve tramos y un árbol de decisiones particular. El árbol elegido se ha generado al azar con el generador de árboles y se muestra en la Figura 24.

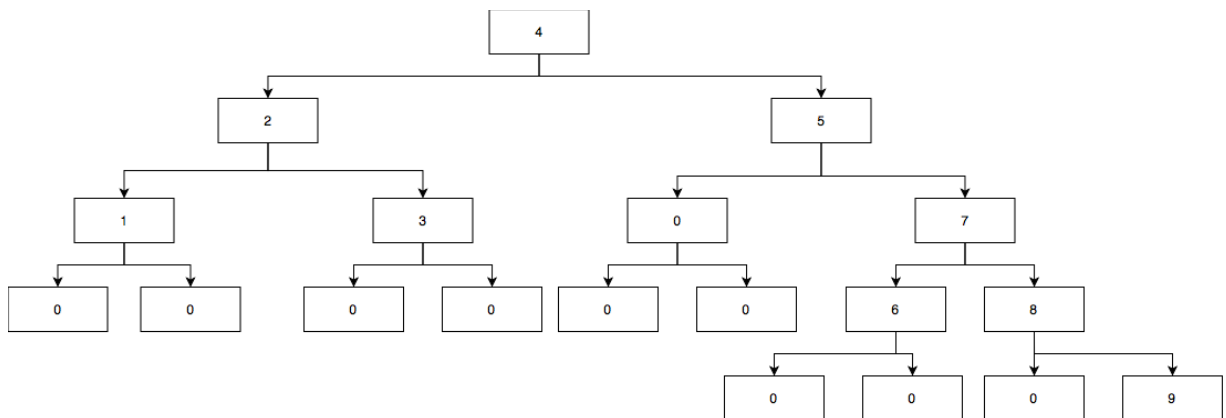


Figura 24 Árbol de decisiones para análisis de sensibilidad

El vector del árbol se escribe a continuación:

A=[4 2 5 1 3 0 7 0 0 0 0 0 6 8 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 0 9]

Los parámetros del caso base son los utilizados en los casos de estudio y se recogen de nuevo en la Tabla 21 a continuación.

Tabla 21 Valores de los parámetros de tiempos del caso base

Parámetro	Valor
Tiempo de alerta	10 minutos
Velocidad brigada	1 tramo/minuto
Tiempo de operación	5 minutos
Tiempo de reposición	100 minutos

Los resultados del análisis de sensibilidad se muestran en la Tabla 22.

Tabla 22 Resultados del análisis cambiando sólo un parámetro cada vez

<b>Velocidad (tramos/min)</b>	<b>SAIDI (min)</b>
0,10	1.171
0,25	865
0,50	763
0,75	729
1,00	712
1,50	695
3	678
5	671
10	666
25	663
50	662
100	662
<b>Tiempo de alerta (min)</b>	
0,00	632
1,00	640
2,00	648
5,00	672
10,00	712
15,00	752
30,00	872
<b>Tiempo de operación (min)</b>	
0,00	612
1,00	632
2,00	652
5,00	712
10,00	812
15,00	912
<b>Tiempo de reposición (min)</b>	
0,00	213
5,00	255
20,00	327
40,00	423
60,00	519
80,00	616
100,0	712
150,0	953
250,0	1435
350,0	1916
500,0	2639

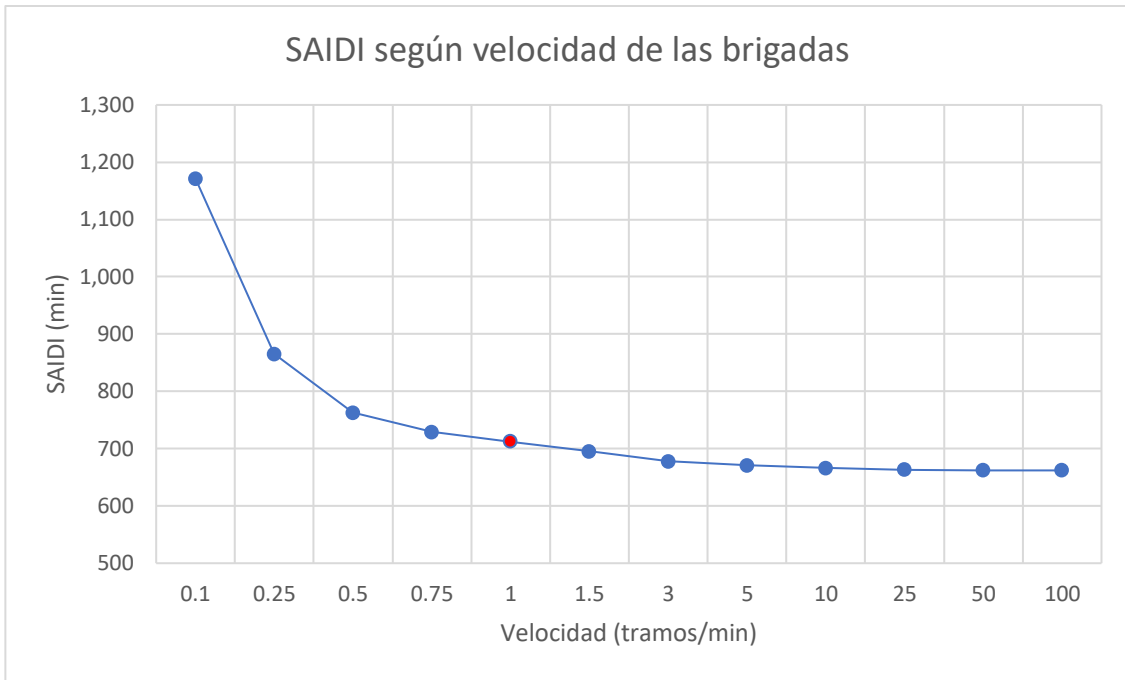


Figura 25 SAIDI según velocidad de las brigadas

La sensibilidad del SAIDI a la velocidad es distinta según el intervalo en el que se calcule puesto que existe una relación cercana a una exponencial entre el SAIDI y la velocidad de las brigadas. En valores pequeños de la velocidad, la sensibilidad al cambio es elevada mientras que a partir de 3 tramos por minuto el SAIDI casi no se ve afectado por la velocidad. A partir de 3 tramos por minuto deja de ser efectivo el aumento de la velocidad de las brigadas como método para mejorar el SAIDI.

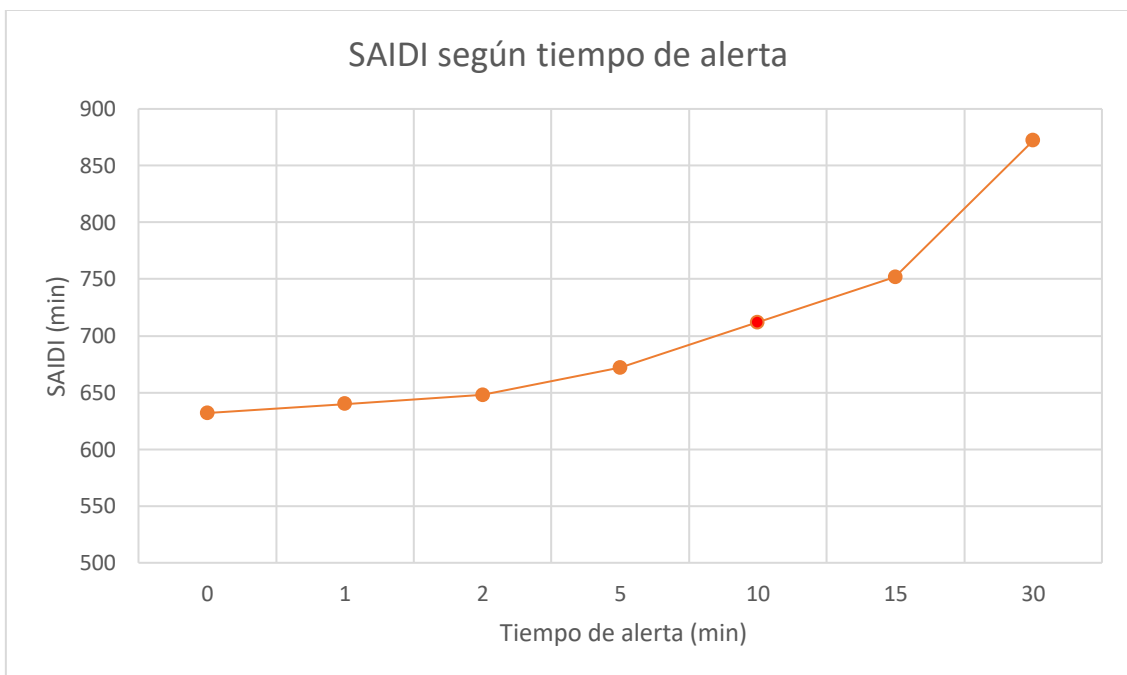


Figura 26 SAIDI según tiempo de alerta

De nuevo, la sensibilidad del SAIDI a la velocidad es distinta según el intervalo en el que se calcule. En valores altos del tiempo de alerta, la sensibilidad al cambio es elevada mientras que a partir de 2 minutos el SAIDI casi no se ve afectado por el tiempo de alerta. A partir de 2 minutos deja de ser efectiva la reducción del tiempo de alerta como método para mejorar el SAIDI.

Lo mismo ocurre en las gráficas del tiempo de operación y del tiempo de reposición. En ambos casos se observa como la sensibilidad del SAIDI no es constante.

