

MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE MÁSTER

HERRAMIENTA DE ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL SISTEMA EXPERTO LAYCA PARA LA CARACTERIZACIÓN Y LOCALIZACIÓN DE FALTAS EN MEDIA TENSIÓN

Estudiante: Blanco Fraile, Paula

Director: Gutiérrez Ruiz, José Julio

Curso académico: 2022-2023

Bilbao, 6 de Junio de 2023

En primer lugar, me gustaría agradecer al grupo de investigación GSC por la oportunidad de conocerlos personalmente y brindarme la posibilidad de formar parte del grupo sintiéndome una más.

Especialmente agradezco a mi tutor José Julio la confianza depositada en mí para el desarrollo de este trabajo Fin de Máster y a Koldo por su implicación, infinita paciencia y ganas de enseñar.

Por último quiero agradecer a mi familia por creer siempre en mí y por transmitirme su confianza y seguridad.

Resumen

La continuidad del suministro eléctrico es uno de los principales parámetros que tienen en cuenta las compañías del sector eléctrico para comprobar la calidad de la red. Esta continuidad se ve afectada por distintas causas que provocan faltas en la red. Estas deben ser localizadas y solventadas lo antes posible tratando de minimizar los daños.

En las etapas de generación y transporte se lleva a cabo una rápida detección de faltas haciendo uso de sistemas convencionales en los que se emplean los dispositivos electrónicos inteligentes. Sin embargo, debido a diferentes factores, estos sistemas no llevan a cabo una localización precisa de faltas en las redes de distribución.

Para solucionar la problemática presentada, el grupo de investigación GSC junto con Iberdrola i-DE ha desarrollado un sistema experto llamado LAYCA. Este sistema ofrece una localización de faltas en la red de distribución de media tensión a través de las señales de tensión y corriente grabadas por los dispositivos electrónicos inteligentes.

Este trabajo Fin de Máster colabora en el desarrollo de dicho sistema experto ofreciendo una herramienta que realice las funciones de visualización de las señales de tensión y corriente provocadas por las faltas, de ejecución y gestión de la base de datos y finalmente, de análisis de resultados estadísticos procedentes de la ejecución realizada.

Del análisis realizado al conjunto total de oscilos almacenados en la base de datos el sistema experto LAYCA ofrece un resultado de distancia a más de la mitad de ellos. Comparando los errores cometidos por el sistema tradicional frente a los cometidos por el sistema experto LAYCA se puede ver una reducción de dicho valor, suponiendo esto una mejora en la precisión en el cálculo de las distancias.

Palabras clave: Red eléctrica, faltas, oscilos, dispositivos electrónicos inteligentes, sistema experto LAYCA.

Abstract

The continuity of the electric supply is one of the main parameters that companies study to check the quality of the electric grid. The continuity is affected by different causes that produce faults in the grid and have to be detected and solved promptly minimizing possible damages.

The rapid detection of faults is carried out correctly in the generation and transport stages using conventional systems consisting of smart electronic devices. However, due to different factors, these devices do not accurately locate the faults in the distribution grids.

To solve the presented problem, the research group GSC, together with Iberdrola R&D, has developed an expert system called LAYCA. This system offers the localization of medium voltage distribution grid faults through the oscilos stored by smart electronic devices.

This End of Master project collaborates with the development of the expert system offering a tool that realizes the oscilos visualization tools, execution and management of the database, and finally, analysis of the statistical results proceeding from the realized execution.

From the analysis realized to the total of stored oscilos, the expert system LAYCA offers a distance result to over half of them. Comparing the results with the traditional system we see a reduction in the errors, which leads to an improvement in the precision of the distance calculation.

Key words: Electric grid, faults, oscilos, smart electronic devices, expert system LAYCA.

Laburpena

Elektrizitate-horniduraren jarraipena da sektore elektrikoko enpresek sarearen kalitatea egiaztatzeko kontuan hartzen duten parametro nagusietako bat. Jarraitasun horri sarean akatsak eragiten dituzten arrazoi ezberdinek eragiten diote. Hauek ahalik eta azkarren kokatu eta konpondu behar dira kalteak minimizatzen saiatuz.

Sorkuntza eta transmisio faseetan, matxurak azkar detektatzen dira ohiko sistemak erabiliz, zeinetan gailu elektroniko adimentsuak erabiltzen diren. Hala ere, faktore desberdinak direla eta, sistema hauek ez dute banaketa-sareetan matxuren kokapen zehatza egiten.

Aurkeztutako arazoa konpontzeko, GSC ikerketa taldeak Iberdrola i-DErekin batera, LAYCA izeneko sistema aditua garatu du. Sistema honek tentsio ertaineko banaketa sarean matxuren kokapena eskaintzen du, gailu elektroniko adimendunek erregistratutako tentsio eta korrante seinaleen bidez.

Master Lan honek sistema aditu horren garapenean lankidetzan aritzen da, matxurak eragindako tentsio- eta korrante-seinaleak ikusteko, datu-basea exekutatu eta kudeatzeko eta, azkenik, egindako exekuzioaren emaitzak aztertzeko funtzioak betetzen dituen tresna bat eskainiz.

Datu-basean gordetako osziloskopio-multzo osoaren gainean egindako analisitik, LAYCA sistema adituak distantziako emaitza bat eskaintzen dio erdia baino gehiagori. Sistema tradizionalak egindako akatsak LAYCA sistema adituak egindakoekin alderatuz gero, ikus daiteke balio hori murriztu egin dela eta horrek hobetu egiten du distantzien kalkuluaren zehastasunari dagokionez.

Hitz gakoak: Sare elektrikoa, matxurak, osziloskopio, gailu elektroniko adimendunak, sistema aditua LAYCA.

Índice

1	Introducción	2
2	Contexto	4
2.1	Sistemas de protección de la red eléctrica	4
2.2	Algoritmos de localización de faltas	6
2.2.1	Ondas Viajeras (TW)	7
2.2.2	Aprendizaje Automático	9
2.2.3	Estrategia basada en Impedancia	10
2.3	LAYCA: Sistema experto de localización de faltas	13
2.3.1	Estrategia de localización offline	13
2.3.2	Correcciones externas para la mejora de la precisión	15
2.3.3	Beneficios del sistema experto LAYCA	15
3	Objetivos y alcance	17
3.1	Objetivos parciales	17
3.2	Alcance	17
4	Beneficios	18
4.1	Beneficios sociales	18
4.2	Beneficios técnicos	18
4.3	Beneficios económicos	18
5	Análisis de alternativas	19
5.1	Acceso a los datos	19
5.1.1	Alternativas	19
5.1.2	Criterios de selección	19
5.2	Lenguaje de programación	20
5.2.1	Alternativas	20
5.2.2	Criterios de selección	20
6	Análisis de riesgos	22
6.1	Identificación de los riesgos y medidas de contingencia	22
6.1.1	Plazos (R1)	22
6.1.2	Pérdida de archivos (R2)	22
6.1.3	Dificultades tecnológicas (R3)	22
6.2	Matriz probabilidad-impacto	23
7	Descripción de la solución propuesta	24
7.1	Definición de la base de datos	24
7.1.1	Base de datos inicial	24
7.1.2	Creación de base de datos	26
7.1.3	Generación de identificador	27
7.1.4	Base de datos final	27
7.2	Simulación del comportamiento de un IED	28
7.3	Diseño y desarrollo de la aplicación	30
7.3.1	Módulo de ejecución de la base de datos	30
7.3.2	Módulo de representación de oscilos	33

7.3.3	Módulo para agregar nuevos oscilos a la base de datos	34
7.3.4	Módulo de generación de resultados	36
7.3.5	Exportar la aplicación	40
8	Descripción y análisis de resultados	42
9	Planificación del proyecto	48
9.1	Grupo de trabajo	48
9.2	Fases del proyecto	48
10	Diagrama de Gantt	54
11	Presupuesto	57
11.1	Horas internas	57
11.2	Amortizaciones	57
11.3	Gastos	57
11.4	Coste total	58
12	Conclusiones	59
	Referencias	60
A	ANEXO I	63
A.1	Instalar la aplicación	63
A.2	Panel de visualización	64
A.3	Ejecución de la base de datos	65
A.4	Panel para agregar nuevos oscilos a la base de datos	66
A.5	Panel de resultados globales	68
A.6	Panel de resultados parciales	69

Lista de Figuras

1.1	Ejemplo de falta provocada por la caída de un árbol sobre el tendido eléctrico provocando una anomalía a la fase 8 (azul) de la señales de tensión y corriente.	2
2.1	IEDs alojados en un armario <i>rack</i> dedicado al sistema de protección.	4
2.2	Diagrama de bloques de un IED.	4
2.3	Ejemplo de umbrales de un IED.	5
2.4	Porcentaje de error cometido por los IEDs en la localización de faltas (Fuente: Iberdrola i-DE).	6
2.5	Clasificación de las técnicas de localización de faltas.	7
2.6	Transmisión de la falta a lo largo de la red.	7
2.7	Diagrama de Bewley representando el método de TW en un solo extremo.	8
2.8	Modelo de capas (Machine Learning).	10
2.9	Representación de falta en la red [26].	11
2.10	Representación del método que emplea los dos extremos para la localización de falta [31].	12
2.11	Representación de 4 candidatos para una distancia de falta.	13
2.12	Etapas seguidas en la ejecución de LAYCA.	13
2.13	Instante de apertura (rojo) y cierre (verde) de la línea.	14
2.14	Inrush en la señal de corriente.	14
2.15	Regresión lineal para la corrección en base a la distancia (Fuente: Iberdrola, i-DE).	15
6.1	Matriz probabilidad impacto del proyecto.	23
7.1	Pasos a seguir en el desarrollo del proyecto.	24
7.2	Ejemplo de archivos disponibles dentro de una carpeta correspondiente a un oscilo.	25
7.3	Ejemplo de fichero de ajustes.	26
7.4	Estructura del archivo de distancias reales.	26
7.5	Ejemplo de archivos renombrados.	27
7.6	Apertura de las fases 0 y 4 de la línea.	28
7.7	Inicio (rojo) y fin (verde) del ciclo seleccionado para el calculo de la distancia.	28
7.8	Diseño de la aplicación.	30
7.9	Ejemplo de archivos seleccionados dentro del módulo de ejecución.	30
7.10	Archivos de entrada y salida de LAYCA y del IED.	31
7.11	Fragmento del archivo .con.	31
7.12	Archivos de entrada y salida de LAYCA.	32
7.13	Archivos de entrada y salida del IED.	32
7.14	Módulo de visualización.	34
7.15	Proceso de ejecución seguido por el módulo para agregar nuevos oscilos a la base de datos.	35
7.16	Módulo para agregar nuevos oscilos a la base de datos.	35
7.17	Módulo de visualización de nuevos oscilos.	36
7.18	Tabla de resultados globales de la base de datos.	38
7.19	Selector gráficas para resultados parciales.	38
7.20	Ejemplo de diagrama circular donde se representa los errores cometidos por el algoritmo de LAYCA.	39

7.21	Ejemplo de diagrama de caja para el las distintas tensiones nominales.	39
7.22	Ejemplo de diagrama de barras para el subconjunto de datos cuya tensión nominal es de 13 kV (Error mostrado en porcentaje).	40
7.23	Ejemplo de diagrama de dispersión para el subconjunto de datos cuya tensión nominal es de 20 kV (Porcentaje de error frente a distancia real).	40
7.24	Proceso para generar el instalador de la aplicación.	41
8.1	Porcentaje de error cometido por los IEDs y LAYCA.	42
8.2	Porcentajes de error para tensiones nominales 13 kV.	43
8.3	Porcentajes de error para tensiones nominales 20 kV.	44
8.4	Diagrama de caja del error de las faltas simultáneas.	45
8.5	Diagrama de caja del error cometido por LAYCA de las faltas bifásicas.	45
8.6	Representación de la regresión lineal para los parámetros de distancia real y de error cometido en el cálculo de la distancia por LAYCA.	46
8.7	Representación de la regresión lineal para los parámetros de duración del segmento empleado para el cálculo de la distancia por LAYCA y el error cometido en dicho cálculo.	47
10.1	Diagrama de Gantt (1).	54
10.2	Diagrama de Gantt (2).	55
10.3	Diagrama de Gantt (3).	56
A.1	Instalador TFM.	63
A.2	Ubicación de la aplicación ALAYCA dentro de MATLAB.	63
A.3	Panel principal.	64
A.4	Panel de visualización.	64
A.5	Selector instante de apertura.	65
A.6	Panel de ejecución.	65
A.7	Aviso de falta de archivo de parámetros.	66
A.8	Barras de progreso.	66
A.9	Panel para agregar nuevos oscilos a una base de datos.	66
A.10	Ejemplo de archivos de datos a añadir.	67
A.11	Ejemplo de un fragmento del excel que alberga la tensión nominal de la línea y la distancia real a la falta.	67
A.12	Panel de visualización asociado a los nuevos oscilos a añadir.	68
A.13	Posibles paneles emergentes a la hora de añadir.	68
A.14	Ejemplo de resultados de una base de datos asociados a una ejecución.	69
A.15	Panel para seleccionar que gráfica se desea visualizar.	70
A.16	Opciones de gráficas.	70
A.17	Ejemplo en el que se muestran todas las opciones del diagrama circular.	71
A.18	Ejemplo de diagrama de caja (boxplot) para los distintos tipos de falta.	71
A.19	Ejemplo de diagrama de barras para una tensión nominal de 20kV.	71
A.20	Ejemplo de diagrama de dispersión para los distintos modelos de IED.	72

Lista de Tablas

5.1	Criterio de selección para el acceso a los datos.	19
5.2	Criterio de selección para el lenguaje de programación.	21
7.1	Características de los oscilos almacenados en la base de datos final.	28
8.1	Mediana, percentil 25 y percentil 75 de los errores en función de las tensiones nominales.	43
8.2	Mediana, percentil 25 y percentil 75 de los errores en función del tipo de falta.	44
8.3	Mediana, percentil 25 y percentil 75 de los errores en función del modelo de la protección.	46
9.1	Equipo de trabajo.	48
11.1	Partida de horas internas	57
11.2	Partida de amortizaciones.	57
11.3	Partida de gastos.	57
11.4	Costes totales.	58

Acrónimos

ANN	Red Neuronal Artificial
AT	Alta Tensión
BD	Base de Datos
BT	Baja Tensión
CWT	Transformada Wavelet Continua
DFT	Transformada Discreta de Fourier
DWT	Transformada Wavelet Discreta
FFT	Transformada Rápida de Fourier
GS	Gold Standard
GSC	Grupo de Señal y Comunicaciones
H	Hito
IED	Dispositivo Electrónico Inteligente
IO	Identificador de Oscilo
MT	Media Tensión
PT	Paquete de Trabajo
TW	Traveling Wave
UPV/EHU	Universidad Pública del País Vasco
VPN	Red Privada Virtual

1. Introducción

Las compañías eléctricas están cada vez más sensibilizadas y dedican mayores esfuerzos a mejorar la calidad del suministro eléctrico [1]. Uno de los principales parámetros a la hora de medir la calidad del suministro eléctrico es la continuidad del mismo. Dicha continuidad se ve afectada por diferentes interrupciones [2]. Estas pueden ser controladas, como por ejemplo cortes programados para llevar a cabo mantenimiento o reparaciones, o no controladas, como cortes debidos a la aparición de cortocircuitos (faltas), fallos derivados de fenómenos meteorológicos, errores humanos, ruptura de equipos, etc... [3]-[4]. Las faltas suponen el 53.8% del total de las interrupciones del sistema eléctrico y serán objeto de estudio a lo largo de este proyecto [5].

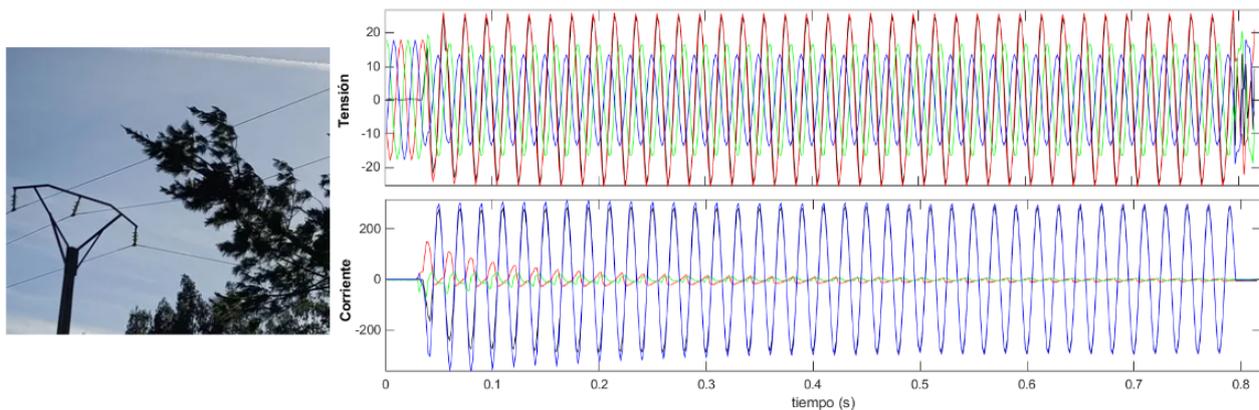


Figura 1.1: Ejemplo de falta provocada por la caída de un árbol sobre el tendido eléctrico provocando una anomalía a la fase 8 (azul) de la señales de tensión y corriente.

En el sistema de suministro eléctrico se diferencian 3 etapas: la generación de energía, el transporte (Alta tensión, AT) de la misma y su distribución (Media tensión, MT y baja tensión, BT) hasta los usuarios finales [6].

La mayor parte de faltas que se registran en las líneas eléctricas se producen en las redes de transporte y distribución. Estas faltas se originan por la exposición de las líneas eléctricas a fenómenos tales como tormentas, viento, rayos, etc..., dando como resultado fallos en el suministro eléctrico que pueden llegar a provocar daños en dispositivos electrónicos, pérdidas de energía o incluso daños humanos [7].

Con el fin de prevenir estos problemas, a lo largo de los años se han introducido en la red los llamados Dispositivos Electrónicos Inteligentes (IED de sus siglas en inglés Intelligent Electronic Devices), conocidos también como relés de protección [8]. Estos se encargan de monitorizar continuamente las tres fases de una línea. Cuando se cumplen las condiciones de falta, normalmente por sobrecorrientes, se encargan también de dar orden de apertura de la línea, para evitar que afecten al resto de la red. Junto con la orden de disparo, los IEDs guardan la forma de onda del evento que ha hecho disparar la línea, para un análisis posterior. Estos registros se conocen como oscilos y pueden ser configurados en los propios IEDs. Una vez despejada la falta, el IED se encarga de avisar cuándo conectar de nuevo la línea, que se hará de forma automática o manual, comprobando que todo funciona correctamente.

Por otra parte, los IEDs cuentan con un algoritmo que les permite calcular la localización donde se ha producido la falta. Para que la estimación de la localización sea precisa los IEDs deben tener

información actualizada sobre el mapeado de la red que les rodea, así como de las características de esta.

En las redes de transporte (AT), los IEDs permiten localizar las faltas con una precisión alta. Esto es debido a las características homogéneas de la línea y al trazo fundamentalmente recto de las mismas. En cambio, en las líneas de distribución (MT) existen varios factores que dificultan la precisión. A continuación se detallan algunos de estos factores:

- **Crecimiento de la red:** La red crece y sufre cambios a lo largo del tiempo haciendo que las características de la misma inicialmente introducidas en los IEDs queden obsoletas. Lo idóneo sería reconfigurar los equipos cada vez que alguna de estas alteraciones en la red se produce. Sin embargo, debido a la gran cantidad de IEDs que poseen las líneas de distribución, dicha reconfiguración se hace inviable por el elevado coste económico que conlleva.
- **Heterogeneidad:** Este tipo de redes no son homogéneas ya que están compuestas por conductores con diferentes características. Dependiendo del tramo, los conductores pueden ser aéreos o subterráneos. Además, el conductor de tierra puede existir o no dependiendo del tramo, afectando esto a la localización de las faltas a tierra.
- **Distribución de las líneas:** El trazo de las líneas de la red de distribución no es recto. Se puede dar la circunstancia de encontrar puntos lejanos, en lo que a longitud del conductor se refiere, que realmente son puntos geográficamente cercanos al IED. Esto afecta a la localización de las faltas a tierra debido a que el camino que recorre la corriente en el retorno al IED es considerablemente inferior al de la línea. Por este motivo, la distancia a la falta que calcula el IED es errónea.
- **Ramificaciones:** Las redes de distribución están formadas, generalmente, por numerosas ramificaciones. Por tanto, es posible que cuando se ofrece una localización de una falta, esta se pueda haber producido en cualquiera de estas ramas.
- **Conexión de cargas:** Es importante destacar que, a lo largo de la red de distribución, se pueden encontrar diversas cargas conectadas a la misma. Este hecho dificulta la localización de la falta [9].

Debido a estos factores, la localización precisa de las faltas en este tipo de redes es un proceso complejo de realizar haciendo uso de los IEDs. Tradicionalmente dicho proceso se ha realizado mediante un sistema de prueba y error. Esto provoca que el tiempo necesario para aislar el fallo sea demasiado elevado, suponiendo importantes pérdidas económicas.

Otra problemática a tener en cuenta es que debido al rápido crecimiento de la cantidad de IEDs desplegados en la red, el número de oscilos registrados ha aumentado exponencialmente. Por tanto, existe una imposibilidad de contar con un equipo humano capaz de analizar la ingente cantidad de información generada.

En este contexto, la empresa de distribución eléctrica Iberdrola, i-DE siguiendo sus líneas de trabajo e innovación orientadas a la implementación de redes eléctricas inteligentes, junto con el Grupo de Señal y Comunicaciones (GSC) de la Universidad Pública del País Vasco (UPV/EHU) han desarrollado un sistema experto para la identificación, caracterización y localización de faltas en redes de MT, denominado LAYCA.

Este trabajo fin de máster colabora en la mejora de dicho sistema experto, en concreto en los ciclos de mejora y optimización de los resultados.

2. Contexto

La detección temprana de faltas en la red eléctrica y su localización precisa son necesarias para restaurar el correcto funcionamiento de la misma de la forma más rápida posible.

Los métodos tradicionales de localización funcionan correctamente en la red de transporte. Sin embargo, no son tan útiles en la red de distribución de MT debido a la heterogeneidad de su topología, la presencia de ramificaciones y las conexiones de cargas a lo largo de la misma.

A continuación se describe el funcionamiento del método tradicional que emplean los IEDs.

2.1 Sistemas de protección de la red eléctrica

Los IEDs son dispositivos de protección y control basados en microprocesadores que se encuentran alojados en armarios *rack* dentro de las subestaciones [10] como se muestra en la Figura 2.1.



Figura 2.1: IEDs alojados en un armario *rack* dedicado al sistema de protección.

La función principal de estos dispositivos consiste en monitorizar las señales de tensión y corriente de la línea que protegen. Como la red eléctrica es un sistema trifásico el IED está conectado a las tres tensiones de fase y a las tres corrientes de línea. Estos dispositivos sirven para detectar condiciones de falta y enviar una alerta para abrir la línea evitando que afecte al resto de la red.

Un IED está compuesto por los bloques funcionales mostrados en la Figura 2.2.



Figura 2.2: Diagrama de bloques de un IED.

El primer bloque lleva a cabo el acondicionamiento de las señales de tensión y corriente correspondientes a la línea que el IED protege. Este proceso se divide en dos etapas. En la primera etapa se realiza la transducción de las magnitudes de línea a tensión del IED. En la segunda etapa se adaptan los niveles de ambas señales al rango de funcionamiento del microprocesador.

Una vez acondicionadas las señales, en el segundo bloque se lleva a cabo el muestreo, es decir, la digitalización de las señales analógicas de cada uno de los canales para posteriormente poder realizar un procesamiento digital de las mismas.

En el tercer bloque, se lleva a cabo el procesamiento. Debido a la distorsión armónica e interarmónica que sufren las señales de la red eléctrica se lleva a cabo una Transformada Discreta de Fourier (DFT) con el objetivo de obtener la componente fundamental de 50Hz, sobre las que se trabaja.

A partir de las señales DFT obtenidas se realizan dos análisis para la detección de sobrecorrientes. Por una parte, se analiza si la corriente sobrepasa el umbral fijado en algún instante de tiempo (umbral instantáneo). Este valor es levemente inferior al límite de corriente que es capaz de soportar la línea. Por otro lado, se estudia si la corriente sobrepasa un umbral, inferior al instantáneo, durante un intervalo de tiempo (umbral temporal). Este umbral podría sobrepasarse de forma puntual debido, por ejemplo, al arranque de la maquinaria de una fábrica, pero cuando la sobrecorriente se prolonga en el tiempo se interpreta como un falta. Estos umbrales se establecen para cada uno de los IEDs alojados en la red. Si cualquiera de los dos umbrales son excedidos, el IED lanza una alerta para desconectar la línea evitando que las sobrecorrientes afecten al resto de la red.

La Figura 2.3 muestra un ejemplo de la actuación de un IED. En ella se muestra la DFT de 50 Hz de las señales de corriente de la línea. Cuando las fases 4 y 8 superan el umbral temporal fijado en este IED en 300 A se lanza un contador. Cuando dicho contador alcanza el valor de temporización, en este ejemplo de 250 ms, salta una alerta indicando que se debe llevar a cabo la apertura de la línea.

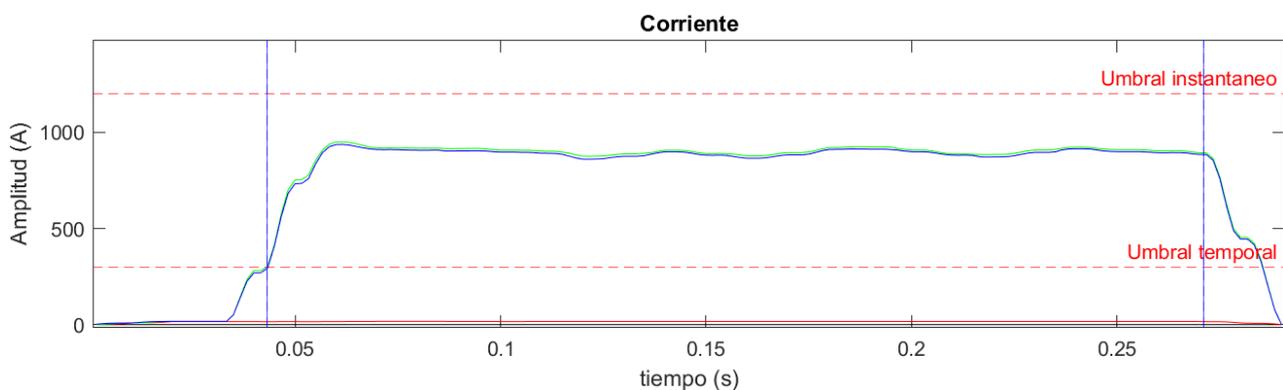


Figura 2.3: Ejemplo de umbrales de un IED.

Finalmente, tras la detección de una falta y apertura de la línea, se almacenan las señales de tensión y corriente (oscilografía) y se envían al centro de control para su posterior inspección [11]. Estos registros se conocen como oscilos y muestran una fotografía de la falta que puede ayudar a identificar las causas que la han provocado.

Algunos IEDs, además de proteger la línea, tienen la funcionalidad añadida de proporcionar la distancia a la que se ha producido la falta. Para ello calculan la impedancia a partir de los valores de la componente de 50Hz de tensión y corriente del último ciclo previo a la apertura. Conociendo

la impedancia por kilómetro de la línea, el IED es capaz de ofrecer la estimación de la distancia.

En general, la precisión de estos cálculos no es alta. En la Figura 2.4 se representan los errores cometidos por los IEDs a la hora de ofrecer una localización de la falta para la red de MT de Iberdrola, i-DE. Como se puede ver, un 42% de las faltas detectadas por los IEDs no ofrecen como resultado una localización. Analizando los resultados de aquellas faltas para las que sí se calculan distancias, se observa que más de la mitad de ellos cometen un error igual o superior al 20%, suponiendo esto distancias demasiado elevadas para considerarlas como resultados precisos.

Estos errores tan elevados se deben a diversas causas. En primer lugar, la impedancia de la red, necesaria para el cálculo de distancias, va variando de acuerdo con la topología de la red debido a cambios en el cableado, renovación de los equipos, etc..., mientras que los parámetros asociados a dicha variable almacenados en el IED normalmente no se actualizan. Por otro lado, los IEDs ofrecen el valor de la distancia a la falta haciendo uso del último ciclo antes del instante de apertura. Sin embargo el IED no se asegura que la última zona usada sea estable, ya que puede verse afectada por diferentes eventos como componentes de alta frecuencia, apertura de las fases en instantes de tiempo distintos, faltas auto extinguidas, etc...

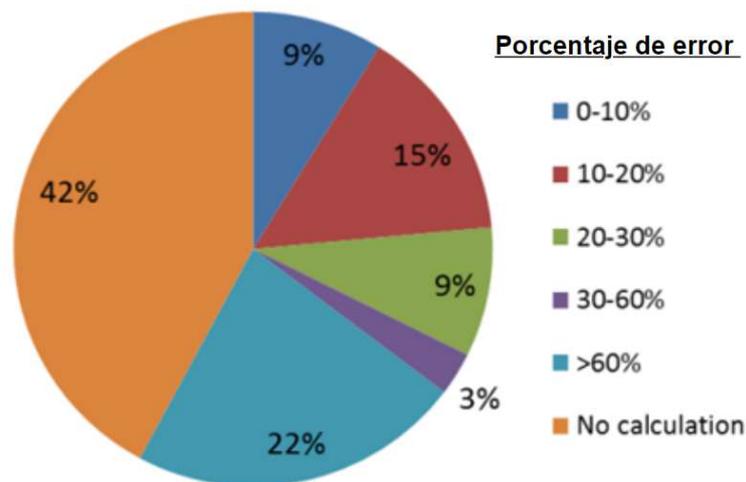


Figura 2.4: Porcentaje de error cometido por los IEDs en la localización de faltas (Fuente: Iberdrola i-DE.).