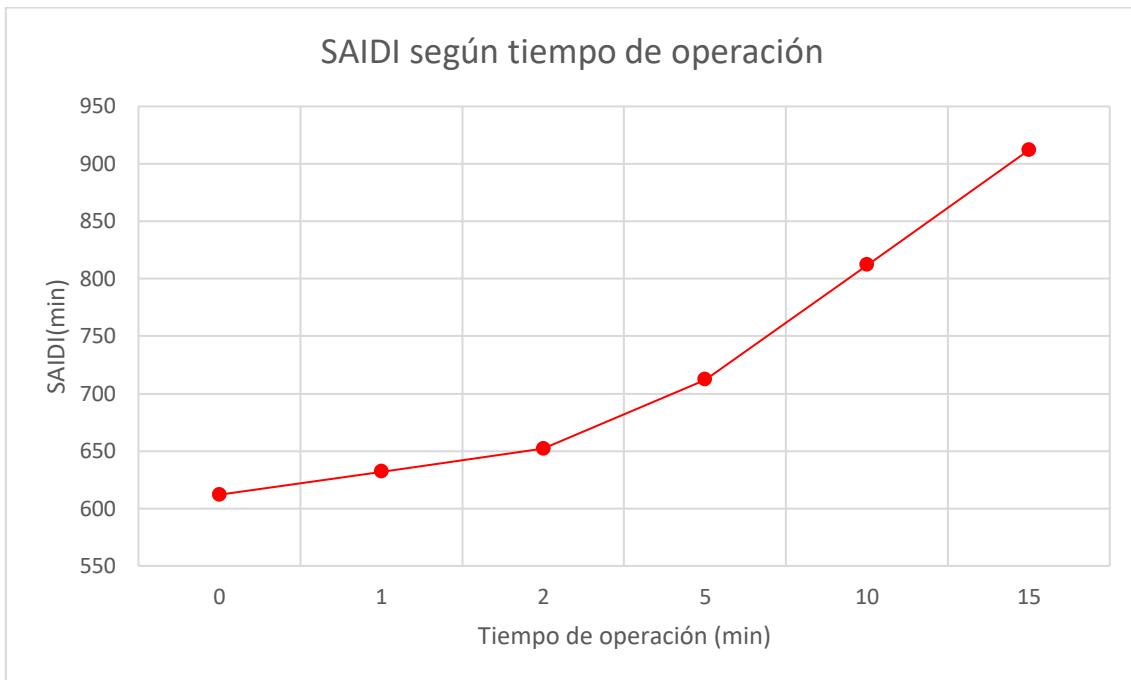


Figura 27 SAIDI según tiempo de operación

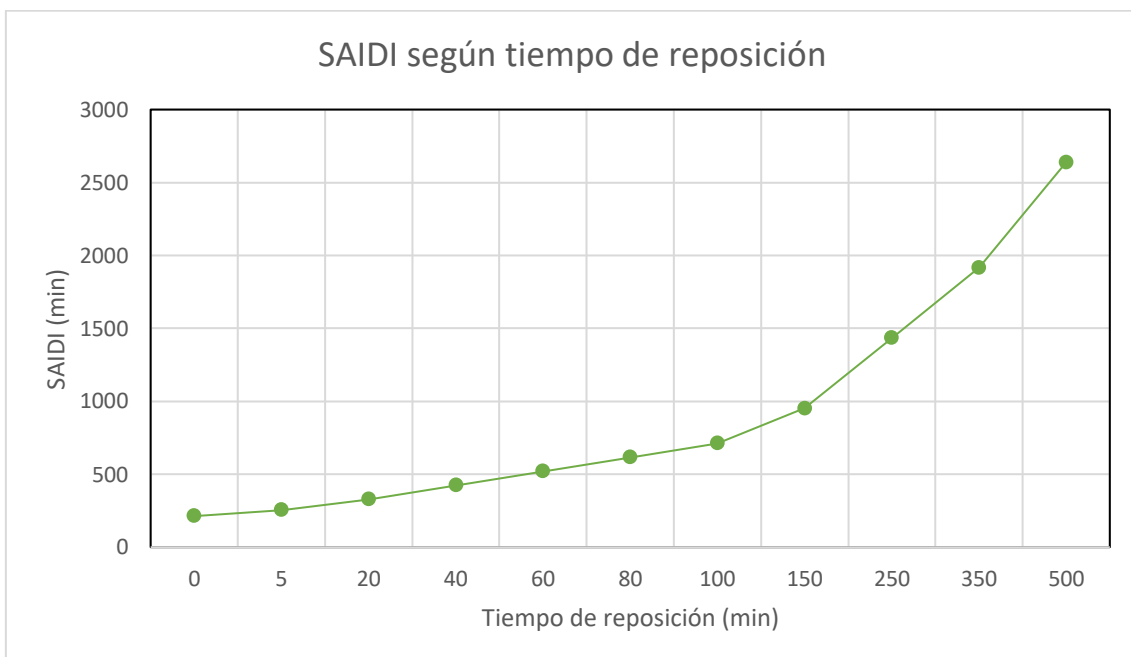


Figura 28 SAIDI según tiempo de reposición

Dado que las relaciones entre el SAIDI y los parámetros de tiempo son cercanos a una exponencial, es posible identificar los valores máximos o mínimos de los parámetros de tiempos deseables para optimizar el SAIDI. Los valores identificados en este caso pueden variar dependiendo de la tipología de red y de la planificación de brigadas. Además, el análisis de sensibilidad es interesante ya que se puede combinar con un estudio económico para determinar la inversión óptima en la mejora de dichos parámetros.

## 4 Metodología en redes con generación distribuida

### 4.1 Introducción

La primera parte de este trabajo se ha centrado en resolver el problema de la planificación de brigadas en redes clásicas con interruptores manuales y un solo punto de suministro. Este ejercicio sirve para sentar la base de la segunda parte del trabajo donde se utilizan redes más complejas que incluyen interruptores teledemandados e instalaciones de generación distribuida (DG). Estas redes son cada vez más comunes por su mayor fiabilidad, así como por la necesidad de recurrir a métodos de generación de energía más limpios. En este capítulo se presenta la metodología para calcular los índices de continuidad del suministro y la planificación de brigadas en redes con interruptores teledemandados e instalaciones DG. En primer lugar, en 4.2 se hace una introducción a los interruptores teledemandados y su operación ante faltas. En 4.3 se explica como se modelan las instalaciones DG integradas en la red y su efecto en la continuidad del suministro. A continuación, en 4.4 se desarrolla la operación ante faltas en redes con ambos elementos mediante la ayuda de un flujograma. En 4.5 se detalla el cálculo de los índices de suministro. Finalmente, el apartado 4.6 trata la planificación de brigadas en redes con interruptores teledemandados e instalaciones DG.

### 4.2 Interruptores teledemandados

En las redes estudiadas hasta ahora en este trabajo sólo se han considerado interruptores manuales, por lo que la única forma de operarlos era mediante un operario de mantenimiento que se desplazase hasta la posición del interruptor. En esta parte del trabajo se introducen los interruptores teledemandados. Los interruptores teledemandados pueden ser operados a distancia desde un centro de control y pueden ser programados para que ellos mismos operen de forma automática. En una red donde todos los interruptores son teledemandados la localización de la falta es casi instantánea. Sin embargo, la instalación de estos interruptores supone una mayor inversión, por lo que el nivel de automatización de la red es un parámetro a optimizar [32].

En una red donde sólo una parte de los interruptores son teledemandados, la zona en la que debe operar la brigada de mantenimiento ante una falta se ve acotada. Cuando una falta ocurre en una red con interruptores teledemandados estos operan de forma automática dando información a la distribuidora sobre la localización de la falta. Los relés incorporados en los interruptores teledemandados informan sobre si la falta está aguas arriba o aguas abajo de su posición. En la Figura 29 se muestra un ejemplo de zona acotada por interruptores teledemandados (delimitada por las líneas discontinuas verticales). En este caso, ante una falta en el tramo '4', los interruptores teledemandados que se encuentran en 2-3 y en 6-7 acotan la zona de la falta a la zona roja de la imagen. De esta forma, la brigada sólo debe buscar la falta en una zona de cuatro tramos en lugar de una de zona de ocho tramos. Esto tiene un impacto directo en el SAIDI ya que el tiempo de falta se reduce.

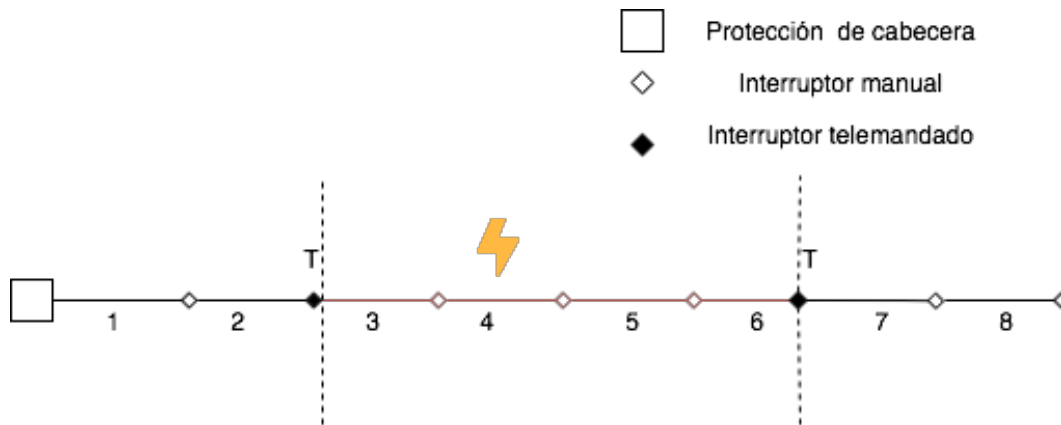


Figura 29 Ejemplo de zona acotada por interruptores telemandados

La reducción del tiempo de localización de falta no es el único beneficio derivado de los interruptores telemandados. Los interruptores telemandados identifican y aíslan zonas libres de falta de forma casi instantánea. Esto permite que esas zonas puedan ser reconectadas al suministro principal o a un suministro alternativo en menos de tres minutos siempre que la configuración lo permita. Según la normativa española, cuando una falta dura menos de tres minutos no se computa para el cálculo del SAIDI, por lo que combinando interruptores telemandados con fuentes de alimentación alternativas, como las unidades DG o con configuraciones de red flexibles, se puede reducir aún más el SAIDI de una zona.