2.2 Algoritmos de localización de faltas

A lo largo de los años se han estudiado diferentes estrategias y algoritmos para mejorar la precisión en la localización de faltas haciendo uso de la información proporcionada por los IEDs.

La Figura 2.5 muestra un esquema de las tres principales vías utilizadas para la localización de faltas: estrategias basadas en ondas viajeras, en aprendizaje automático o en el cálculo de la impedancia.

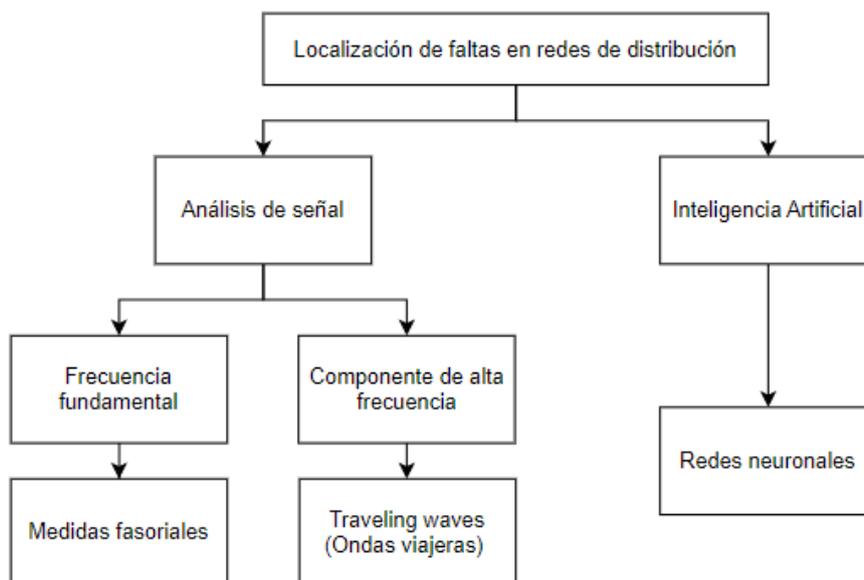


Figura 2.5: Clasificación de las técnicas de localización de faltas.

A continuación se analizan cada una de estas estrategias:

2.2.1 Ondas Viajeras (TW)

La estrategia de ondas viajeras o también denominada *Traveling Waves (TW)* se basa en el análisis de los impulsos electromagnéticos de alta frecuencia, generados de forma inesperada, debido a variaciones en la corriente y la tensión en el punto de la red donde ocurre la falta [12]-[13]. Estos impulsos se propagan en las dos direcciones de la línea, alcanzando las protecciones más cercanas (Figura 2.6).

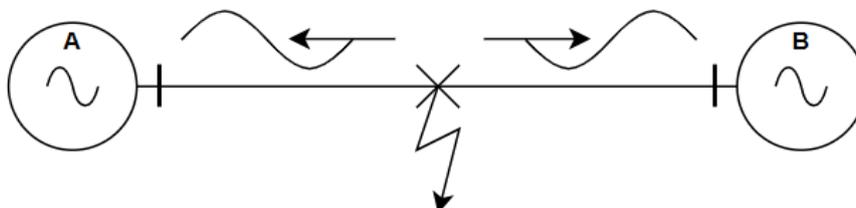


Figura 2.6: Transmisión de la falta a lo largo de la red.

La propagación de la onda de alta frecuencia en ambas direcciones permite localizar la falta haciendo uso de dos métodos. El primero, conocido como análisis en un solo extremo, consiste en procesar la información que recibe el IED local (A). El segundo método, conocido como análisis en ambos extremos, emplea las señales que reciben ambos IEDs, el local (A) y el remoto (B). A continuación se describen ambos métodos:

- **Método de TW en un solo extremo**

Este método consiste en usar las diferencias de tiempos medidos por el IED local (A), entre la onda original causada por la falta y su primera reflexión.

En la Figura 2.7 se muestra el diagrama de Bewley donde se representa este método. En dicho diagrama, F representa el punto de la red donde ocurre la falta, P la ubicación del IED local (A), E la ubicación del IED remoto (B), d la distancia entre la falta y el IED (A) y l la distancia entre ambos IEDs (A-B).

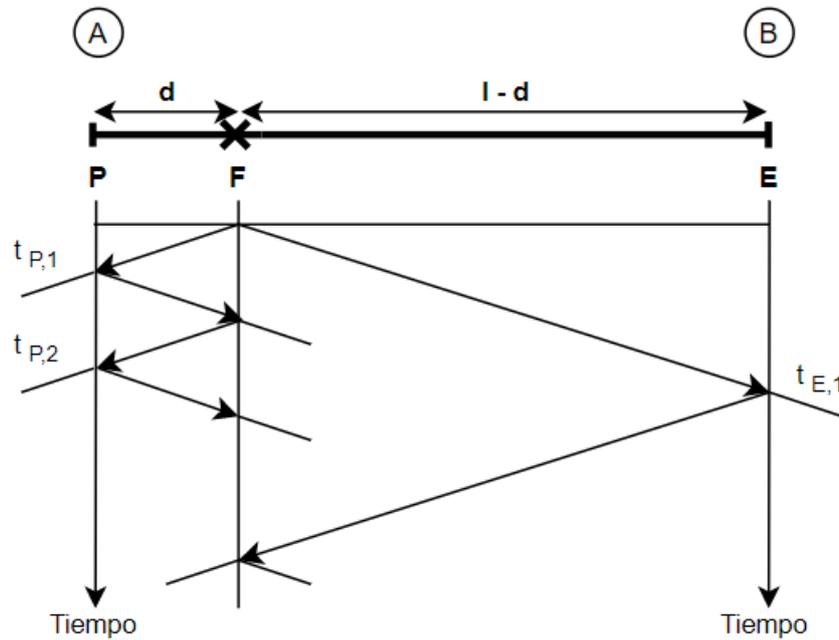


Figura 2.7: Diagrama de Bewley representando el método de TW en un solo extremo.

Conociendo que:

$$v = \frac{\text{longitud de la línea}}{\text{tiempo de propagación de la TW}} \quad (1)$$

La expresión empleada para obtener d_1 es:

$$d_1(m) = \frac{t_{p,2} - t_{p,1}}{2} \cdot v \quad (2)$$

Donde, $t_{p,1}$ y $t_{p,2}$ son los tiempos de llegada de la onda original y la primera reflexión en relación a la falta F respectivamente.

Sin embargo, cuando otros puntos de la red, cercanos al IED local (A), reflejan las ondas procedentes de la misma falta interfieren en el cálculo de la posición generalmente ofreciendo una distancia menor [14].

- **Método de TW en ambos extremos**

El segundo método consiste en usar los tiempos de llegada de la onda original, generada por la falta, a ambos IEDs, el local (A) y el remoto (B). Dichos IEDs deben tener una única referencia de tiempos a la hora de adquirir los datos relativos a las faltas [15]-[16].

Aplicando las ecuaciones de tiempos correspondientes y despejando la distancia d se obtiene:

$$t_{P1} = \frac{d}{v} \quad (3)$$

$$t_{E1} = \frac{l - d}{v} \quad (4)$$

$$d = \frac{1}{2} \cdot ((t_{P1} - t_{E1}) \cdot v + l) \quad (5)$$

Con este método los IEDs deben mandar la información relativa a la TW a un ordenador central o tener un canal de comunicación entre ellos que les permita intercambiar dicha información. De esta forma se estima la localización de la falta de forma autónoma, sin necesidad de interacción humana. Cuando los sistemas de comunicación o la referencia de tiempos no están disponibles, el usuario es el encargado de llevar a cabo el análisis visual de los eventos relativos a la falta grabados por ambos terminales.

De entre los dos métodos expuestos, es recomendable usar el que analiza la información de la falta en un solo extremo ya que el error que comete es inferior. Este método estima los tiempos de llegada de la primera onda y la reflejada usando únicamente hardware del dispositivo y su reloj interno.

La estrategia de TW se puede emplear en redes de transporte pero no es idónea para redes de distribución, ya que se vuelve compleja debido a la topología radial que presentan dichas redes causando múltiples reflexiones de la TW. Además, cabe destacar que la red debe disponer de dispositivos que trabajen con altas frecuencias aumentando mucho el coste de la instalación [17].

2.2.2 Aprendizaje Automático

En los últimos años se ha llevado a cabo un gran número de estudios para la localización de faltas en redes de transporte y distribución haciendo uso de técnicas de aprendizaje automático.

Lo primero de lo que se debe disponer es una base de datos lo suficientemente amplia como para poder dividirla en dos: una base de datos de entrenamiento y otra de testeo. Ambas deben contener faltas con características diferentes así como posibles variaciones en la localización de las cargas, el tipo de falta y la impedancia de la línea.

- **Técnicas de procesamiento para la extracción de características**

Las características se extraen de las señales captadas por los IEDs. Para llevar a cabo dicha extracción se pueden emplear diferentes técnicas como puede ser; la Wavelet discreta (DWT) [18], la Wavelet continua (CWT) [19]-[20] o la transformada rápida de Fourier (FFT) [21].

Cuanto mayor sea la base de datos de entrenamiento y contemple diferentes situaciones, más robusto y certero será el algoritmo que se desarrolle para la localización de faltas.

- **Metodología**

Los algoritmos de aprendizaje automático consisten en construir modelos que, con unas características de entrada X, ofrecen una solución Y. Para llevar a cabo el entrenamiento de este tipo de algoritmos se emplea la base de datos de entrenamiento. En ella se encuentran las características extraídas de las señales. El algoritmo más empleado para este tipo de aplicaciones es el basado en redes neuronales (ANN). Estas redes están formadas por 3 o más capas como se muestra en la Figura 2.8.

- **Capa de entrada:** En ella se introducen las características de cada señal almacenadas en la base de datos.
- **Capas ocultas:** Son las capas intermedias entre la capa de entrada y la de salida. Estas se encargan de procesar la salida de la capa anterior enviando el resultado a la siguiente. Cuanto mayor es el número de capas ocultas, mayor será el procesamiento de

las características de la base de datos y por tanto, el resultado obtenido será más preciso.

- **Capa de salida:** Proporciona el resultado final de todo el procesamiento de datos realizado por las capas previas. La capa de salida está formada por un solo nodo si se trata de un problema de clasificación binaria (Si o No). En cambio, cuando la capa de salida está formada por varios nodos se trata de un problema de clasificación multiclase, siendo la localización de faltas una casuística de este tipo.

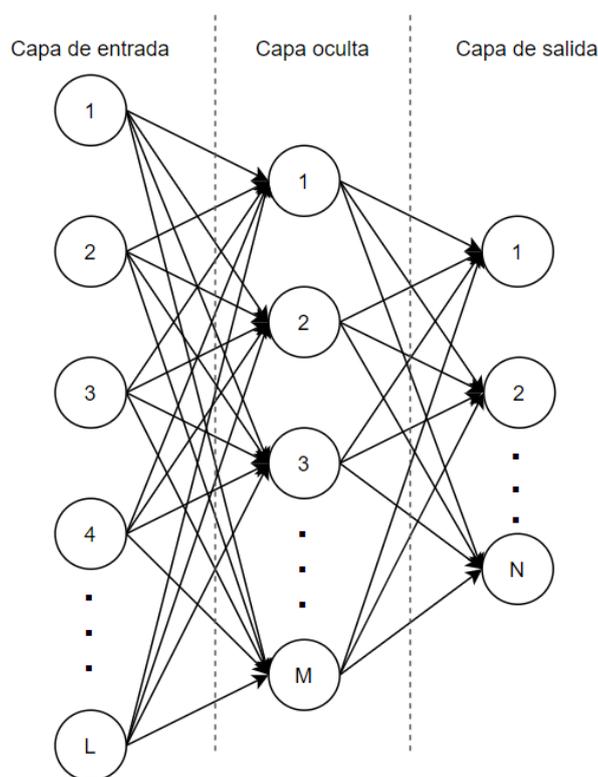


Figura 2.8: Modelo de capas (Machine Learning).

El proceso de entrenamiento de la red neuronal consiste en ir ajustando los pesos de entrada a cada una de las neuronas para lograr que la capa de salida se ajuste lo máximo posible a los datos de salida de los que se dispone.

Existen diferentes métodos para asignar los valores a los pesos. En el primer método se inicializan los pesos de los nodos de forma pseudoaleatoria y, mediante métodos de aprendizaje supervisado, se ajustan sus valores. En el segundo método se determinan los valores de los pesos basándose en el procedimiento de entrenamiento por descenso de gradiente [22]-[23].

El principal problema que presentan los métodos de aprendizaje automático es la gran cantidad de datos con características diferentes necesarios para lograr un buen entrenamiento de la red neuronal.

2.2.3 Estrategia basada en Impedancia

Es una de las más empleadas a la hora de realizar el cálculo de la localización de la falta en las redes de distribución y de transporte [24]. De hecho es la técnica habitualmente empleada por los IEDs.

Esta técnica también tiene en cuenta las tensiones y corrientes provocadas por la falta para llevar a cabo el cálculo de una impedancia [25]. Tras este cálculo y conociendo la impedancia de la línea donde se ha producido el fallo se puede obtener una localización de la misma.

Al igual que con las TW existen dos metodologías para obtener la localización: en un solo extremo o en ambos.

- **Método de impedancia en un extremo**

En este caso se evalúa únicamente la señal de un único IED (C), de forma individual. Para ello, se aplica la segunda Ley de Kirchhoff en el circuito mostrado a continuación, donde C representa el IED, F el punto donde ha ocurrido la falta, Z la impedancia de la línea, I_p la corriente de la línea, I_f la corriente de la falta y m la distancia desde el IED C a la falta F.

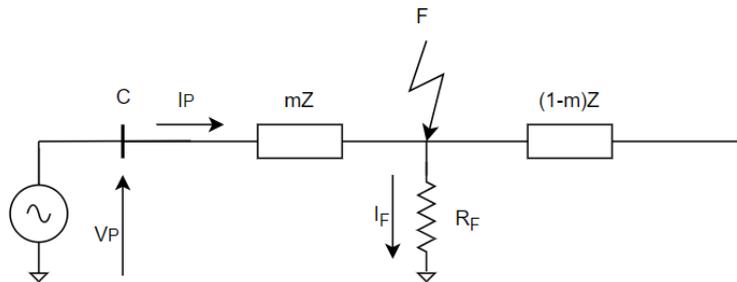


Figura 2.9: Representación de falta en la red [26].

La resolución de la ecuación, se muestra a continuación:

$$V_P - I_P(mZ) = I_F \cdot R_F \quad (6)$$

$$Z_P = \frac{V_P}{I_P} = mZ + R_F \frac{I_F}{V_F} \quad (7)$$

Por lo tanto, se concluye que la localización de la falta se calcula como:

$$m = \frac{R_F \cdot \frac{I_F}{V_F} - Z_P}{Z} \quad (8)$$

- **Método de impedancia en dos extremos**

Este método emplea los datos de los dos IEDs situados en los extremos y es similar a la técnica explicada previamente [27]-[28]. La precisión de esta técnica es mejor debido al uso de las señales de ambos extremos [29].