#### 4.3 Instalaciones de generación distribuida (DG)

Las instalaciones DG conectadas a la red brindan la oportunidad de restaurar el suministro ante una falta en partes de la red donde no es posible reconectar a la subestación principal debido a la configuración de la propia red. Recuperando el ejemplo de la Figura 29, en la Figura 30 se muestra como se puede reconectar parte de la red a una instalación DG. En este caso los tramos '7' y '8' recuperan el suministro rápidamente después de ser aislados con el interruptor telemandado y reconectados a la instalación DG. Nótese que en este capítulo no se hace distinción entre las instalaciones de generación distribuida y las microrredes puesto que el efecto de ambas, a efectos prácticos del cálculo del SAIDI, es el mismo.

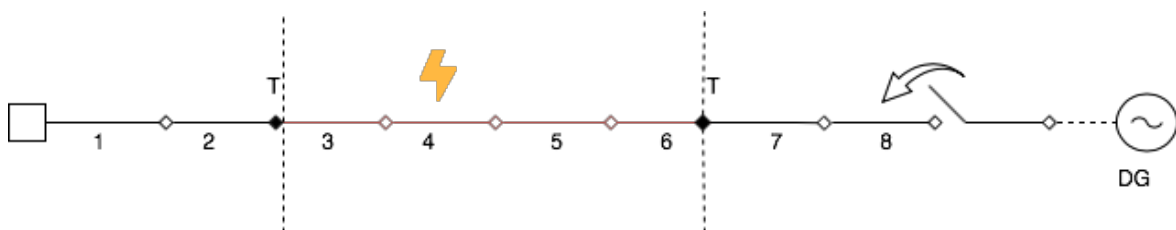


Figura 30 Ejemplo de reconexión con unidad DG

Sin embargo, a diferencia de la subestación principal las instalaciones DG suelen tener una capacidad limitada para abastecer la demanda. A veces, no es posible suministrar toda la energía que se quiere conectar a la instalación DG, bien sea porque es una fuente de generación renovable y por tanto está sujeta a la disponibilidad del recurso, porque sea una batería y

dependa del nivel de carga y la potencia, o simplemente porque la potencia demandada sea mayor que la capacidad total de la instalación DG. Para representar la capacidad de las instalaciones DG se utiliza una matriz de interacción. En [33] se desarrolla en detalle el concepto de matriz de interacción y su método de cálculo.

La matriz de interacción indica el porcentaje de la energía demandada en cada zona que puede suministrar una instalación DG en caso de falta. Cada columna de la matriz se interpreta como la falta en un tramo y cada fila se interpreta como la energía no servida en ese tramo durante el tiempo de falta. Véase, por ejemplo, la matriz 5x5 a continuación. La matriz corresponde a una red de cinco tramos en línea recta con una unidad DG conectada en el último tramo. La primera columna representa la falta en el tramo uno, la segunda columna representa la falta en el tramo dos etc. La diagonal principal de la matriz esta compuesta de unos ya que la falta en el propio tramo supone un apagón total en el mismo. Por encima de la diagonal principal todos los elementos son cero ya que esos tramos se pueden reconectar a la subestación principal directamente. Por debajo de la diagonal principal hay números comprendidos entre el cero y el uno. Los unos indican que la instalación DG no puede suministrar nada de energía a ese tramo y por tanto hay un 100% de energía no servida. Los elementos menores de uno indican que la unidad DG puede suministrar parte de la energía. Por ejemplo, en la primera columna, ante una falta en el primer tramo, la instalación DG puede suministrar el 75% de la demanda. En el caso de una falta en el segundo tramo (segunda columna), el número de tramos que tiene que alimentar la unidad DG es menor, por lo que la energía no servida disminuye a un 12,5%. En el caso de fallos en los tramos 3 y 4 la energía no servida es cero ya que al reducirse la demanda existe suficiente capacidad para alimentar los tramos aguas debajo de la falta. Finalmente, antes una falta en el tramo 5 el DG no puede alimentar a ningún tramo.

*Matriz de interacción:*

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.25 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0.25 & 0.125 & 1 & 0 & 0 \\ 0.25 & 0.125 & 0 & 1 & 0 \\ 0.25 & 0.125 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

#### 4.4 Operación ante faltas

El procedimiento ante una falta en una red con interruptores telemandados y instalaciones DG conectadas a la red viene descrito en el flujograma de la Figura 31. En primer lugar, los interruptores telemandados operan acotando la zona de falta todo lo posible, de esta forma una parte de la red queda descartada como posible zona con falta, a esta zona se la denomina zona sin falta. El segundo paso consiste en reponer el suministro en la zona sin falta hasta dónde sea posible. Para ello se tienen dos opciones, la subestación y las instalaciones DG conectadas a la red. Dado que la capacidad de las instalaciones DG es limitada se le da prioridad a la subestación, de forma que primero se cubre con la subestación todos los tramos que sea posible cubrir. A continuación, si aún existen tramos de la zona sin falta sin suministro, se cubre con el DG hasta dónde se pueda. A continuación, en caso de que la zona acotada sea mayor a un tramo, se utilizan las brigadas en la zona de falta acotada para identificar el tramo con falta.

La operación de las brigadas es idéntica a la descrita en 2.1. El paso siguiente consiste en volver a restablecer el servicio en la nueva zona sin afectación siguiendo el mismo orden de prioridad que antes. Primero se conectan a la subestación todos los tramos que sea posible, a continuación, se intenta cubrir el resto con las instalaciones DG. Finalmente, se despeja la falta y se repone el servicio en toda la red.

En este procedimiento pueden distinguirse dos fases: la fase 1 donde se repone parte del suministro en la zona sin falta delimitada por los interruptores telemandados, y la fase 2 donde se repone el suministro en la parte sin falta restante después de la operación de las brigadas.

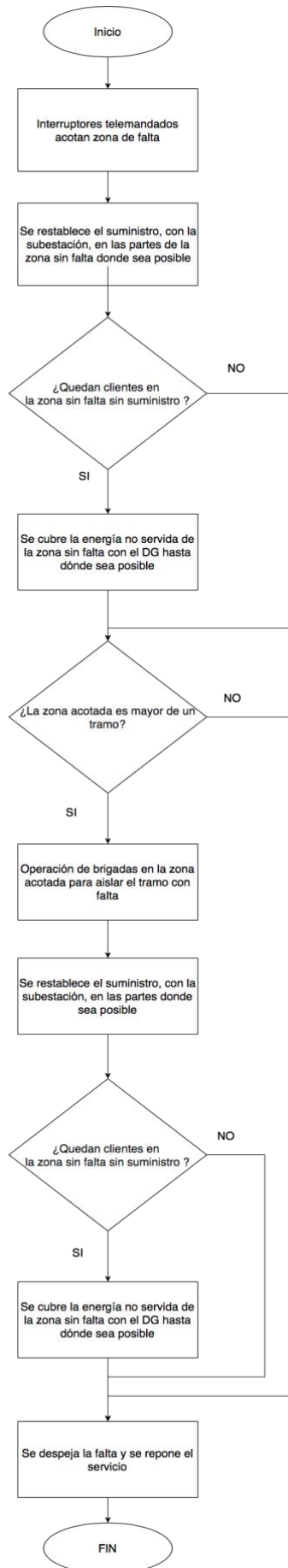


Figura 31 Flujograma de procedimiento ante falta en red con interruptores teledemandados y unidades DG conectadas

#### 4.5 Cálculo de los índices de continuidad del suministro con microrredes

La nueva forma de operar ante una falta descrita en 4.4 supone un cambio en la forma de calcular el índice SAIDI de la red. En las redes sin interruptores telemandados y sin unidades DG existían dos tiempos de falta en la red, ya que una parte de la red recuperaba el suministro a través de la subestación principal una vez aislada la falta y la parte restante debía esperar hasta que se despejase la falta y el servicio completo se restaurase. Ahora hay nuevos escalones en la recuperación del servicio. Para el cálculo del SAIDI se han clasificado las zonas en función de cómo se restablece el servicio en esa zona de forma parecida a la clasificación del punto de carga en [34]. Cada clase de zona tiene un tiempo de falta asociado. Las zonas clasificadas son:

- Zona sub-fase 1: Es la primera zona en la que se repone el servicio e incluye todos los tramos conectados a la subestación después de la acción de los interruptores telemandados
- Zona DG fase 1: Incluye todos los tramos conectados a las unidades DG después de la acción de los interruptores telemandados
- Zona sub-fase 2: Incluye los tramos de la red que se conectan a la subestación después de la acción de las brigadas
- Zona DG fase 2: Incluye los tramos de la red que se conectan a las unidades DG después de la acción de las brigadas
- Zona sin suministro: Incluye las zonas en las que no es posible restablecer el suministro hasta que se haya despejado la falta

En realidad, como se ha comentado en 4.3, el DG no siempre cubre el 100% de la energía demandada en cada tramo. Por ello, se computa como zona DG en cada fase sólo el porcentaje de clientes que recuperan el suministro en cada tramo abastecido por las unidades DG.

Los tiempos de falta asociados a cada clase vienen en la Tabla 23. El tiempo de localización de la falta es todo el tiempo que transcurre desde que ocurre la falta hasta que el tramo con falta es identificado. Esto quiere decir que se puede calcular como la suma de tiempos ya presentados anteriormente como tiempo de alerta, tiempo de operación, tiempo de desplazamiento etc. El tiempo de reposición es el tiempo que transcurre desde que se localiza el tramo con falta hasta que se despeja la falta y se restaura el suministro.

Tabla 23 Tiempos de falta asociados a cada clase de zona

Zona	Tiempo de falta
Sub fase 1	<3 minutos
DG fase 1	<3 minutos
Sub fase 2	Tiempo de localización de falta
DG fase 2	Tiempo de localización de falta
Sin suministro	Tiempo de localización de falta + tiempo de reposición

El cálculo del SAIDI según el nuevo modelo se puede realizar mediante la siguiente fórmula:

$$SAIDI = \frac{\sum_{k=1}^n [(N_{Sub2} + N_{DG2} + N_{sin suministro}) \times t_{localización} + N_{sin suministro} \times t_{reposición}]}{N_{total}}$$

Donde:

$N_{Sub2}$ : Número de clientes pertenecientes a la zona sub fase 2

$N_{DG2}$ : Número de clientes pertenecientes a la zona DG fase 2

$N_{sin suministro}$ : Número de clientes pertenecientes a la zona sin suministro

$N_{total}$ : Número total de clientes en la red

n: Número total de tramos

$t_{localización}$ : Tiempo de localización

$t_{reposición}$ : Tiempo de reposición

Nótese que los clientes que pertenecen a la zona sub-fase 1 o a la zona DG fase 1 no aparecen en el cálculo del SAIDI porque, como ya se comentó en 4.2, las interrupciones de menos de tres minutos no se tienen en cuenta a la hora de calcular el SAIDI según la normativa española.

En cuanto al índice SAIFI, el método de cálculo es el mismo que el que se ha usado para los casos de redes convencionales.

#### 4.5.1 Cálculo del tiempo de localización

El tiempo de localización es distinto para la falta en cada tramo y depende de los movimientos de las brigadas. Cuando la red no contiene interruptores teledandados el plan de brigadas es único para toda la red, sin embargo, cuando hay interruptores teledandados se pueden definir planes de brigada distintos para cada zona acotada posible. Es decir, como se ha visto en 4.2 la operación de los interruptores teledandados acota la zona de falta reduciendo la red en la que debe operar la brigada de mantenimiento, por tanto, un plan de brigadas hecho para la totalidad de la red no aplica. En este caso entonces se utiliza un plan de brigadas distinto para cada subred. Las subredes son los conjuntos de red contenidos entre dos interruptores teledandados, sin contener ningún interruptor teledandado. Por ejemplo, para el caso de la Figura 32, se distinguen tres subredes: A, B y C marcadas en azul, rojo y verde respectivamente. Los confines de las subredes son los interruptores teledandados. En este caso es necesario tener tres planes de brigadas.

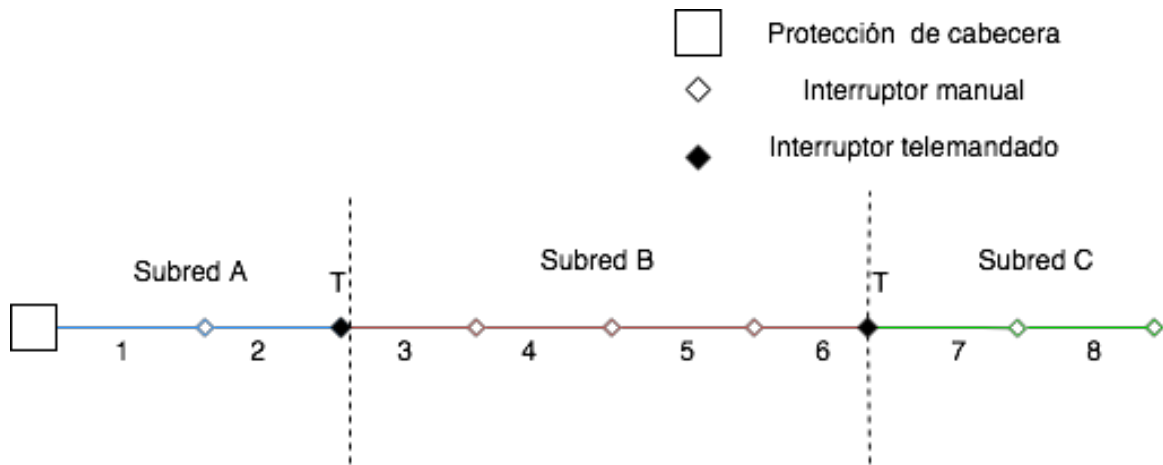


Figura 32 Ejemplo de división de subredes en red con interruptores telemandados

#### 4.6 Planificación de brigadas en redes con instalaciones de generación distribuida

La planificación de brigadas en redes con interruptores telemandados e instalaciones de generación distribuida se realiza de la misma forma que en el caso de redes convencionales. La única diferencia es que en redes con interruptores telemandados no existe un árbol único para toda la red, ya que los interruptores telemandados acotan siempre una zona de búsqueda antes de que sea necesario utilizar las brigadas. Por lo tanto, una red tendrá tantos árboles de decisiones como subredes. En la Figura 32 se muestra un ejemplo de la división de una red con interruptores telemandados en subredes. Para esa red existen tres árboles de decisiones distintos. Las brigadas deben utilizar el árbol correspondiente a la subred dónde se encuentran. El cálculo de los árboles de decisiones de cada subred es idéntico al realizado en la primera parte de este estudio. Es decir, se utilizará el generador de árboles.

## 5 Casos de estudio de redes con generación distribuida

En este capítulo se presentan los casos de estudio para el cálculo de los índices de continuidad del suministro, por un lado, y para la planificación de brigadas por el otro.

### 5.1 Cálculo de los índices de continuidad del suministro

#### 5.1.1 Línea recta de 9 tramos con interruptores teledirigidos y unidad DG

La Figura 33 muestra un esquema de la línea de nueve interruptores con la que se trabaja en este caso de estudio. La línea contiene dos interruptores teledirigidos entre 2-3 y 6-7. Además, existe una unidad DG que se puede conectar al tramo 9. Cada tramo tiene una longitud de 1 Km.

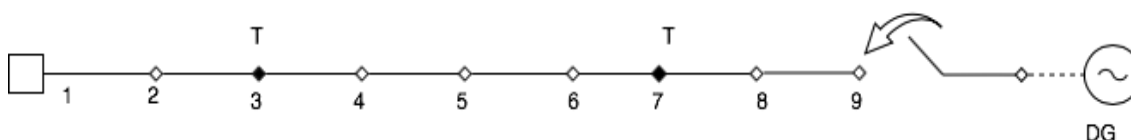


Figura 33 Red ejemplo de 9 interruptores con unidad DG

A continuación, se presentan los datos necesarios para calcular el SAIDI. Los datos de la línea se definen a continuación en la Tabla 24. Las tasas de fallos de los tramos se han fijado de acuerdo a [35], que especifica un valor de tasa de fallos para una línea eléctrica de 6 fallos/100 Km-año. Aunque en [29] se utiliza un valor para la tasa de fallos de 2 fallos/Km-año, puesto que la tasa de fallos de una línea depende de varios factores, como por ejemplo si es aérea o soterrada.

Tabla 24 Datos de la línea de nueve tramos

Tramo	Número de clientes	Tasa de fallos (fallos/año)
1-2	200	0,06
2-3	250	0,06
3-4	250	0,06
4-5	150	0,06
5-6	200	0,06
6-7	300	0,06
7-8	100	0,06
8-9	250	0,06

Los valores de los parámetros de tiempos se indican en la Tabla 25.

Tabla 25 Valores de los parámetros de tiempos para los casos de estudio

Parámetro	Valor
$t_{alerta}$	10 minutos
$Vel_{brigada}$	1 Km/minuto
$t_{operación}$	5 minutos
$t_{reposición}$	100 minutos

Los planes de brigadas para cada subred aparecen en la Tabla 26 en formato compacto.

Tabla 26 Planes de brigadas línea 9 tramos

Subred	Árbol de decisiones del plan de brigadas
A	[2 1 3]
B	[5 4 6 3 0 0 7]
C	[8 7 9]

En este ejemplo se considera que los únicos clientes que se pueden conectar a la unidad DG, por motivos contractuales, son los clientes en los tramos 7-8 y 8-9. La matriz de interacción de la unidad DG es la siguiente:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 1 & 0 \\ 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0.2 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Finalmente, se presentan los resultados intermedios del cálculo del SAIDI. En la Tabla 27 se muestran los clientes afectados por la falta pertenecientes a cada zona, para la falta en cada tramo. Es decir, en la columna N sub 2 se muestra el número de clientes afectados por la falta que se reconectan a la subestación principal inmediatamente después de la acción de las brigadas, para la falta en cada tramo. De igual forma, la columna N DG 2 indica el número de clientes que se reconectan a la unidad DG después de la acción de las brigadas, y la columna N sin suministro indica el número de clientes que debe esperar a que se despeje la falta para recobrar el suministro.

Tabla 27 Desglose número de clientes por falta en cada tramo

Tramo	$N_{sub\ 2}$	$N_{DG\ 2}$	$N_{sin\ suministro}$
1-2	0	0	1.450
2-3	200	0	1.250
3-4	0	0	1.000
4-5	250	0	750
5-6	400	0	600
6-7	600	0	400
7-8	0	250	100
8-9	100	0	250

En la Tabla 28 se muestran los tiempos de localización para la falta en cada tramo.