Este método se puede clasificar en síncrono o asíncrono.

- **Síncrono:** Supone que las medidas de ambos extremos deben tener la misma referencia de tiempos.
- **Asíncrono:** Los IEDs encargados de capturar las señales, no hace falta que estén sincronizados. Gracias a esto, el coste de la implementación de este método es menor.

El desarrollo para obtener la localización de este segundo método es el siguiente [30]:

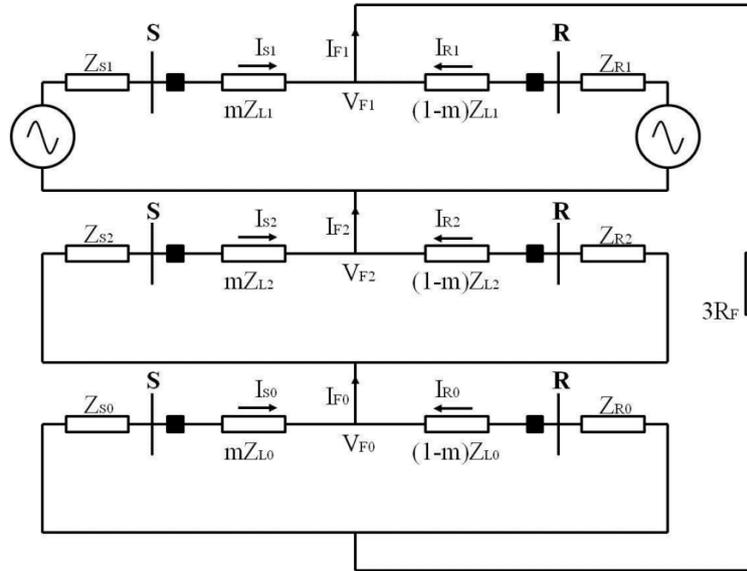


Figura 2.10: Representación del método que emplea los dos extremos para la localización de falta [31].

Partiendo de la Figura 2.10, S y R son los IEDs.

La tensión en la falta se puede calcular como:

$$V_F = -I_{S2} \cdot (Z_{S2} + mZ_{L2}) \quad (9)$$

$$V_F = -I_{R2} \cdot (Z_{R2} + (1+m)Z_{L2}) \quad (10)$$

Igualando ambas ecuaciones se obtiene:

$$I_{R2} = I_{S2} \cdot \frac{Z_{S2} + mZ_{L2}}{Z_{R2} + (1-m)Z_{L2}} \quad (11)$$

El principal problema que presenta esta técnica es que, al ofrecer la localización de una falta, esta puede coincidir con varios puntos de la red conocidos como candidatos (Figura 2.11) [32]-[33]. Por ello, es importante conocer la distribución de la red o disponer de dispositivos que capturen las señales en cada una de las ramificaciones.

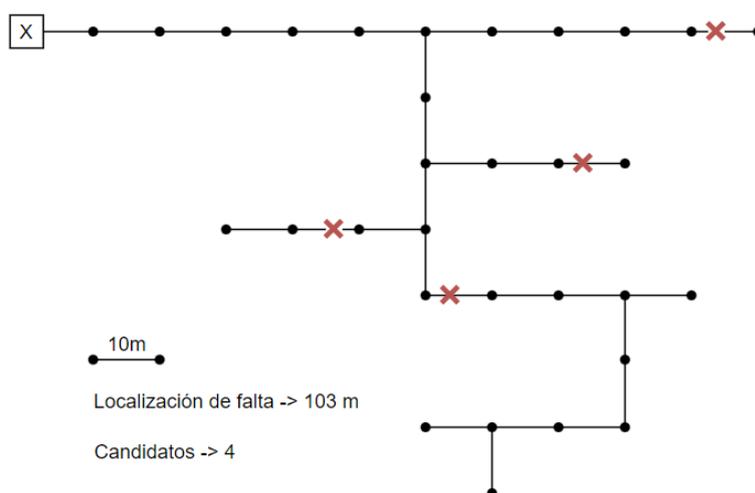


Figura 2.11: Representación de 4 candidatos para una distancia de falta.

2.3 LAYCA: Sistema experto de localización de faltas

Las estrategias anteriores llevan asociadas desventajas importantes que se reflejan en la precisión del cálculo de distancias, como se ha explicado en la Figura 2.4.

Para resolver dichas desventajas se ha desarrollado un sistema de alta precisión en la caracterización y localización de las faltas de la red eléctrica de MT, llamado LAYCA. Este sistema, a partir del procesado offline de las señales de tensión y corriente procedentes de los IEDs, es capaz de calcular una impedancia y, por tanto, la localización de la falta. Gracias al análisis offline el algoritmo puede analizar de forma recursiva las señales de tensión y corriente ofreciendo un valor preciso de localización.

El proceso seguido para ofrecer un resultado se divide en las siguientes etapas (Figura 2.12):

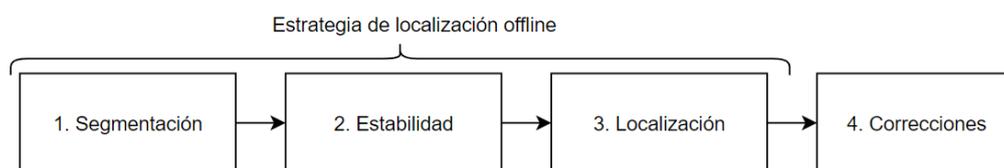


Figura 2.12: Etapas seguidas en la ejecución de LAYCA.

2.3.1 Estrategia de localización offline

Dentro de la estrategia de localización de la falta se llevan a cabo los pasos definidos por los 3 bloques funcionales de la Figura 2.12:

- **Segmentación**

Se trata de definir segmentos que puedan ser útiles para poder ofrecer una localización de la falta al usuario. Para ello, se buscan los instantes de apertura y reenganche de la línea. En la Figura 2.13 se muestra la apertura de la línea hacia los 0,95 s y el reenganche en el instante 2,05 s.

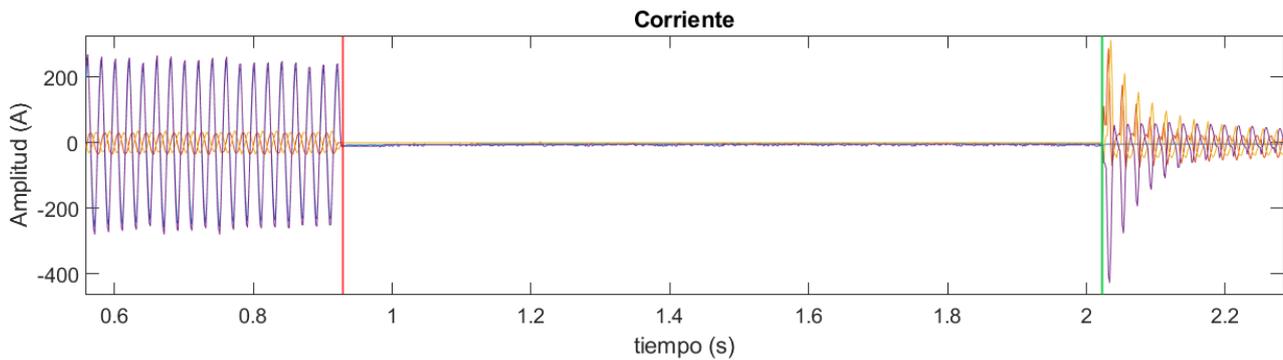


Figura 2.13: Instante de apertura (rojo) y cierre (verde) de la línea.

Una vez definidos los instantes anteriores se busca si, previo a una apertura de la línea o posterior a un reenganche, existen zonas con inrush¹ (Figura 2.14), para así, descartar ese segmento del cálculo de localización [34].

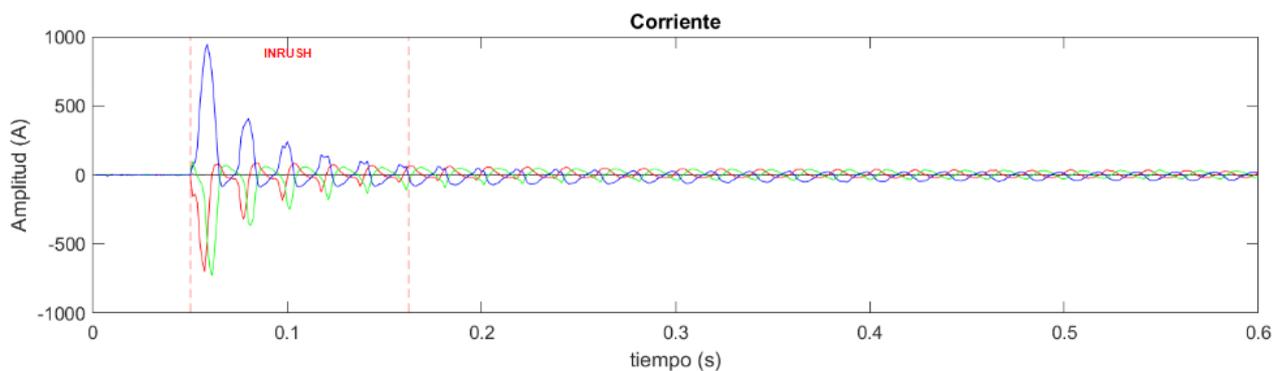


Figura 2.14: Inrush en la señal de corriente.

Finalmente, con los segmentos restantes se analiza qué tipo de falta es. LAYCA identifica los tipos de falta descritos a continuación:

- Monofásica: Cortocircuito de una fase con la tierra.
- Bifásica con tierra: Cortocircuito de dos fases con la tierra.
- Bifásica sin tierra: Cortocircuito de dos fases sin conexión a tierra.
- Trifásica con tierra: Cortocircuito de tres fases con la tierra.
- Trifásica sin tierra: Cortocircuito de tres fases sin conexión a tierra.
- Simultanea: Este tipo de falta ocurre cuando se detecta uno de los 5 tipos de falta descritos previamente en tensión y otro tipo diferente en corriente. Si LAYCA detecta este tipo de falta no calcula distancia.

• Estabilidad

En el segundo paso se analiza la estabilidad en base al segundo armónico de la corriente homopolar. A partir de los segmentos de señal sin inrush definidos en la etapa anterior, se busca dentro de ellos zonas en las que el segundo armónico de la corriente homopolar no supere el 2 %.

En caso de no detectar ninguna zona estable no se proporciona resultado.

¹Inrush: Se conoce como inrush al efecto de la magnetización del sensor de medida sobre la señal de corriente. Se trata, por tanto, de una falsificación en la medida de las condiciones reales de corriente de falta.

- **Algoritmo de localización**

El tercer paso es la localización de la falta. Para aquellas zonas estables definidas previamente se aplica el algoritmo de localización correspondiente al tipo de falta detectado. Dependiendo del tipo de falta identificada se aplica un algoritmo u otro. LAYCA posee tres algoritmos de localización basados en el cálculo de impedancia según el método de impedancia en un extremo con corrección de corriente de carga. Uno para faltas monofásicas, otro para bifásicas y por último uno para trifásicas.

2.3.2 Correcciones externas para la mejora de la precisión

Para aumentar la precisión de los resultados obtenidos se aplican las siguientes correcciones.

- **Corrección en base a la distancia**

Cuanto mayor es la distancia calculada a la falta mayor es el error que se comete. Para minimizar dicho error, se ha obtenido un ajuste en base a una regresión lineal. En la Figura 2.15 se muestra la regresión lineal diseñada para las faltas monofásicas.

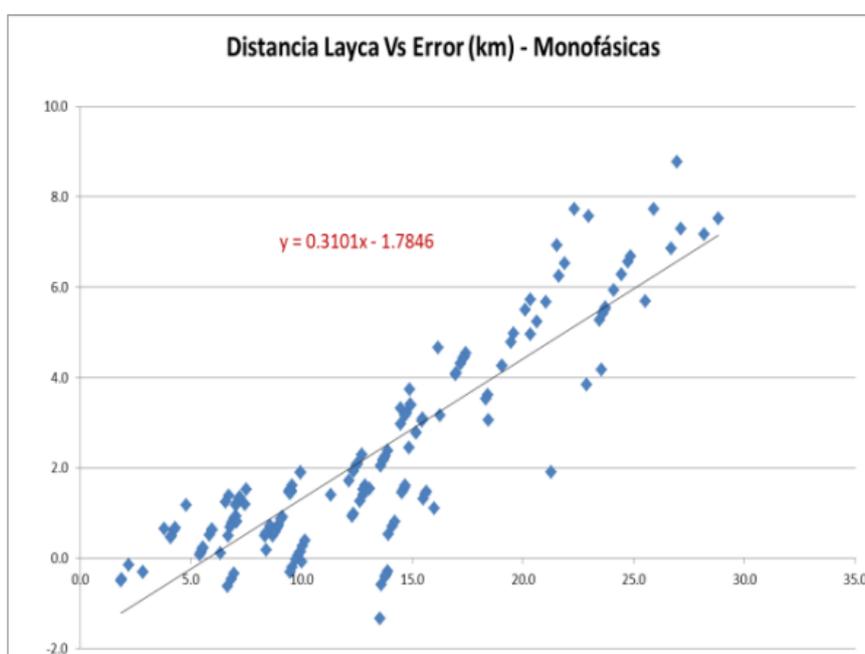


Figura 2.15: Regresión lineal para la corrección en base a la distancia (Fuente: Iberdrola, i-DE).

- **Corrección en base al arco eléctrico**

Esta corrección se aplica en base al valor del tercer armónico de la tensión homopolar ya que la presencia de dicho armónico está vinculada con las características del arco eléctrico que provocan desviaciones en la estimación de la distancia. Se realiza en base a una regresión lineal obtenida del estudio estadístico de los resultados.

2.3.3 Beneficios del sistema experto LAYCA

El uso de LAYCA aporta indiscutibles beneficios para la gestión de las redes de distribución.

1. Permite analizar oscilos en formato COMTRADE [35] procedentes de IEDs de diferentes fabricantes.
2. Ejecuta un análisis automático de toda falta ofreciendo una primera valoración en segundos.

3. Permite modificar las condiciones de ejecución a través de decenas de parámetros configurables.
4. Gracias a la segmentación y la búsqueda de zonas estables, ofrece una localización más fiable y precisa, con errores por debajo del 10 %.

La importancia del sistema experto para Iberdrola, i-DE es alta por lo que es necesario garantizar su fiabilidad tratando de proporcionar los objetivos de precisión específicos.

3. Objetivos y alcance

El objetivo de este proyecto consiste en el desarrollo de una aplicación para la gestión, visualización y análisis estadístico de resultados procedentes del sistema experto LAYCA.

Además, permite llevar a cabo comparativas entre diferentes versiones del sistema experto LAYCA y distintos parámetros de entrada para tratar de alcanzar el algoritmo más preciso a la hora de ofrecer una localización de falta.