Tabla 28 Tiempo de localización para la falta en cada tramo

Tramo	Tiempo de localización (min)
1-2	17
2-3	17
3-4	26
4-5	20
5-6	20
6-7	26
7-8	23
8-9	23

En la Tabla 29 se muestra el desglose del cálculo del SAIDI según la falta en cada zona. El primer término es el resultado de  $(N_{sub2} + N_{DG2} + N_{sin\ suministro}) \times t_{localización}$ , el segundo término es el resultado de  $N_{sin\ suministro} \times t_{reposición}$  y la aportación al SAIDI es la suma de los dos términos anteriores.

Tabla 29 Desglose del cálculo del SAIDI

Tramo	Primer término (min*cliente)	Segundo término (min*cliente)	Aportación al SAIDI (min*cliente)
1-2	24.650	145.000	169.650
2-3	24.650	125.000	149.650
3-4	26.000	100.000	126.000
4-5	20.000	75.000	95.000
5-6	20.000	60.000	80.000
6-7	26.000	40.000	66.000
7-8	8.050	15.000	23.050
8-9	8.050	25.000	33.050
		<i>Total</i>	<i>742.400</i>

Finalmente, el SAIDI se calcula dividiendo el total de las aportaciones entre el número total de clientes:

$$SAIDI = 742.400 / 1700 = 436,70 \text{ min}$$

En comparación con la red de nueve tramos sin interruptores telemandados ni unidades DG vista en el caso de estudio de 3.1.1, el SAIDI ha disminuido considerablemente de 719,57 minutos a 436,70 minutos.

Mientras, para el cálculo del SAIFI se muestran los datos desglosados para cada tramo en la Tabla 30.

Tabla 30 Desglose del cálculo del SAIFI

Falta	Tasa de fallos (fallos/año)	Clientes afectados	Aportación al SAIFI (interrupción*cliente)
1-2	0,06	1.450	87,0
2-3	0,06	1.250	75,0
3-4	0,06	1.000	60,0
4-5	0,06	750	45,0
5-6	0,06	600	36,0
6-7	0,06	400	24,0
7-8	0,06	150	9,0
8-9	0,06	250	15,0
		<i>Total</i>	<i>351,0</i>

Finalmente, el SAIFI se calcula dividiendo el total de las aportaciones entre el número total de clientes:

$$SAIFI = \frac{351}{1700} = 0,206 \text{ interrupciones}$$

### 5.1.2 Línea de 14 tramos con interruptor telemandado y unidad DG

La Figura 34 muestra un esquema de la línea de catorce interruptores con la que se trabaja en este caso de estudio. La línea contiene un interruptor telemandado en el tramo '5' que conecta el inicio de la línea con las derivaciones. Además, existe una unidad DG que se puede conectar al tramo 9. Cada tramo tiene una longitud de 1 Km.

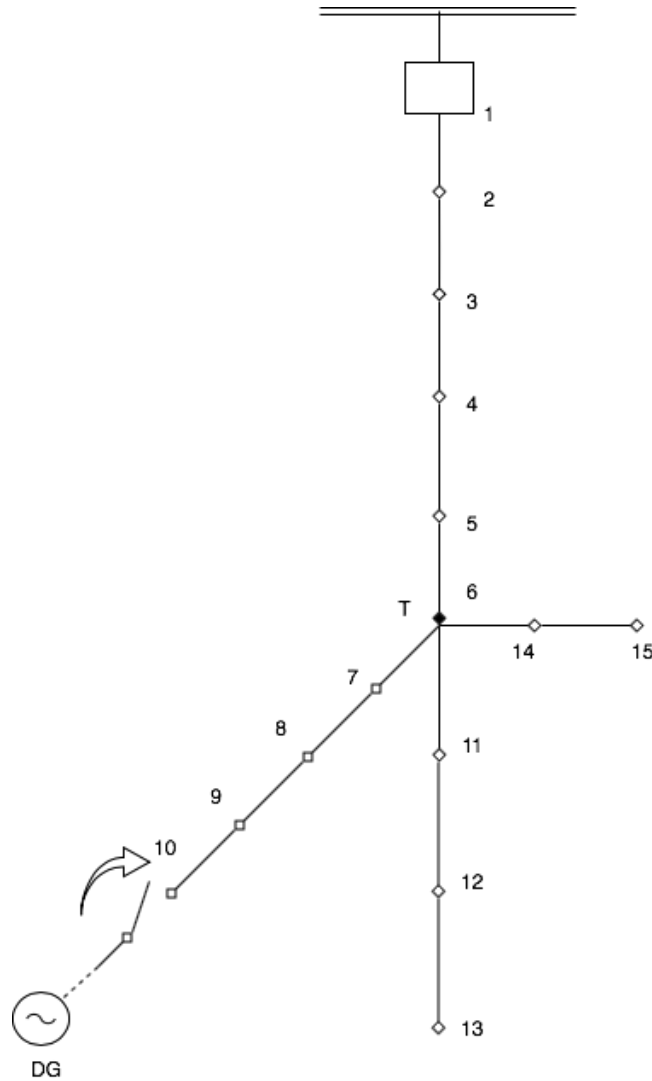


Figura 34 Línea de catorce tramos con interruptor telemandado y unidad DG

A continuación, se presentan los datos necesarios para calcular el SAIDI. Los datos de la línea se definen a continuación en la Tabla 31.

Tabla 31 Datos de la línea de catorce tramos

Tramo	Número de clientes	Tasa de fallos (fallos/año)
1-2	200	0,06
2-3	250	0,06
3-4	250	0,06
4-5	150	0,06
5-6	200	0,06
6-7	300	0,06
7-8	100	0,06
8-9	250	0,06
9-10	250	0,06
6-11	150	0,06
11-12	100	0,06
12-13	200	0,06
6-14	200	0,06
14-15	250	0,06

Los valores de los parámetros de tiempos se indican en la Tabla 32.

Tabla 32 Valores de los parámetros de tiempos para los casos de estudio

Parámetro	Valor
$t_{alerta}$	10 minutos
$Vel_{brigada}$	1 Km/minuto
$t_{operación}$	5 minutos
$t_{reposición}$	100 minutos

Los planes de brigadas para cada subred aparecen en la Tabla 33 en formato compacto..

Tabla 33 Planes de brigadas línea 14 tramos

Subred	Árbol de decisiones del plan de brigadas
A	[4 3 5 2 0 0 6 1 0 0 0 0 0 0]
B	[8 7 9 6 0 0 10]
C	[11 6 12 0 0 0 13]
D	[14 6 15]

En este ejemplo se considera que los únicos clientes que se pueden conectar a la unidad DG, por motivos contractuales, son los clientes en los tramos 7-8, 8-9 y 9-10. La matriz de interacción de la unidad DG es la siguiente:

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0.1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Finalmente, se presentan los resultados intermedios del cálculo del SAIDI. En la Tabla 34 se muestran los clientes afectados pertenecientes a cada zona para la falta en cada tramo.

Tabla 34 Desglose número de clientes por falta en cada tramo

Tramo	N sub 2	N DG 2	N sin suministro
1-2	0	0	2.310
2-3	200	0	2.110
3-4	450	0	1.860
4-5	700	0	1.610
5-6	850	0	1.460
6-7	0	540	360
7-8	300	500	100
8-9	400	250	250
9-10	650	0	250
6-11	0	0	450
11-12	150	0	300
12-13	250	0	200
6-14	0	0	450
14-15	200	0	250

En la Tabla 35 se muestran los tiempos de localización para la falta en cada tramo.

Tabla 35 Tiempo de localización para la falta en cada tramo

Tramo	Tiempo de localización (min)
1-2	31
2-3	25
3-4	19
4-5	19
5-6	25
6-7	29
7-8	23
8-9	23
9-10	29
6-11	22
11-12	22
12-13	28
6-14	22
14-15	22

En la Tabla 36 se muestra el desglose del cálculo del SAIDI según la falta en cada zona. El primer término es el resultado de  $(N_{sub2} + N_{DG2} + N_{sin suministro}) \times t_{localización}$ , el segundo término es el resultado de  $N_{sin suministro} \times t_{reposición}$  y la aportación al SAIDI es la suma de los dos términos anteriores.

Tabla 36 Desglose del cálculo del SAIDI

Tramo	Primer término (min*cliente)	Segundo término (min*cliente)	Aportación al SAIDI (min*cliente)
1-2	71.610	231.000	302.610
2-3	57.750	211.000	268.750
3-4	43.890	186.000	229.890
4-5	43.890	161.000	204.890
5-6	57.750	146.000	203.750
6-7	26.100	36.000	62.100
7-8	20.700	10.000	30.700
8-9	20.700	25.000	45.700
9-10	26.100	25.000	51.100
10-11	9.900	45.000	54.900
11-12	9.900	30.000	39.900
12-13	12.600	20.000	32.600
6-14	9.900	45.000	54.900
14-15	9.900	25.000	34.900
		<i>Total</i>	1.616.690

Finalmente, el SAIDI se calcula dividiendo el total de las aportaciones entre el número total de clientes:

$$SAIDI = 1.616.690 / 2850 = 567,3 \text{ min}$$

Mientras, para el cálculo del SAIFI se muestran los datos desglosados para cada tramo en la Tabla 37. El SAIFI de la red equivalente sin interruptores telemandados ni instalaciones DG es de 986,87 min. Es decir, mucho más elevado que en la red de este caso de estudio.

Tabla 37 Desglose del cálculo del SAIFI

Falta	Tasa de fallos (fallos/año)	Clientes afectados	Aportación al SAIFI (interrupción*cliente)
1-2	0,06	2.310	138,6
2-3	0,06	2.110	126,6
3-4	0,06	1.860	111,6
4-5	0,06	1.610	96,6
5-6	0,06	1.460	87,6
6-7	0,06	360	21,6
7-8	0,06	150	9
8-9	0,06	250	15
9-10	0,06	250	15
10-11	0,06	450	27
11-12	0,06	300	18
12-13	0,06	200	12
6-14	0,06	450	27
14-15	0,06	250	15
<i>Total</i>			<i>721,3</i>

Finalmente, el SAIFI se calcula dividiendo el total de las aportaciones entre el número total de clientes:

$$SAIFI = 721,3 / 2850 = 0,25 \text{ interrupciones}$$

### 5.1.3 Conclusiones

El cálculo de los índices de continuidad del suministro en redes con instalaciones DG se realiza de manera diversa respecto a las redes convencionales. Se trata de un cálculo más complejo donde hay que tener en cuenta el efecto de los interruptores telemandados y de las instalaciones DG. Son necesarios más datos de partida, ya que se requiere saber la matriz de interacción de cada unidad DG presente en la red, así como un plan de brigadas distinto para cada subred y la diferenciación del tipo de cada interruptor (manual o telemandado). Finalmente, el cálculo se ha llevado a cabo siguiendo la metodología expuesta en 4. Se comprueba además que, para las redes convencionales equivalentes, los casos de estudio en

3.1.1 y 3.1.2, los índices SAIDI son mayores. Esto es lógico ya que los interruptores telemandados y la instalación DG permiten recuperar el suministro mucho antes en todas las partes de la red.

## 5.2 Optimización planificación de brigadas en redes con generación distribuida

En este apartado se incluyen dos casos de estudio de optimización de planificación de brigadas en redes con generación distribuida. Para cada caso de estudio se identifican las subredes delimitadas por los interruptores telemandados y para cada una de ellas se calcula el árbol de decisiones correspondiente al SAIDI mínimo.

### 5.2.1 Línea recta de 9 tramos con interruptores telemandados y unidad DG

La Figura 35 muestra un esquema de la línea de nueve interruptores con la que se trabaja en este caso de estudio. La línea contiene dos interruptores telemandados entre 2-3 y 6-7. Además, existe una unidad DG que se puede conectar al tramo 9. Cada tramo tiene una longitud de 1 Km.

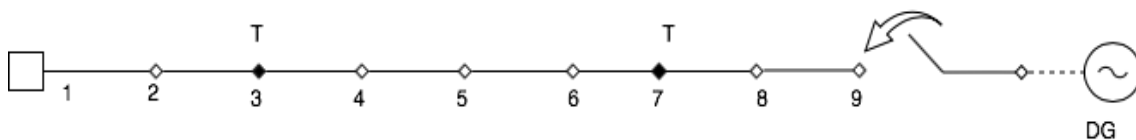


Figura 35 Red ejemplo de 9 interruptores con unidad DG

Tabla 38 Datos de la línea de nueve tramos

Tramo	Número de clientes	Tasa de fallos (fallos/año)
1-2	200	0,06
2-3	250	0,06
3-4	250	0,06
4-5	150	0,06
5-6	200	0,06
6-7	300	0,06
7-8	100	0,06
8-9	250	0,06

Los valores de los parámetros de tiempos se indican en la Tabla 38.

Tabla 39 Valores de los parámetros de tiempos para los casos de estudio

Parámetro	Valor
$t_{alerta}$	10 minutos
$Vel_{brigada}$	1 km/minuto
$t_{operación}$	5 minutos
$t_{reposición}$	100 minutos

Los planes de brigadas para cada subred aparecen en la Tabla 39.

Para la planificación de brigadas de la red con interruptores telemandados se divide la red en subzonas delimitadas por los interruptores telemandados. En este caso existen tres subzonas que se describen en la Tabla 40.

Tabla 40 Subredes de la red principal

Subred	Tramos
A	[1, 2]
B	[3, 4, 5, 6]
C	[7, 8]

Para cada subred se realiza una optimización del plan de brigadas usando el generador de árboles de decisiones. La metodología usada para cada subred es idéntica a la que se ha usado en la resolución del problema en redes convencionales. Los resultados se muestran en la Tabla 41. Cada subred tiene un SAIDI asociado a la operación de brigadas en esa zona, que ha sido minimizado por el generador de árboles.

Tabla 41 Resultados planificación de brigadas en subredes

Subred	Árbol de decisiones	SAIDI (min)
A	[2 1 3]	205,42
B	[5 4 6 3 0 0 7]	355,42
C	[8 7 9]	205,42

### 5.2.2 Línea de 14 tramos con interruptor telemandado y unidad DG

La Figura 34 muestra un esquema de la línea de catorce interruptores con la que se trabaja en este caso de estudio. La línea contiene un interruptor telemandado al final del tramo '5' que conecta el inicio de la línea con las derivaciones. Además, existe una unidad DG que se puede conectar al tramo '9'. Cada tramo tiene una longitud de 1 Km.

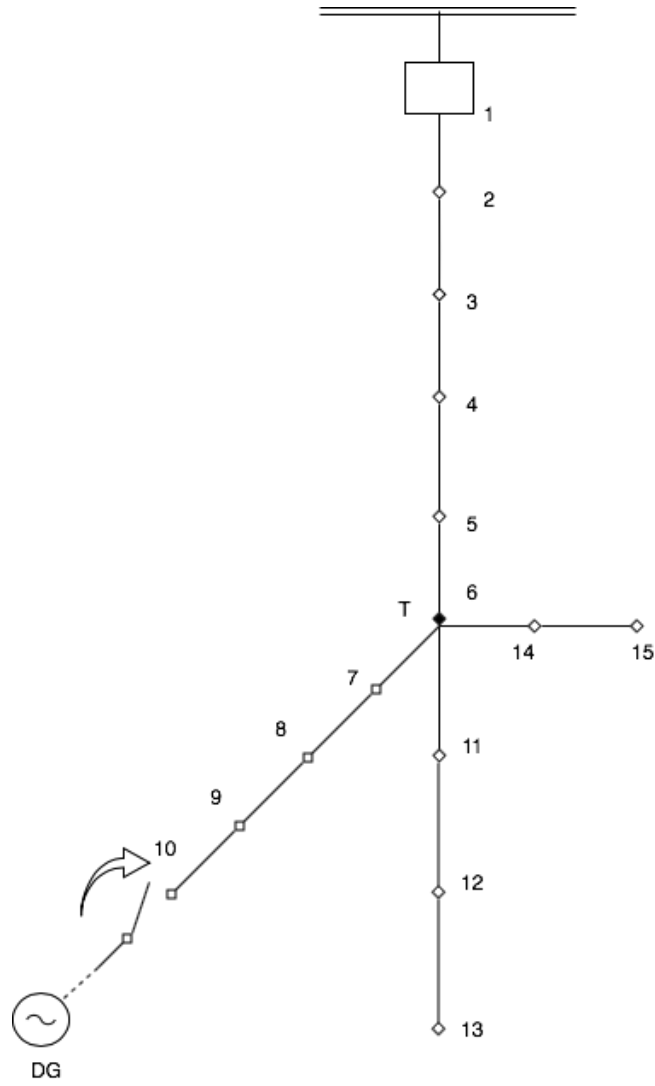


Figura 36 Línea de catorce tramos con interruptor telemandado y unidad DG

A continuación, se presentan los datos necesarios para calcular el SAIDI. Los datos de la línea se definen a continuación en la Tabla 42.

Tabla 42 Datos de la línea de catorce tramos

Tramo	Número de clientes	Tasa de fallos (fallos/año)
1-2	200	0,06
2-3	250	0,06
3-4	250	0,06
4-5	150	0,06
5-6	200	0,06
6-7	300	0,06
7-8	100	0,06
8-9	250	0,06
9-10	250	0,06
6-11	150	0,06
11-12	100	0,06
12-13	200	0,06
6-14	200	0,06
14-15	250	0,06

Los valores de los parámetros de tiempos se indican en la Tabla 43.

Tabla 43 Valores de los parámetros de tiempos para los casos de estudio

Parámetro	Valor
$t_{alerta}$	10 minutos
$Vel_{brigada}$	1 km/minuto
$t_{operación}$	5 minutos
$t_{reposición}$	100 minutos

Para la planificación de brigadas de la red con interruptores telemandados se divide la red en subzonas delimitadas por los interruptores telemandados. En este caso existen tres subzonas que se describen en la Tabla 44.

Tabla 44 Subredes de la red principal

Subred	Tramos
A	[1, 2, 3, 4, 5]
B	[6, 7, 8, 9]
C	[10, 11, 12]
D	[13, 14]

Para cada subred se realiza una optimización del plan de brigadas usando el generador de árboles de decisiones. La metodología usada para cada subred es idéntica a la que se ha usado en la resolución del problema en redes convencionales. Los resultados se muestran en la Tabla 45. Cada subred tiene un SAIDI asociado a la operación de brigadas en esa zona, que ha sido minimizado por el generador de árboles.

Tabla 45 Resultados planificación de brigadas en subredes

Subred	Árbol de decisiones	SAIDI (min)
A	[3 2 4 1 0 0 5 0 0 0 0 0 0 0 6]	451,04
B	[8 7 9 6 0 0 10]	349,00
C	[11 6 12 0 0 0 12]	295,46
D	[14 6 15]	203,23

## 6 Conclusiones

En este último capítulo se encuentran las conclusiones del trabajo respecto a la metodología empleada y los resultados obtenidos. Además, se incluyen algunas recomendaciones para líneas futuras de investigación relacionadas con los temas tratados en este estudio.