Para alcanzar el funcionamiento deseado de la aplicación se fijan diferentes objetivos parciales a cumplir en el desarrollo del proyecto.

3.1 Objetivos parciales

Generación de la base de datos: A partir de los registros oscilográficos se seleccionan los oscilos de los que se disponen datos de distancia real y se genera una base de datos homogénea con el objetivo de poder acceder a toda la información de forma automática.

Desarrollo de los diferentes módulos: Se busca el desarrollo de una herramienta modular que recoja las siguientes funcionalidades:

- **Representación de oscilos:** El objetivo de su desarrollo consiste en poder analizar de forma visual las señales de tensión y corriente así como los resultados obtenidos asociados a ellas.
- **Ejecución de la base de datos:** Su finalidad es ofrecer la posibilidad de realizar una ejecución de la base de datos de forma totalmente automática almacenando los resultados de toda ella en una única estructura.
- **Gestión de la base de datos:** Se diseña para poder añadir nuevos oscilos y adaptar la base de datos en función de lo que el usuario desee realizar.
- **Generación de resultados:** Extracción de resultados estadísticos procedentes tanto de la base de datos al completo como de subconjuntos de la misma.

3.2 Alcance

La herramienta diseñada completa la funcionalidad de LAYCA, ya que proporciona resultados estadísticos que permiten el análisis y la validación de una determinada configuración del sistema experto.

El sistema completo permite a Iberdrola, i-DE mejorar su sistema de protección, avanzando en la identificación y reparación temprana de averías, así como en la predicción de anomalías.

Finalmente, la generación de resultados de forma estructurada permitirá la elaboración de un estudio científico sobre la mejora de la estrategia offline de localización de faltas frente a la utilización de la funcionalidad online de los IEDs.

4. Beneficios

El desarrollo de este proyecto puede ofrecer beneficios en diversas áreas como pueden ser, el área técnica, social y económica. A continuación se explican todas ellas más en detalle.

4.1 Beneficios sociales

En el ámbito social, el uso de este sistema experto en la localización de faltas en la red de distribución presenta varias ventajas.

En primer lugar, al localizar la falta de forma más precisa se resuelve el problema detectado con mayor rapidez permitiendo restablecer el servicio lo antes posible. Gracias a esto la red eléctrica donde se aplique este sistema es capaz de ofrecer un servicio de mayor calidad y por tanto, contribuir al desarrollo de la sociedad.

Debido al aumento en la precisión de la localización se mejora de forma sustancial la seguridad y la eficiencia de los trabajadores encargados de restaurar el servicio.

Finalmente, debido a la rápida localización de la falta se reducen los posibles daños que pueda ocasionar en dispositivos electrónicos alojados en la misma red.

4.2 Beneficios técnicos

En este proyecto los beneficios técnicos se relacionan con los recursos y herramientas que se desarrollan a lo largo del mismo. La base de datos generada puede ser utilizada para el desarrollo de futuros estudios, sobre esta misma materia, empleando otras metodologías.

Se ofrece una simulación del proceso seguido por los microprocesadores de los IEDs para obtener una localización. Dicha simulación puede ser empleada en futuras ocasiones para realizar comparativas con otros algoritmos o con posibles mejoras del sistema usado actualmente.

Finalmente, ofrece una nueva metodología a la hora de localizar las faltas en las redes de distribución. Esta nueva metodología puede ser el punto de partida para futuras mejoras.

4.3 Beneficios económicos

Como último beneficio se encuentra el económico que, gracias al uso de este sistema las empresas distribuidoras pueden llevar a cabo un mantenimiento más eficaz y seguro de la línea, reduciendo el coste económico que esto supone.

Además, al reducir el tiempo en el que la falta afecta a la red, el número de dispositivos electrónicos que podrían ser dañados se reduce, suponiendo este hecho un ahorro para el cliente.

5. Análisis de alternativas

En este capítulo se realiza un análisis de los recursos disponibles para el desarrollo del proyecto seleccionando la mejor alternativa. En el proyecto hay dos ámbitos en los que existen diferentes alternativas. Estos ámbitos son: el acceso a los datos y el lenguaje de programación.

En función de la selección realizada, el desarrollo del trabajo será más o menos complejo.

5.1 Acceso a los datos

Seleccionar el mejor método para el acceso a los datos es de vital importancia. Las alternativas que se han planteado son las siguientes:

5.1.1 Alternativas

- **Acceso con credenciales:** En esta situación, Iberdrola, i-DE debería ofrecer unas credenciales para acceder a sus bases de datos donde se alojan las señales de tensión y corriente procedentes de las faltas. Para ello, haciendo uso de una red privada virtual (VPN) se podría disponer de la información de manera inmediata.
- **Acceso in situ:** El desarrollador del proyecto se tendría que desplazar todos los días a las oficinas de Iberdrola, i-DE para poder acceder a los datos y desarrollar la aplicación.
- **Envío de datos mediante plataformas tradicionales:** Iberdrola, i-DE enviaría los datos al desarrollador del proyecto haciendo uso de herramientas como el correo electrónico. De esta forma es posible tener acceso a los datos en cualquier momento y lugar.

5.1.2 Criterios de selección

Para seleccionar la mejor opción en lo que a las alternativas presentadas se refiere se tienen en cuenta los siguientes criterios:

- **Sencillez (40 %):** El acceso a los datos se puede realizar de forma sencilla, facilitando el trabajo del desarrollador.
- **Accesibilidad (60 %):** Los datos están disponibles en cualquier momento y lugar.

Teniendo en cuenta los criterios comentados se puntúa cada una de las alternativas del 1 al 5. La que alcance la nota más alta será la idónea para el desarrollo del proyecto.

	Sencillez (40 %)	Accesibilidad (60 %)	Total
<i>Acceso con credenciales</i>	4	3	3,4
<i>Acceso in situ</i>	3	2	2,4
<i>Envío de datos</i>	4	5	4,6

Tabla 5.1: Criterio de selección para el acceso a los datos.

Por tanto, analizando los resultados de Tabla 5.1, se concluye que el método ideal para acceder a los datos es el “*envío de datos*”.

5.2 Lenguaje de programación

Elegir de forma correcta el lenguaje de programación al inicio del proyecto es esencial ya que, una vez iniciado el desarrollo del mismo, realizar un cambio resulta complejo.

En el sistema experto LAYCA el lenguaje de programación utilizado es MATLAB, por tanto, los archivos que se obtienen como resultado de su ejecución son de tipo `.mat`.

5.2.1 Alternativas

- **C++:** Se trata de un lenguaje con sintaxis heredada del lenguaje C, orientado a objetos y de alto rendimiento. Se trata de un lenguaje compilado y por lo tanto eficiente con el hardware, además de ser multiplataforma y multiparadigma. Finalmente, cabe destacar que posee una buena respuesta de acción, ya que su ejecución y compilación es bastante rápida.
- **Java:** Se trata del lenguaje más empleado a día de hoy, similar a C++. Es simple, orientado a objetos, robusto y seguro. Además los programas desarrollados en este lenguaje se pueden ejecutar en cualquier tipo de plataforma.
- **Python:** Se trata de un lenguaje orientado a objetos, eficiente, multiplataforma e interpretado. Además es fácil de usar, de alto nivel y, si se disponen de conocimientos previos de otros lenguajes, intuitivo.
- **Go:** El lenguaje Go, conocido también como Golang, presenta varias ventajas. Se trata de un lenguaje inspirado en C de reciente creación, es orientado a objetos, multiplataforma y, debido a la posibilidad que ofrece para ejecutar múltiples tareas a la vez, es un lenguaje concurrente.
- **MATLAB:** Se trata de un lenguaje de alto nivel empleado principalmente para cálculos científicos y de ingeniería. Se basa en matrices para expresar las matemáticas computacionales. Además, permite diseñar aplicaciones de una forma sencilla e intuitiva.

5.2.2 Criterios de selección

Una vez conocidas las alternativas disponibles para el desarrollo del proyecto, se detallan los criterios de evaluación para seleccionar la mejor solución posible. Cada criterio tiene un peso diferente como se muestra a continuación:

- **Sencillez (10 %):** Que el lenguaje de programación seleccionado sea sencillo es algo a tener en cuenta ya que esto facilita el trabajo del desarrollador.
- **Conocimientos previos (25 %):** Que el desarrollador del proyecto disponga de buenos conocimientos del lenguaje a emplear supone un ahorro en el número de horas de desarrollo del proyecto. Esto evita que tenga que dedicar tiempo de aprendizaje previo del mismo, por tanto, reduce costes.
- **Soporte (20 %):** Es importante disponer de gran cantidad de información tanto por la vía oficial como por foros donde poder consultar y resolver dudas que surjan en el desarrollo del proyecto.
- **Rendimiento (10 %):** La necesidad de trabajar con una gran cantidad de datos hace necesario que el lenguaje seleccionado ofrezca un buen rendimiento a la hora de trabajar con ellos.
- **Compatible con datos previos (35 %):** El proyecto se desarrolla partiendo del sistema experto LAYCA. Dicho sistema requiere unos archivos de entrada muy específicos y ofrece como salida estructuras `.mat` de MATLAB. Por este motivo se hace necesario emplear un lenguaje capaz de trabajar con este tipo de estructuras.

Teniendo en cuenta los criterios descritos, a cada una de las opciones de lenguaje presentadas se les asigna una nota del 1 al 5. La opción que obtenga mayor nota será la empleada para el desarrollo del proyecto.

	Sencillez (10 %)	Conocimientos previos (25 %)	Soporte (20 %)	Rendimiento (10 %)	Compatible (35 %)	Total
<i>C++</i>	3	4	3	4	2	3,00
<i>Phyton</i>	4	4	3	3	4	3,70
<i>Go</i>	2	3	3	5	4	3,45
<i>Java</i>	4	3	4	4	2	3,05
<i>MATLAB</i>	3	4	4	3	5	4.15

Tabla 5.2: Criterio de selección para el lenguaje de programación.

Conociendo los resultados mostrados en la Tabla 5.2, se concluye que el lenguaje de programación idóneo para el desarrollo del proyecto en MATLAB.

6. Análisis de riesgos

En este capítulo se lleva a cabo un análisis de los riesgos que pueden surgir a lo largo del desarrollo del proyecto. El objetivo de este análisis consiste en la detección de posibles problemas en la ejecución y desarrollo del mismo. Una vez contemplados todos los riesgos, el objetivo es disminuir o eliminar el impacto de los mismos.

Para llevar a cabo este análisis se usa una herramienta conocida como matriz de probabilidad-riesgo. Con ella se establecen las prioridades de cada uno de los posibles riesgos que puede sufrir el proyecto considerando tanto la probabilidad de que ocurra como el impacto que podría tener en la ejecución del mismo.

6.1 Identificación de los riesgos y medidas de contingencia

6.1.1 Plazos (R1)

El riesgo relativo a los plazos es uno de los más importantes a tener en cuenta. A la hora de analizar este riesgo se deben contemplar varios factores. En primer lugar, al ser un proyecto desarrollado por una persona estudiante pueden surgir factores externos, relacionados con el ámbito académico, que hagan que se posponga la fecha de finalización de alguna tarea. En segundo lugar, es posible que se necesiten conocimientos específicos para desarrollar alguna de las tareas o que se presente una complejidad demasiado elevada provocando que su desarrollo se prolongue en el tiempo.

Para evitar estos riesgos lo idóneo es presentar una planificación estricta de las tareas del proyecto dando a conocer los objetivos que presenta cada una de ellas. Por tanto se hace necesario tener en cuenta el calendario y las circunstancias del alumno.

6.1.2 Pérdida de archivos (R2)

En este proyecto se debe tener especial precaución con 2 tipos de archivos. Estos son los correspondientes a la base de datos y los generados por MATLAB para el desarrollo de la aplicación. Existe la posibilidad de que los archivos se puedan volver corruptos por el mal uso de los mismos por parte del estudiante.

Para evitar este posible riesgo se deberán almacenar los datos de forma diaria en una memoria externa, generando una copia de seguridad.

6.1.3 Dificultades tecnológicas (R3)

A lo largo del proyecto se hace uso de la herramienta AppDesigner ofrecida por MATLAB para crear una aplicación compleja que trata gran cantidad de datos. La ejecución de esta aplicación junto con la cantidad de datos disponibles se hace lenta y pesada para el ordenador suponiendo un riesgo para el proyecto.

Para resolver esta dificultad, en el caso de que el ordenador empleado por el desarrollador no sea capaz de llevar a cabo la ejecución de forma fructífera, la universidad ofrece la posibilidad de emplear sus ordenadores para este tipo de tareas.

6.2 Matriz probabilidad-impacto

En la Figura 6.1 se muestra la matriz probabilidad-impacto de este proyecto. En ella se puede observar que no existen riesgos con gran impacto pero sí se debe prestar especial atención a los riesgos R1 y R2 ya que suponen un riesgo medio pudiendo poner en peligro el desarrollo del proyecto.

		Impacto		
		Bajo	Medio	Alto
Probabilidad	Bajo			
	Medio	R3	R2	
	Alto	R1		

Figura 6.1: Matriz probabilidad impacto del proyecto.

7. Descripción de la solución propuesta

En este capítulo se explica la metodología seguida para alcanzar los objetivos del proyecto descritos en el Capítulo 3.

El proyecto se ha desarrollado de forma íntegra usando el software MATLAB tanto para la creación de funciones como para el desarrollo de la aplicación.

Tal y como se muestra en la Figura 7.1 el desarrollo del proyecto se divide en tres fases:

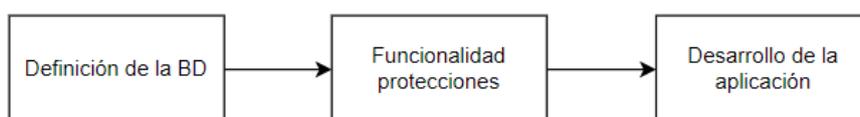


Figura 7.1: Pasos a seguir en el desarrollo del proyecto.

La primera fase consiste en la creación de la base de datos. Tras definir los oscilos que forman parte de ella, la segunda fase se centra en el desarrollo de un algoritmo que modele el comportamiento de los IEDs. Finalmente, la última fase consiste en llevar a cabo el desarrollo de la aplicación para la gestión, visualización y análisis de resultados estadísticos de LAYCA utilizando la herramienta AppDesigner ofrecida por MATLAB. En las siguientes secciones se explica en detalle en que consiste cada una de las etapas.

7.1 Definición de la base de datos

Para el desarrollo del proyecto se dispone de una base de datos inicial con un total de 664 oscilos proporcionados por Iberdrola, i-DE al grupo de investigación GSC. Cada carpeta almacenada en la BD contiene información relativa a una falta detectada por un IED. Una misma falta puede ser captada por diferentes IEDs localizados en la misma red generando diferentes carpetas en la base de datos.

7.1.1 Base de datos inicial

Los oscilos que conforman la base de datos inicial hacen referencia a faltas captadas desde el año 2014 hasta el año 2017. Estos han sido registrados por cuatro modelos diferentes de IEDs: Dos de la empresa Ingeteam y los otros dos de ZIV.