### 6.1 Conclusiones sobre la metodología

En primer lugar, el cálculo de los índices de continuidad del suministro para redes convencionales se ha llevado a cabo según el método de cálculo analítico establecido. Se ha creado un programa que a partir de la definición de una red y de una planificación de brigadas establecida simula la falta en cada tramo y calcula el SAIDI y el SAIFI final de la red. El método determinista resulta sencillo y con poca carga computacional de forma que se puede aplicar a cualquier red sin necesidad de recopilar gran cantidad de datos. Basta con introducir en el modelo la topología de red.

Para las redes con instalaciones de generación distribuida integradas se ha modificado la metodología de cálculo clasificando los tramos de la red según la forma en la que se restablece el servicio. Esta metodología resulta efectiva y relativamente sencilla de implementar, aunque requiere calcular previamente la matriz de interacción. Dicha matriz indica el porcentaje de la energía demandada en cada zona que puede suministrar una instalación DG en caso de falta. La calidad de los resultados depende de la precisión de la matriz de interacción.

En cuanto a la planificación de brigadas dos metodologías distintas han sido implementadas y comparadas. Por un lado, se desarrolló un código en Matlab utilizando algoritmos genéticos. Por otro, se programó un generador de árboles de decisiones aleatorios. En la comparación de ambos métodos sobre los casos de estudio de redes convencionales, se observa que el método del generador de árboles aleatorios tiene un mejor desempeño que el AG. En los casos de estudio se pudo comprobar que a medida que aumenta el tamaño de la red, el AG tiene más dificultades para encontrar una solución. Esto se refleja también en los tiempos de computación, que son en todos los casos mucho más elevados para el AG que para el generador, especialmente con tamaños mayores de red. Mientras que el generador de árboles aleatorios siempre encuentra buenas soluciones independientemente del tamaño de la red.

El principal problema del AG es que es una herramienta que funciona observando tendencias. El AG funciona bien cuando trabaja en un espacio continuo, en el que cada individuo de la población tiene una puntuación finita, y cada pequeña modificación en el gen del individuo resulta en una mejora o desmejora cuantificable y evaluable por el AG. El problema de la planificación de brigadas, sin embargo, es un espacio discreto. Cambiar un solo gen de la cadena cambia el significado entero del árbol e incluso lo puede hacer no válido. Los saltos discontinuos en el resultado impiden al AG converger.

El generador de árboles aleatorios, que se puede considerar un método ad hoc al problema, consigue resultados bastante buenos en mucho menos tiempo de ejecución y asegura que los resultados sean siempre válidos a la vez que garantiza la precisión a la hora de localizar el tramo con falta. Por tanto, se considera que el generador de árboles es una metodología más adecuada para resolver la planificación de brigadas que los algoritmos genéticos.

## 6.2 Conclusiones sobre los resultados

El SAIDI en redes convencionales depende de la planificación de brigadas, de los parámetros de tiempo y de la topología de la red. En redes más largas el SAIDI tiende a ser mayor ya que hay mayor número de posibilidades de que ocurran más faltas y se tarda más en localizar cada una de ellas. En el análisis de sensibilidad a los parámetros de tiempo realizado en 3.5, se observa que los parámetros de tiempo tienen relaciones similares a una exponencial con el SAIDI. Finalmente, la planificación de brigadas para una de red y unos parámetros de tiempo dados es determinante en el valor del SAIDI. El SAIFI por su parte no depende de la planificación de brigadas ni de los parámetros de tiempo, sólo de la topología de la red y de la tasa de fallos de cada tramo. Tasas de fallos elevadas en tramos con muchos clientes aumentan el valor del SAIFI considerablemente. En cuanto a las redes con interruptores telemandados y con instalaciones de generación distribuida el SAIDI es mucho menor. Para redes con la misma topología el SAIDI se ve reducido gracias a que los interruptores telemandados permiten restablecer parte del suministro en menos de 3 minutos operando de forma casi instantánea, a la vez que acotan la zona dónde operan las brigadas. Por su parte, las instalaciones de generación distribuida permiten restablecer el suministro en zonas dónde no se puede hacer a través de la subestación principal. El índice SAIFI no se ve afectado por la presencia de los interruptores telemandados y de las instalaciones de generación distribuida, en cuanto a que la metodología de cálculo no cambia. Sin embargo, estos elementos pueden afectar a la tasa de fallos de la red, y en ese caso sí tendrían un efecto sobre el SAIFI. El efecto de dichos elementos en la tasa de fallos de la red no entra dentro del alcance de este estudio.

La optimización del plan de brigadas mediante el generador de árboles aleatorios resulta en árboles de decisiones con valores del índice SAIDI bajos, pero no necesariamente el valor mínimo. La probabilidad de encontrar el valor mínimo del SAIDI aumenta al incrementarse el número de generaciones. Sin embargo, no es posible encontrar un número de generaciones a partir del cual la probabilidad de encontrar el SAIDI mínimo sea 1. Todos los planes de brigadas que se obtienen con el generador de árboles son válidos y se pueden implementar. Para las redes con interruptores telemandados se determinan tantos planes de brigadas como subredes existan dentro de la red, por lo demás los resultados son idénticos.

## 6.3 Recomendaciones para futuros estudios

El programa de cálculo del SAIDI permite analizar la contribución de cada parámetro de tiempo al SAIDI total de la red. Un tema de interés para futuros estudios es el análisis técnico-económico sobre la posibilidad de reducir los parámetros de tiempos. Es decir, identificar

métodos que reduzcan los parámetros de tiempo y comparar el coste económico con los beneficios derivados de la reducción del SAIDI, con el objetivo de calcular la inversión óptima. Lo mismo puede realizarse para el SAIFI.

En relación con la metodología para la planificación de brigadas, se sugiere un replanteamiento del algoritmo genético ya que es prometedor, pero la formulación de este estudio no es la adecuada. También, se propone desarrollar el método del generador de árboles aleatorios para redes malladas que puedan estar alimentadas desde varias subestaciones distintas y que a la vez incluyan microrredes internas. Otra propuesta para estudios futuros es el estudio económico de los beneficios de la generación distribuida sobre la continuidad del suministro.



## 7 Bibliografía

- [1] U.S. DOE MEG, «Microgrids at Berkeley Lab,» [En línea]. Available: <https://building-microgrid.lbl.gov/microgrid-definitions>. [Último acceso: 19 Noviembre 2019].
- [2] Schneider electric, «Schneider electric,» [En línea]. Available: <https://www.se.com/cr/es/work/solutions/microgrid-solutions/microgrid-benefits/why-microgrids/>. [Último acceso: 19 Noviembre 2019].
- [3] S. Savkovic Colakovic, Simulador de inversiones en redes de distribución de MT para la mejora del TIEPI, Madrid: Universidad Carlos III de Madrid Escuela Politécnica Superior, 2009.
- [4] N. R. Godha, S. R. Deshmukh y R. V. Dagade, «Application of Monte Carlo simulations for reliability cost/worth analysis of distribution systems,» de *4th International Conference on Power and Energy Systems (ICPS)*, IIT Madras, Chennai, India, December 2011.
- [5] R. Ashok Bakkiyaraj y N. Kumarappan, «Evaluation of Composite Reliability Indices Based on Non- Sequential Monte Carlo Simulation and Particle Swarm Optimization,» de *IEEE Congress on Evolutionary Computation*, Barcelona, Spain, 2010.
- [6] A. M. Leite da Silva, L. Chaves de Resende, L. A. d. Fonseca Manso y V. Miranda, «Composite Reliability Assessment Based on Monte Carlo Simulation and Artificial Neural Networks,» *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 22, nº 3, 2007.
- [7] R. Bersano, R. Tarife y M. Pacis, «Modified Optimal Reliability Indices Calculation for Radial Distribution System,» *2018 IEEE 10th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment and Management (HNICEM)*.
- [8] T. A.E.D.C. y C. I.B.N.C., «A Binary Formulation of SAIDI for the Predictive Reliability Assessment of Radial Distribution Systems with Tie-lines,» *Power System Simulation Laboratory. Electrical and Electronics Engineering Institute, University of the Philippines – Diliman*, vol. IEEE, nº 978-1-4799-2522-3/13, 2013.
- [9] R. Benabid, D. Merrouche, A. Bourenane y R. Alzbutas, «Reliability Assessment of Redundant Electrical Power Supply Systems using Fault Tree Analysis, Reliability Block Diagram, and Monte Carlo Simulation Methods,» *IEEE CISTEM*, nº 978-1-5386-4988-6/18, 2018.
- [10] C.-F. Chien, S.-L. Chen y Y.-S. Lin, «Using Bayesian network for fault location on distribution feeder,» *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 17, nº 13, 2002.
- [11] W. Li, P. Wang, Z. Li y Y. Liu, «Reliability Evaluation of Complex Radial Distribution Systems Considering Restoration Sequence and Network Constraints,» *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 19, nº 2, 2004.
- [12] Z. Galias, «Tree-structures based deterministic algorithms for optimal switch placement in radial distribution networks,» *IEEE Trans. Power Syst.*, vol. 34, nº 6, 2019.
- [13] A. Rodriguez-Calvo, P. Frías, J. Reneses, R. Cossent y C. Mateo, «Optimal investment in smart MV/LV substations to improve continuity of supply,» *Elsevier. Electrical Power and Energy Systems*, nº 62, pp. 410-418, 2014.