La carpeta correspondiente a un oscilo almacenado en la base de datos inicial tiene la estructura mostrada en la Figura 7.2.

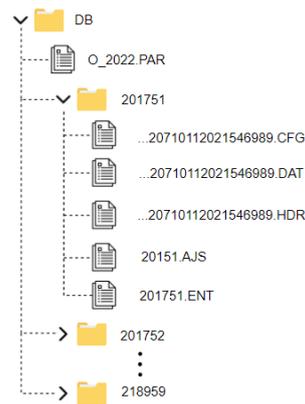


Figura 7.2: Ejemplo de archivos disponibles dentro de una carpeta correspondiente a un oscilo.

Del conjunto de ficheros correspondientes a un oscilo, tres contienen información relativa exclusivamente al oscilo y son generados por los IEDs de acuerdo a la estructura estandarizada COMTRADE (HDR, CFG y DAT) [35] y los otros tres son generados para poder realizar la ejecución de LAYCA (PAR, AJS y ENT). A continuación se detalla la información que almacena cada uno de los archivos mostrados en la figura previa:

- **Cabecera (.HDR):** Se trata de una cabecera que permite identificar el oscilo. Este archivo es relevante para Iberdrola, i-DE pero no es necesario para el desarrollo de este proyecto.
- **Configuración (.CFG):** Resume las características más relevantes de los canales registrados como por ejemplo, los valores máximos y mínimos que han alcanzado cada uno de los canales, el número de canales registrados y su distribución dentro del fichero de datos, una estampa temporal, la frecuencia de muestreo y el número de muestras almacenadas.
- **Datos (.DAT):** Almacena los datos digitalizados de la evolución temporal de las señales de tensión y corriente registradas. Es lo que propiamente se conoce como oscilo.
- **Configuración general (.PAR):** Contiene parámetros de ejecución comunes para el conjunto de la base de datos como por ejemplo, características de la línea (impedancia, sección del conductor, distancia entre conductores, etc...), parámetros para el estudio de estabilidad y parámetros asociados a las regresiones lineales empleadas para las correcciones.
- **Ajustes (.AJS):** En él se encuentran los ajustes correspondientes al IED que ha registrado el oscilo. En la Figura 7.3 se muestra un ejemplo de este fichero. Los 8 primeros parámetros los define el fabricante del IED y hacen referencia a la desincronización de las fases de los canales de corriente con respecto a las tensiones por efecto del muestro (cf) y el porcentaje de las amplitudes a considerar en cada tipo de canal (cm). Los últimos 5 hacen referencia a los umbrales instantáneos (50, 50N) y temporizados (51, 51N, 51NS). Estos umbrales son introducidos por el operario cuando se instala el IED teniendo en cuenta las características de la línea que va a proteger.

```

LAYCA_entrada.ajustes.V_cm;100;
LAYCA_entrada.ajustes.V_cf;0;
LAYCA_entrada.ajustes.If_cm;100;
LAYCA_entrada.ajustes.If_cf;-2;
LAYCA_entrada.ajustes.I0_cm;100;
LAYCA_entrada.ajustes.I0_cf;-2;
LAYCA_entrada.ajustes.Ins_cm;100;
LAYCA_entrada.ajustes.Ins_cf;-2;
LAYCA_entrada.ajustes.Umb_50;1200;
LAYCA_entrada.ajustes.Umb_50N;300;
LAYCA_entrada.ajustes.Umb_51;480;
LAYCA_entrada.ajustes.Umb_51N;30;
LAYCA_entrada.ajustes.Umb_51NS;8.4;

```

Figura 7.3: Ejemplo de fichero de ajustes.

- **Entrada (.ENT):** Contiene información relativa al oscilo, a la incidencia que ha generado la falta y demás parámetros necesarios para la ejecución del programa. Almacena un total de siete parámetros:
 - Identificador de la incidencia (ejemplo: 0000201751).
 - Identificador del IED que ha registrado la falta (ejemplo: 1).
 - Identificador del oscilo (ejemplo: 3442932).
 - Nombre de la línea que esta protegiendo el IED (ejemplo: PUENTENU01L CEBRERO).
 - Fecha de inicio del oscilo (ejemplo: 2017/01/12 02:15:44.770).
 - Path del oscilo (ejemplo: C:/Iberdrola/BD).
 - Nombre del fichero de datos asociado a la incidencia (ejemplo: PL250V42ZGAEA63.59336.20170112021544770.DAT).
 - Identificador de la subestación (ejemplo: UTIEL).
 - Tensión nominal en kV de la línea que está protegiendo el IED (ejemplo: 15).
 - Posición de la línea (ejemplo: 061L).
 - Código identificador en génesis (ejemplo: 0).

7.1.2 Creación de base de datos

Para el desarrollo de este proyecto es necesario disponer de una base de datos con aquellos oscilos que disponen de información acerca de la distancia real. Se entiende por distancia real aquella reportada por el técnico cuando acude a resolver la avería. Dichas distancias se encuentran alojadas junto con información extra en la estructura de MATLAB mostrada en la Figura 7.4.

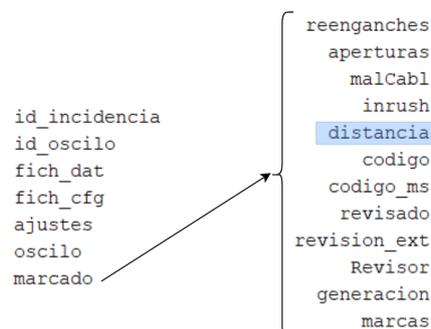


Figura 7.4: Estructura del archivo de distancias reales.

Como se puede ver en la figura anterior, la clave primaria que permite asociar cada distancia a un oscilo es el archivo de datos (fich_dat). Tras seleccionar los oscilos de los que se dispone distancia real, el tamaño de la base de datos se ve reducida de 664 a 252 oscilos.

7.1.3 Generación de identificador

Para gestionar más fácilmente el conjunto de datos se modifica el nombre de los archivos tratando de ofrecer una coherencia y facilitando el trabajo automático de la aplicación. Este nombre al que a partir de ahora se hace referencia como identificador del oscilo (IO) está formado por 2 parámetros diferentes. En primer lugar, se toma el nombre de la línea que se encarga de proteger el IED que ha reportado la falta, esta información se encuentra en el fichero de configuración (CFG). En segundo lugar, se toman los 5 números finales del instante de tiempo en el que el IED capta la falta, esta información esta disponible en el nombre del archivo de datos.

En la Figura 7.5 se muestran los archivos de la Figura 7.2 tras aplicar los cambios comentados.

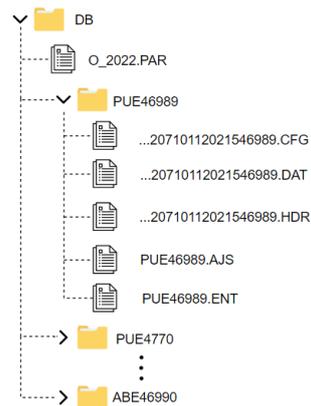


Figura 7.5: Ejemplo de archivos renombrados.

7.1.4 Base de datos final

La base de datos además de contener la información relativa a los oscilos debe almacenar otro tipo de archivos para el correcto funcionamiento de la aplicación desarrollada.

En primer lugar, se genera una estructura de MATLAB con la información relativa a las distancias reales donde la clave primaria es el IO.

En segundo lugar, se genera una estructura de MATLAB llamada `marcado.mat` que contiene información relativa al *Gold Standard*. Entendiendo por *Gold Standard* los parámetros de referencia fijados por los integrantes del grupo de investigación GSC. La mencionada estructura contiene 9 parámetros: El primero es el identificador del oscilo (IO), los seis siguientes hacen referencia al tipo de falta que se ha generado, el octavo indica si se ha detectado *inrush* y, finalmente, el último es el instante de apertura de la línea debido a la falta (almacenado en muestras).

A continuación se muestra un pequeño resumen del tipo de datos disponible en la base de datos final:

Nº de oscilos		252
Características		Nº total de oscilos
Tipo de tensión nominal	13 kV	141
	15 kV	9
	30 kV	102
Modelo de protección	PL250	135
	PL300	14
	3IDR	19
	7IDR	84

Tabla 7.1: Características de los oscilos almacenados en la base de datos final.

7.2 Simulación del comportamiento de un IED

Con el objetivo de valorar la mejora que ofrece el sistema experto LAYCA para la detección y localización de faltas en MT, se simula el comportamiento de un IED basándose en el análisis y procesado de la DFT de la frecuencia de la red (50 Hz).

En primer lugar, se toma de la estructura de marcado el instante de apertura de la línea junto con el tipo de la falta que ha ocurrido. Se entiende por instante de apertura el momento en el que una de las 3 fases de la línea se abre para extinguir la falta. A continuación, en la Figura 7.6 se muestra un ejemplo.

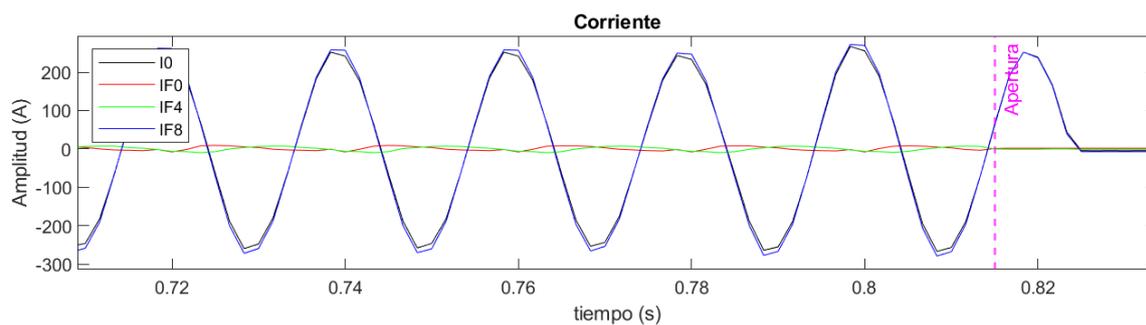


Figura 7.6: Apertura de las fases 0 y 4 de la línea.

Una vez conocido el instante de apertura se retrocede un cuarto de ciclo para seleccionar un ciclo completo de la señal. Como se observa en la Figura 7.7 el ciclo seleccionado está comprendido entre la línea vertical roja y la verde.

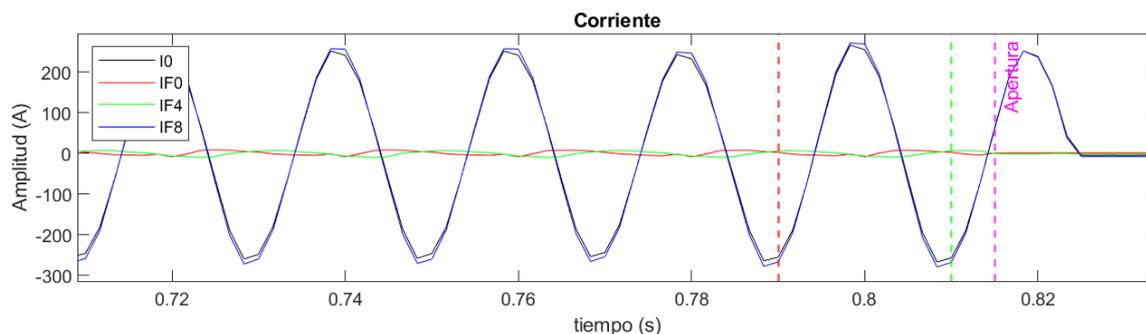


Figura 7.7: Inicio (rojo) y fin (verde) del ciclo seleccionado para el cálculo de la distancia.

Con las muestras comprendidas dentro del ciclo seleccionado se procede a calcular la DFT de la señal para obtener el valor de la componente fundamental de 50 Hz. Dependiendo del tipo de falta (monofásica, bifásica o trifásica), el cálculo de la localización se realiza de forma diferente:

- **Monofásica:** Cuando se produce una falta monofásica en la red la señal de corriente de neutro, la que vuelve por tierra, es prácticamente la corriente de la falta. Por lo tanto, para el cálculo de la DFT se emplea la corriente de neutro. A partir de los valores DFT de la corriente de falta y de la tensión de línea en falta, el algoritmo calcula la impedancia. Basándose además en un modelo de línea concreto se obtiene la distancia a la falta. A continuación se muestra el fragmento de código empleado para dicho cálculo:

```
function distancia = loc_mono_protec(VF,I0,X1,X0)
    VF=VF*1000; % el valor de la tension es en kV
    Z_total=VF/I0; % Cálculo de la impedancia total
    React=imag(Z_total);
    distancia=React/((2*X1+X0)/3); %Cálculo de la distancia de la protección
end
```

- **Bifásica:** Cuando ocurre una falta bifásica en la línea el algoritmo utiliza las dos fases implicadas en la falta. A partir de los valores DFT de ambas corrientes y de la tensión entre las dos fases implicadas en la falta se calcula la impedancia y la diferencia de acuerdo al siguiente código:

```
function distancia = loc_bi_protec(VFm,VFn,IFm,IFn,X1)
    VFm=VFm*1000;
    VFn=VFn*1000;
    Im_promedio=(IFm-IFn)/2;
    Vmn=VFm-VFn;
    Zmn=Vmn./Im_promedio;
    React=imag(Zmn);
    distancia=React/(2*X1);
end
```

- **Trifásica:** En este caso las tres fases de la línea se ven implicadas en la falta, por tanto, se calcula la DFT de las tres tensiones y las tres corrientes. A partir de dichos valores se calcula una impedancia para cada una de las fases ofreciendo en total tres distancias. Con dichos resultados se calcula la mediana y se obtiene el resultado final. A continuación se muestra el código empleado.

```
function [distancia_fase_0]=loc_tri_fase0_protec(VF0,IF0,X1)
    VF0=VF0*1000;% el valor de la tension es en kV
    Z0=VF0./IF0;
    X_0=imag(Z0);
    distancia_fase_0=X_0/X1;
end
...
distancia = median(distancia_fase_0, distanca_fase_4, distanica_fase_8);
```

7.3 Diseño y desarrollo de la aplicación

En la Figura 7.8 se muestran los módulos que conforman la aplicación.

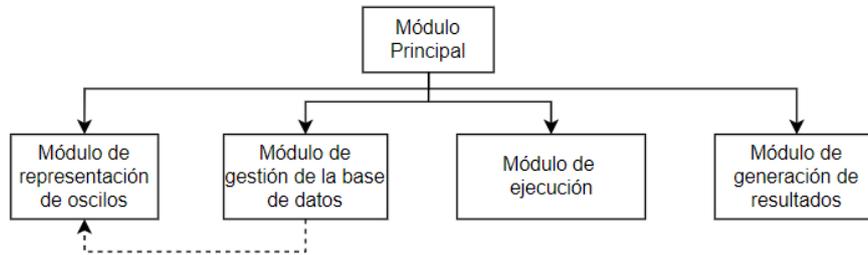


Figura 7.8: Diseño de la aplicación.

Desde el módulo principal se puede acceder a los demás módulos, cada uno con funcionalidades diferentes. A continuación se describe la metodología seguida para lograr el funcionamiento óptimo de cada uno de ellos.

7.3.1 Módulo de ejecución de la base de datos

En este módulo se ejecuta la base de datos al completo. Para que dicho proceso se lleve a cabo se debe introducir el directorio de la base de datos que se desea ejecutar junto con el archivo de parámetros global (Figura 7.9).



Figura 7.9: Ejemplo de archivos seleccionados dentro del módulo de ejecución.

Una vez que se ha comprobado que los archivos introducidos son correctos se inicia la ejecución tanto de LAYCA como del IED. Los archivos de entrada necesarios para la ejecución y los generados como salida se muestran a continuación en la Figura 7.10.

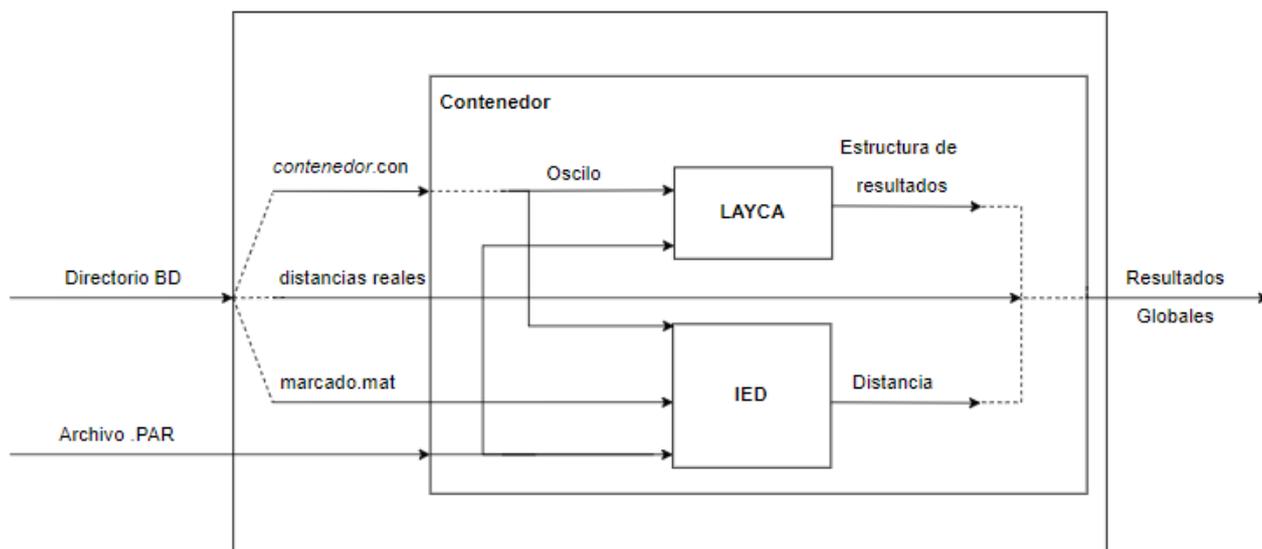


Figura 7.10: Archivos de entrada y salida de LAYCA y del IED.

En primer lugar, a partir del directorio introducido por el usuario donde se encuentra la BD se obtienen 3 archivos. Por un lado, se extraen los dos archivos correspondientes a las distancias reales y al marcado y por otro lado, se genera el archivo `contenedor.con`. Este fichero contiene una entrada por cada oscilo de la BD que se quiera ejecutar. Cada entrada no es más que la ubicación de cada uno de los ficheros de entrada (.ENT) asociados a cada oscilo. A continuación se muestra un pequeño extracto del fichero `contenedor.con`:

```
C:\Users\Paula\Documents\UNI\TFM\GSC\DB\ABE01013\ABE01013.ent
C:\Users\Paula\Documents\UNI\TFM\GSC\DB\ABE02651\ABE02651.ent
C:\Users\Paula\Documents\UNI\TFM\GSC\DB\ABE05012\ABE05012.ent
C:\Users\Paula\Documents\UNI\TFM\GSC\DB\ABE08711\ABE08711.ent
C:\Users\Paula\Documents\UNI\TFM\GSC\DB\ABE12508\ABE12508.ent
C:\Users\Paula\Documents\UNI\TFM\GSC\DB\ABE14258\ABE14258.ent
```

Figura 7.11: Fragmento del archivo .con.

El proceso de ejecución de LAYCA y del IED descritos a continuación se realizan de forma conjunta para cada una de las entradas del archivo `contenedor.con`.

Ejecución LAYCA

Para la ejecución de LAYCA se necesitan varios archivos de entrada. En primer lugar, es necesario disponer del archivo de parámetros introducido por el usuario (.PAR). Además, de cada una de las faltas almacenadas en la base de datos se necesitan los siguientes cuatro archivos: archivo de ajustes (.AJS), de entrada (.ENT), de datos (.DAT) y de configuración (.CFG). El directorio donde se encuentran estos archivos se extrae de cada una de las líneas alojadas en el fichero `contenedor.con`.

Tras la ejecución de LAYCA se generan 3 ficheros de salida. En el primer fichero se almacenan todas las salidas asociadas a la ejecución de LAYCA, conocido como fichero de salida (.SAL). El segundo fichero se corresponde con una estructura de MATLAB (OSCILO.mat) donde se almacenan tanto las señales oscilográficas extraídas del fichero de datos como las DFTs generadas para el cálculo de la distancia. El último fichero se corresponde con una estructura de MATLAB que contiene información extraída de las señales analizadas así como las distancias calculadas por el sistema experto LAYCA.

(RESULTS.mat).

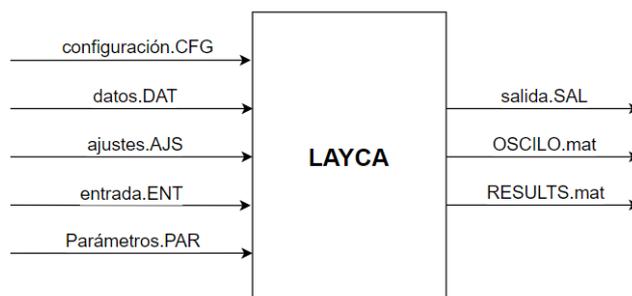


Figura 7.12: Archivos de entrada y salida de LAYCA.

Ejecución IED

Una vez finalizada la ejecución de LAYCA, se inicia la del IED. Para ello son necesarios 3 archivos de entrada. En primer lugar, se introduce la estructura OSCILO.mat generada en la ejecución de LAYCA. En segundo lugar, se necesita el archivo de parámetros genérico (.PAR) para obtener los valores de impedancia de la línea. Finalmente, se introduce la estructura marcado.mat para conocer el tipo de falta que se debe calcular y el instante de apertura de la línea.

De esta ejecución se obtiene una estructura definida como PROTEC.mat donde se almacena el tipo de falta que se ha analizado y la distancia calculada por el IED.

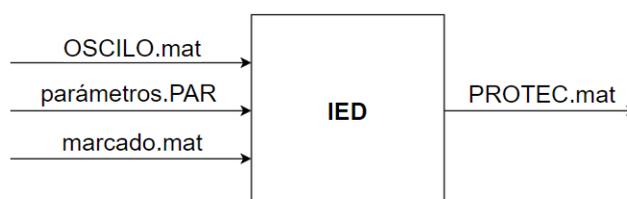


Figura 7.13: Archivos de entrada y salida del IED.

Generación estructura de resultados

Una vez finalizada la ejecución de LAYCA y la del IED para todos los directorios definidos como entradas del fichero contenedor.con se dispone de dos archivos. En primer lugar, el archivo donde se almacenan todos los datos asociados a LAYCA (RESULTS.mat) y en segundo lugar, los resultados del IED (PROTEC.mat).

A partir de estas dos estructuras, se crea otra estructura (GLOBAL_RESULTS.mat) que alberga la información necesaria para comprobar la precisión de dichos algoritmos.

A continuación se describen cada uno de los parámetros de dicha estructura que serán de utilidad para la visualización y extracción de resultados estadísticos.

- **Nombre:** Identificador del oscilo (IO).
- **Modelo:** Modelo de la protección que ha captado la falta (PL300, PL200, 3IRD,...).

- **Válido:** Sirve para definir si el oscilo se desea tener en cuenta en las estadísticas o no. Se trata de una variable binaria inicializada siempre a 1.
- **Tipo de falta:** Hace referencia al tipo de falta localizado por LAYCA para ese oscilo que puede ser de los siguientes tipos:
 - Monofásica.
 - Bifásica con o sin tierra.
 - Trifásica con o sin tierra.
 - Evolutiva: Este caso se da cuando ocurre una evolución entre los tipos de falta previamente mencionados. El resultado de la distancia ofrecido en este caso sigue el siguiente orden de prevalencia: trifásica-bifásica-monofásica.
 - Simultánea: Este caso se da cuando al menos se ha identificado un tramo de este tipo en el oscilo.
- **Duración:** Número de muestras que ha empleado LAYCA para detectar la falta.
- **Distancias:** Se almacenan 4 valores de distancias.
 - Distancia de LAYCA: Cálculo del algoritmo.
 - Distancia de LAYCA: Tras correcciones.
 - Distancia del IED.
 - Distancia real.
- **Errores:** Se almacenan los errores de las 3 primeras distancias calculadas con respecto a la distancia real, tanto en valor absoluto como en valor relativo.

La estructura de MATLAB, junto con el archivo contenedor.con y el archivo de parámetros empleados para la ejecución se almacenan en una carpeta independiente a la base de datos. El nombre de dicha carpeta se genera de la concatenación de LOC_ y el instante en el que se ha iniciado la ejecución.

7.3.2 Módulo de representación de oscilos

Este módulo se emplea para visualizar las señales de tensión y corriente del oscilo. En él se puede elegir qué BD y qué ejecución asociada a la misma se desea visualizar. En la Figura 7.14 se muestra como está planteado dicho módulo.

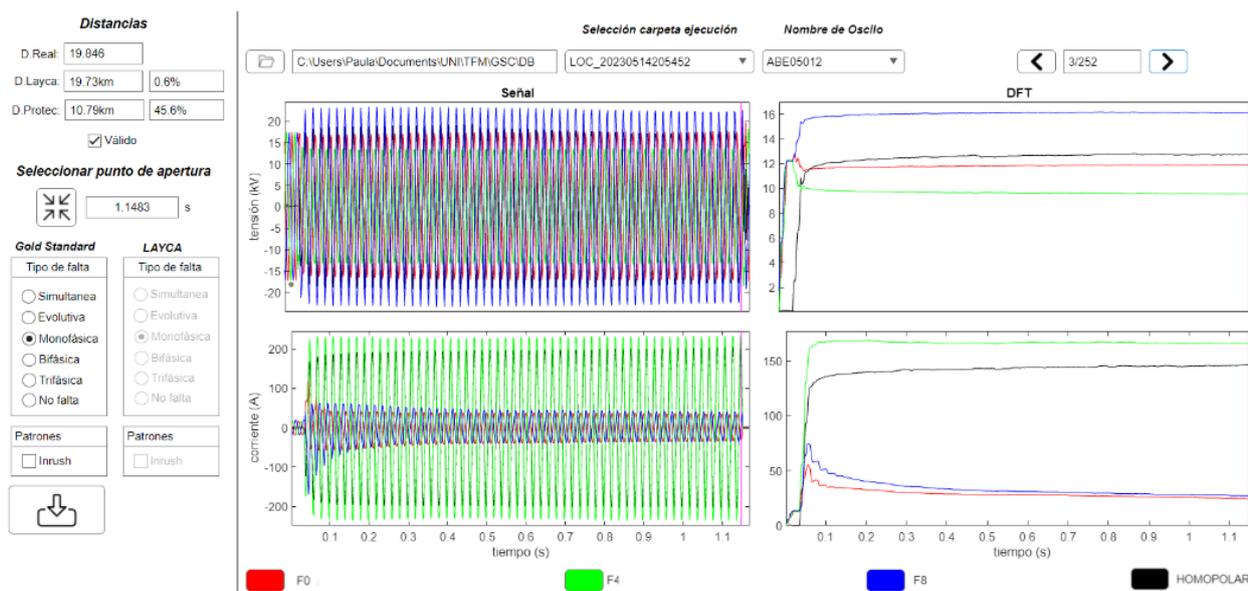


Figura 7.14: Módulo de visualización.

Este módulo está dividido en dos secciones diferenciadas. En la sección derecha se pueden ver las formas de onda de las señales de tensión (arriba) y corriente (abajo) originales junto con las DFTs obtenidas de las mismas. Los colores rojo, verde, azul y negro representan la fase 0, la fase 4, la fase 8 y la componente homopolar respectivamente. En las cuatro gráficas se representa con una línea vertical en morado el instante de apertura de la línea fijado en la estructura de marcado, es decir, el *Gold Standard*.

En la sección izquierda se puede ver información relativa a la ejecución que ha seleccionado el usuario. En la mitad superior están disponibles 3 distancias; la real, la calculada por LAYCA tras las correcciones y la calculada por el IED. Junto con estas dos últimas también se pueden ver los errores relativos que se han cometido a la hora de ofrecer la distancia en relación a la distancia real.

Debajo de las distancias está el selector de validación. Este sirve para indicar si el oscilo se desea tener en cuenta para el cálculo de los resultados estadísticos (activo) o no (no activo). Cuando el usuario decide cambiar su valor, se inicia un proceso automático donde se toma el IO del oscilo y el nuevo valor del parámetro válido para cambiarlo en la estructura de resultados.

En la mitad inferior de la sección izquierda está disponible tanto el *Gold Standard* como los resultados obtenidos por la ejecución del sistema experto LAYCA (almacenados en la estructura de resultados). Si se detecta que el instante de apertura o que el tipo de falta del *Gold Standard* es erróneo usando este módulo se puede cambiar. Cuando se pulsa el botón de guardar el programa toma el IO del que se está cambiando la información, lo busca en el interior de la estructura de marcado y guarda los nuevos valores sobrescribiéndolos sobre los previos.

7.3.3 Módulo para agregar nuevos oscilos a la base de datos

Cuando se reciben nuevos oscilos procedentes de faltas detectadas en la red con el formato COMTRADE [35] se pueden añadir a la base de datos haciendo uso de este módulo. El proceso seguido para ello es el siguiente:

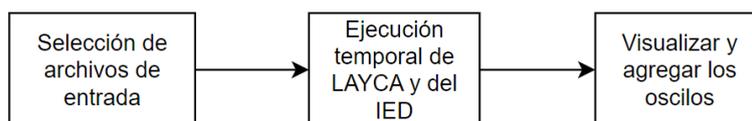


Figura 7.15: Proceso de ejecución seguido por el módulo para agregar nuevos oscilos a la base de datos.

Los archivos y datos de entrada necesarios para la ejecución son los descritos a continuación:

- Base de datos a la que añadir los nuevos oscilos.
- Ejecución de la que seleccionar el archivo de parámetros y a la que añadir los resultados obtenidos de la ejecución.
- Archivos de datos asociados a los oscilos nuevos que se desean añadir.
- Distancias reales donde han ocurrido las faltas reportadas por un técnico.
- Tensiones nominales de las líneas donde se han registrado las faltas a añadir.