- [14] P. Barker y R. De Mello, «Determining the Impact of Distributed Generation on Power Systems: Part 1 - Radial Distribution Systems,» de *2000 Power Engineering Society Summer Meeting*, Seattle, 2000.
- [15] R. E. Brown, *Electric Power Reliability Distribution*, Raleigh, North Carolina: ABB Inc., 2005.
- [16] C. Wu, J. Liub y Y. Wuc, «The Impacts of Micro-grid on the Reliability of Distribution System,» de *2014 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*, Yichang, China, 2014.
- [17] P. M. Costa y M. A. Matos, «Assessing the contribution of microgrids to the reliability of distribution networks,» *Elsevier. Electric Power Systems Research*, nº 79, p. 382–389, 2008.
- [18] Y. Sun, M. Bollen y G. Ault, «Probabilistic Reliability Evaluation for Distribution Systems with DER and Microgrids,» de *9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Estocolmo, 2006.
- [19] E. Carpaneto, G. Chicco y A. Prunotto, «Reliability of reconfigurable distribution systems including distributed generation,» de *9th International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, Estocolmo, 2006.
- [20] A. A. Chowdhury, S. K. Agarwal y D. O. Koval, «Reliability Modeling of Distributed Generation in Conventional Distribution Systems Planning and Analysis,» *IEEE Trans. Industry Apps*, vol. 39, nº 5, 2003.
- [21] T. Ackermann, G. Andersson y S. Söder, «Distributed generation: a definition,» *Electric Power Systems Research* 57 (2001) 195 – 204.
- [22] P. Paliwa, N. Patidar y R. Nema, «Planning of grid integrated distributed generators: A review of technology, objectives and techniques,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 40 (2014) 557–570.
- [23] J. Hernández y A. Medina, «Conexión de sistemas fotovoltaicos a la red eléctrica: calidad del suministro,» *Revista de estudios sobre sierra Mágica*, Vols. %1 de %2SUMUNTÁN No 23 (2006); P. 33-44.
- [24] C. Paida y E. Inga, «State of Art, Reliability in Electrical Distribution Systems based on Markov Stochastic Model,» *IEEE LATIN AMERICA TRANSACTIONS*, VOL. 14, NO. 2, FEB. 2016.
- [25] Z. Bie, P. Zhang, G. Li, B. Hua, M. Meehan y X. Wand, «Reliability Evaluation of Active Distribution Systems Including Microgrids,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER SYSTEMS*, VOL. 27, NO. 4, NOVEMBER 2012.
- [26] H. Li, L. Wang, Y. Xiang, J. Tan, R. Xiao, K. Xie y Y. Xia, «Reliability Evaluation of Active Distribution Systems Considering Energy Storage and Real-Time Electricity Pricing,» *IEEE International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems*, 2016, 978-1-5090-1970-0/16.
- [27] S. Borlase, *Smart Grids.*, Boca Raton: CRC Press <https://doi.org/10.1201/9781351228480>, (Ed.) (2018).
- [28] Z. Cai, X. Cui, X. Su, Q. Mi, L. Guo y Z. Ding, «A novel vector-based dynamic path planning method in urban road network,» *IEEE Access*, 8, 9046-9060. [doi:10.1109/ACCESS.2019.2962392](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2962392), 2020.

- [29] R. Allan y R. Billinton, *Reliability Evaluation of Power Systems*, Springer US, 1996 doi:10.1007/978-1-4899-1860-4.
- [30] J. M. Ponce-Ortega y L. G. Hernández-Pérez, *Optimization of process flowsheets through metaheuristic techniques*, Springer, 2019.
- [31] A. Moujahid, I. Inza y P. Larrañaga, *Algoritmos Genéticos*, San Sebastián: Departamento de Ciencias de la Computación e Inteligencia Artificial Universidad del País Vasco–Euskal Herriko Unibertsitatea.
- [32] A. Rodríguez-Calvo, P. Frías, J. Reneses, R. Cossent y C. Mateo, «Optimal investment in smart MV/LV substations to improve continuity of supply,» *Elsevier Electrical Power and Energy Systems*, vol. 62 , p. 410–418, 2014.
- [33] F. Postigo, C. Mateo, T. Gómez y R. Cossent, «Location and sizing of micro-grids to improve continuity of supply in radial distribution networks. Working paper, IIT,» Abril 2020.
- [34] W. Li, P. Wang, Z. Li y Y. Liu, «Reliability Evaluation of Complex Radial Distribution Systems Considering Restoration Sequence and Network Constraints,» *IEEE TRANSACTIONS ON POWER DELIVERY*, VOL. 19, NO. 2, APRIL 2004.
- [35] G. Kjolle y K. Sand, «RELRAD-an analytical approach for distribution system reliability assessment,» *IEEE Trans. Power Deliv.*, vol. 7, nº 2, p. 809–814, Abril 1992, doi: 10.1109/61.127084..
- [36] R. Kempener, O. Lavagne d’Ortigue, D. Saygin, J. rey Skeer, S. Vinci y D. Gielen, «Off-grid renewable energy systems: Status and methodological issues,» IRENA, 2015.



## Anexo I: Objetivos de desarrollo sostenible (SDGs)

Los objetivos de desarrollo sostenible son una recopilación de 17 objetivos globales diseñados como plan de acción para un futuro mejor y más sostenible para todos. Comprenden tres dimensiones fundamentales: economía, sociedad y biosfera. Este estudio está orientado a la mejora de la calidad del suministro de la red mediante la optimización del proceso de localización de faltas en la red eléctrica. Concretamente, se busca reducir el tiempo de falta mediante una optimización de la planificación de brigadas de mantenimiento que acorte el tiempo de localización de las faltas. Un suministro eléctrico de calidad es fundamental para el desarrollo de un país, pues sienta las bases para desarrollar el tejido industrial. Por tanto, el principal SDG al que contribuye este trabajo es el noveno objetivo: innovación industrial e infraestructura. Asimismo, de forma secundaria, también afecta a los objetivos octavo y undécimo: trabajo decente y crecimiento económico y ciudades y comunidades sostenibles. Por un lado, la presencia de la industria se traduce en empleo de calidad y crecimiento económico. Por otro lado, la mejora de las técnicas de mantenimiento de la red facilita la integración de la generación distribuida en la misma.

Para desarrollar y mantener un tejido industrial fuerte, en un país, es necesario disponer de una red eléctrica robusta. Muchos sectores industriales dependen del suministro eléctrico para la producción, y la falta de acceso o la mala calidad de la red pueden hacer económicamente inviable su implantación en una zona. Por ejemplo, la industria metalúrgica, que lleva a cabo procesos electro-intensivos como la electrólisis, requiere un suministro sin interrupciones para evitar grandes pérdidas económicas. Es decir, que la calidad del suministro es un requisito esencial para que muchos sectores industriales existan. En consecuencia, para que sea posible la innovación industrial es necesario primero que exista un entorno propicio para el desarrollo de la industria misma. Es decir, que dentro de las bases para la innovación industrial se encuentra el acceso a una red de suministro continuo y estable. Además, la red eléctrica es en si misma una infraestructura y es importante llevar a cabo acciones de mejora que eleven la calidad del servicio. Es por tanto que, la innovación industrial y la infraestructura se ven fuertemente afectadas por la calidad del suministro eléctrico. La mejora de las técnicas para la localización de faltas, reduciendo el tiempo de falta, contribuyen a unos mejores índices de calidad. El índice del SAIDI mide directamente la duración media de las faltas en una zona determinada, y por tanto depende del tiempo de localización y aislamiento.

A su vez, la presencia de la industria está íntimamente ligada a la creación de empleo de calidad y al fomento del crecimiento económico. Las mejoras en los índices de calidad del suministro incentivan a los inversores a localizar fábricas y empresas en la zona, trayendo empleo decente. Ya que normalmente el empleo que requiere la industria suele, en gran parte requerir un nivel medio-alto de formación, e incluso, a menudo, son las propias empresas las que proporcionan la formación necesaria a los empleados. De esta forma, no solo se crea empleo, sino que se mejora el nivel de formación de la población. El empleo decente, inyecta nuevos ingresos en la sociedad en forma de salarios, impulsando el crecimiento económico en la zona. Retomando el argumento principal, la creación de empleo y el crecimiento económico viene ligado a la presencia de un suministro continuo y de fácil acceso.

Finalmente, para que en un futuro sea posible transitar a la integración de las microrredes y de la generación distribuida dentro de la red principal es necesario seguir mejorando las técnicas de gestión y mantenimiento de redes. El nuevo paradigma de generación eléctrica presenta un reto a nivel de estabilidad de la red y de control de todos los subelementos de la misma. La integración de los nuevos elementos en la red supone una elevada complejidad operacional. La revisión de los procedimientos de operación y mantenimiento es importante para poder explotar todas las ventajas que ofrecen las nuevas configuraciones de redes.

En resumen, este estudio se encuadra principalmente en la dimensión económica de los SDGs, pero también, en menor medida, en la escala social. Mediante la mejora de los índices de calidad de la red se puede apoyar el desarrollo y la innovación industrial y la infraestructura, así como fomentar el empleo de calidad y el crecimiento económico, y contribuir a la transición hacia una red más limpia y sostenible. La calidad del suministro de la red tiene una relación directa con la presencia de tejido industrial y es una pieza fundamental para que exista innovación industrial. De igual manera, al desarrollarse la industria se crean puestos de trabajo de calidad que inducen el crecimiento económico. Por último, el refinamiento de las técnicas de mantenimiento de redes es de relevancia para la integración de las nuevas tecnologías de generación, como microrredes o generación distribuida, que apuntan hacia comunidades más limpias y sostenibles.