A continuación se muestra un ejemplo donde se añaden 4 oscilos:

Base de datos a la que añadir nuevos oscilos

 C:\Users\Paula\Documents\UNI\TFM\GSC\DB

Seleccionar ejecución a la que añadir los nuevos oscilos

 C:\Users\Paula\Documents\UNI\TFM\GSC\LOC_20230514205452

Seleccionar archivo '.dat' de los oscilos a añadir

Visualizar (S/N)	Oscilo	Protección	Fecha	Hora	Distancia Real (km)	Tensión Nominal
<input checked="" type="checkbox"/>	PL300E1TZ11ZT1001	70564	2017/03/29	20:12:29	7.4	13
<input checked="" type="checkbox"/>	PL300E1TZ11ZT1001	70564	2017/03/29	20:12:31	7.4	13
<input type="checkbox"/>	PL300E1TZ11ZT1001	70564	2017/03/29	20:12:52	7.4	13
<input checked="" type="checkbox"/>	PL300E1TZ11ZT1001	70564	2017/03/29	20:13:13	7.4	13



Figura 7.16: Módulo para agregar nuevos oscilos a la base de datos.

Como se observa en la Figura 7.16 en vez de mostrar el nombre completo del fichero de datos de los oscilos a añadir, para que sea más legible al usuario, se divide en función de los parámetros que contiene (Modelo del IED, identificador del IED en la red, fecha y hora de incidencia). Los dos últimos parámetros de la tabla los añade el usuario de forma manual y son, la distancia real y la tensión nominal.

Una vez añadidos todos los datos necesarios se inicia la ejecución. El primer paso que lleva a cabo el módulo cuando se inicia la ejecución es la generación automática de una base de datos únicamente con los oscilos seleccionados por el usuario. Para ello, el módulo genera una BD temporal en la raíz del sistema donde se almacenan todos los archivos de la forma descrita en la Subsección 7.1.3 y la Subsección 7.1.4. Cabe destacar que los archivos de entrada y de ajustes de cada uno de los oscilos los genera la aplicación de forma automática, ya que los recibidos no contienen la estructura necesaria para poder ser utilizados por el sistema experto LAYCA.

Al igual que en el módulo de ejecución de la base de datos, cuando finaliza la ejecución de LAYCA y del IED se genera una estructura igual a la descrita en la Subsección 7.3.1.

Tras generar la estructura se llama al módulo de visualización descrito en la Subsección 7.3.2 (Figura 7.17).

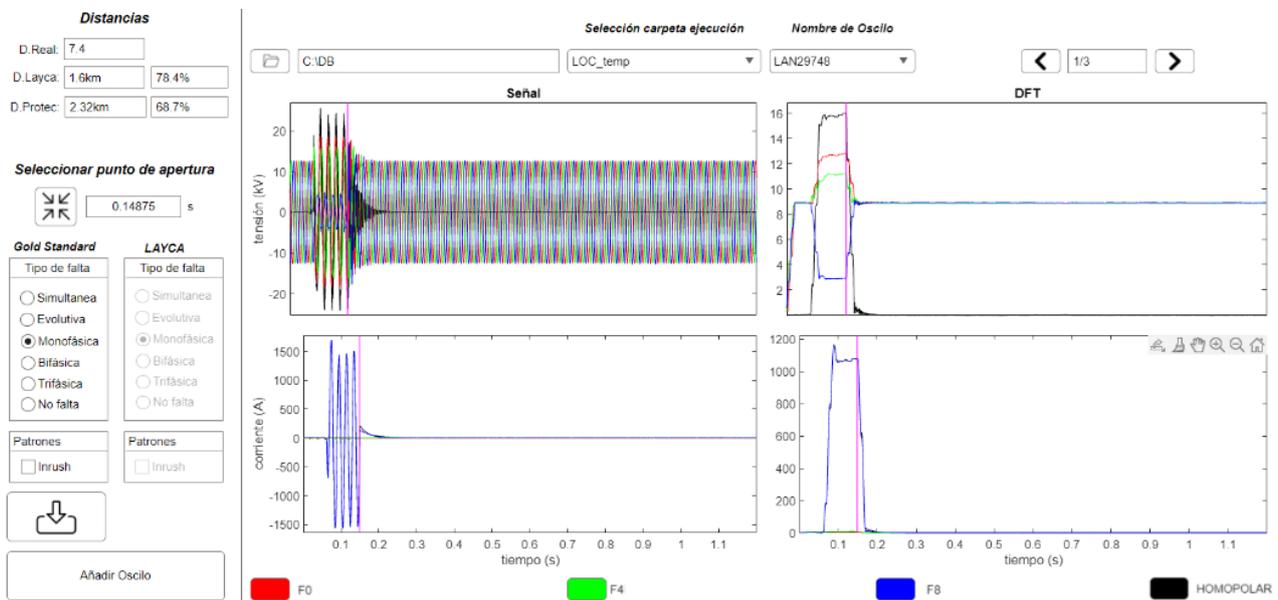


Figura 7.17: Módulo de visualización de nuevos oscilos.

Como se observa en la figura Figura 7.17, sobre el módulo de visualización se introducen 2 cambios. En primer lugar, se elimina el selector de validación y en segundo lugar, se introduce el botón de añadir oscilo. Cuando el usuario pulsa este último botón se llevan a cabo los tres pasos descritos a continuación:

1. Comprobación: Se comprueba a través del nombre generado para identificar al oscilo que este no está previamente alojado en la base de datos.
2. Agregar oscilo a la base de datos: Tras la comprobación, si el oscilo no está en la base de datos se copia la carpeta asociada al mismo de la base de datos temporal a la base de datos seleccionada inicialmente por el usuario.
3. Agregar resultados a la estructura de ejecución: Finalmente se copia la línea de la estructura de resultados temporal que corresponde al oscilo que se desea añadir a la estructura de ejecución seleccionada por el usuario.

Cuando se cierra la ventana de visualización se eliminan las carpetas generadas de forma temporal, es decir, la base de datos y la ejecución de los oscilos.

7.3.4 Módulo de generación de resultados

Este módulo tiene dos formas de funcionamiento dependiendo de lo que desee realizar el usuario. En primer lugar, permite sacar resultados genéricos para la base de datos al completo y en segundo lugar, permite obtener estadísticas para subconjuntos de datos más pequeños. A continuación se describe en detalle cada modo de funcionamiento:

Resultados estadísticos de la base de datos al completo

En este modo de funcionamiento se muestra una tabla con los resultados obtenidos de una ejecución de LAYCA para su análisis.

Cuando se inicia el panel se visualizan los datos asociados a la ejecución más reciente. En la tabla únicamente se muestran aquellos oscilos que en el módulo de visualización se han fijado como válidos.

En la Figura 7.18 se observan los resultados relativos a las siguientes columnas:

- **Características:** Se muestran las características más relevantes que puede presentar un oscilo divididas en los siguientes subconjuntos.
 - Total: Muestra los resultados de toda la base de datos en conjunto.
 - Tensión Nominal: Muestra las diferentes tensiones nominales que pueden tener los oscilos recibidos (13 kV, 15 kV, 20 kV, 30 kV, 45 kV y 66 kV.)
 - Tipo de falta: Hace referencia al tipo de falta que ha ocurrido. Esta información se extrae del *Gold Standard*.
 - Patrones: Se incluyen los tipos de patrones más relevantes que pueden darse dentro de cada uno de los oscilos (Inrush, tierra, cruzamiento, cable subterráneo, celda y vano).
 - Modelo de IED: Hace referencia al modelo de IED que ha registrado la falta (PL250, PL300, 7IDR, 3IDR).
- **Nº total:** Del conjunto total de oscilos cuántos de ellos corresponden a cada una de las características. En las líneas asociadas a las faltas no evolutivas (monofásica, bifásica y trifásica), además de mostrar las faltas detectadas de este tipo, se muestra si LAYCA ha clasificado alguna de forma errónea. Este proceso se lleva a cabo analizando, para cada oscilo, qué tipo de falta tiene asociada en el *Gold Standard* y se compara dicho valor con el obtenido en la ejecución de LAYCA.
- **Nº total (%):** Lo descrito en el punto anterior pero mostrado en porcentaje.
- **Nº Localizado:** Número total de oscilos que se han localizado para cada una de las características definidas.
- **Error algoritmo (%):** Se muestra el percentil 25, 50 y 75 del error que comete LAYCA en el cálculo de la distancia.
- **Error algoritmo (km):** Muestra lo mismo que en el caso anterior pero en kilómetros en vez de porcentaje.
- **Error final (%):** Se muestra el percentil 25, 50 y 75 del error que comete LAYCA en el cálculo de la distancia tras las correcciones.
- **Error final (km):** Muestra lo mismo que en la columna anterior pero en kilómetros en vez de porcentaje.
- **Error Protección (%):** Muestra el error que comete el IED en el cálculo de la localización.
- **Error Protección (km):** Muestra lo mismo que la columna anterior pero en kilómetros.

Características	Nº Total	Nº Total(%)	Nº Localizado	Error algoritmo(%)	Error algoritmo(km)	Error final(%)	Error final(km)	Error Proteccion(%)	Error Protección(km)
Total	252	100	154	13.2 (4.9 - 24.6)	0.86 (0.43 - 2.84)	7.5 (3.6 - 12)	0.56 (0.34 - 1.12)	22 (8.7 - 54.8)	1.75 (0.85 - 5.6)
Tension Nominal									
13 kV	141	56	63	7.2 (3.3 - 14.6)	0.66 (0.35 - 0.92)	9.8 (6.8 - 16.5)	0.67 (0.44 - 1.7)	11.5 (4.7 - 23.7)	0.99 (0.33 - 1.75)
15 kV	9	3.6	5	18.8 (8 - 36.3)	0.33 (0.15 - 2.37)	9.5 (7.2 - 12.6)	0.19 (0.16 - 0.74)	30.8 (24.7 - 47.8)	1.75 (0.49 - 3.08)
20 kV	102	40.5	86	19.2 (7.3 - 29.4)	1.61 (0.56 - 3.57)	5.8 (2.6 - 8.8)	0.46 (0.25 - 1.05)	40.1 (14.6 - 82.9)	3.25 (1.41 - 8.07)
30 kV	0	0	0						
45 kV	0	0	0						
66 kV	0	0	0						
Tipo de falta									
Simultanea (23)	23	9.13	6	6.4 (2.1 - 14.4)	0.5 (0.05 - 0.89)	6.8 (2.2 - 8.3)	0.32 (0.12 - 0.51)	41 (10.6 - 56.6)	0.89 (0.66 - 3.51)
Evolutiva (4)	4	1.6	4	15 (6.8 - 35.9)	0.7 (0.34 - 3.59)	12.3 (7 - 37.2)	0.54 (0.4 - 3.67)	53.3(25.6 - 190.5)	4.27 (0.95 - 13.25)
Mono-Bi	4	1.6	4	15 (6.8 - 35.9)	0.7 (0.34 - 3.59)	12.3 (7 - 37.2)	0.54 (0.4 - 3.67)	53.3 (25.6 - 190.5)	4.27 (0.95 - 13.25)
Mono-Tri	0	0	0						
Bi-Tri	0	0	0						
Mono-Bi-Tri	0	0	0						
No evolutiva	223	88.5	144	13.4 (5 - 25.4)	0.9 (0.5 - 2.9)	7.5 (3.5 - 12)	0.6 (0.3 - 1.1)	20.2 (8.4 - 54.2)	1.8 (0.9 - 5.5)
Mono (167)	167 (167,0,0,0)	66.3	134	13.5 (5.4 - 27.1)	0.98 (0.47 - 3.08)	7.6 (4.3 - 11.9)	0.58 (0.35 - 1.17)	18.3 (8 - 55)	1.89 (0.85 - 7.21)
Bi (10)	10 (0,10,0,0)	4	7	15.6 (5.5 - 16.3)	0.68 (0.58 - 0.71)	15.6 (2 - 16.3)	0.64 (0.13 - 0.67)	33.1 (32.2 - 36.6)	1.5 (1.33 - 3.21)
Tri (3)	3 (0,0,3,0)	1.2	3	3.3 (0.9 - 3.5)	0.1 (0.03 - 0.28)	2.1 (0.6 - 3)	0.1 (0.03 - 0.18)	6 (4.4 - 28.2)	0.17 (0.11 - 2.6)
Indeterminado (43)	43 (0,0,0,43)	17.1	0						
Patrones									
Inrush	12	4.8	2	25.3 (24.5 - 26.2)	3.57 (3.52 - 3.62)	5.9 (5.4 - 6.4)	0.83 (0.73 - 0.94)	42.8 (28.6 - 57)	5.94 (4.23 - 7.65)
Tierra	189	75	147	13.1 (5 - 25.7)	0.89 (0.44 - 2.91)	7.5 (4.1 - 11.6)	0.55 (0.34 - 1.16)	20 (8.3 - 55.1)	1.86 (0.81 - 6.82)
Cruzamiento	0	0	0						
Cable Subterráneo	6	2.4	1	22.8 (22.8 - 22.8)	2.83 (2.83 - 2.83)	0.8 (0.8 - 0.8)	0.1 (0.1 - 0.1)	5.1 (5.1 - 5.1)	0.64 (0.64 - 0.64)
Celda	3	1.2	3	3.3 (1.6 - 3.5)	0.1 (0.07 - 0.28)	3.3 (2.4 - 5.8)	0.21 (0.12 - 0.32)	6 (3.2 - 28.2)	0.17 (0.13 - 2.6)
Vano	5	2	5	16.2 (12.2 - 16.6)	0.66 (0.49 - 0.68)	16.2 (12.2 - 16.6)	0.66 (0.49 - 0.68)	36.4 (32.9 - 39)	1.36 (1.28 - 1.5)
Modelo de Protección									
PL250	135	53.6	59	6.8 (3.2 - 14.4)	0.68 (0.34 - 0.95)	9.5 (7.2 - 17.1)	0.71 (0.45 - 2.22)	10.6 (4 - 20.2)	0.96 (0.28 - 1.75)
PL300	14	5.6	10	15.9 (12.1 - 17.4)	0.69 (0.64 - 0.8)	10.3 (6.6 - 16.2)	0.52 (0.19 - 0.66)	27.8 (18.4 - 33.1)	1.34 (1.13 - 1.5)
3IDR	19	7.5	14	10.1 (4 - 17.4)	0.53 (0.47 - 0.69)	8.9 (3.1 - 13.2)	0.49 (0.21 - 1.51)	82.8 (50.2 - 123.2)	5.45 (4.76 - 9.85)
7IDR	84	33.3	71	22.6 (8.5 - 30)	2.64 (0.59 - 3.92)	5.2 (2.3 - 8.1)	0.45 (0.26 - 0.94)	36.8 (12.1 - 56.9)	3.07 (1.31 - 7.47)

Figura 7.18: Tabla de resultados globales de la base de datos.

Resultados estadísticos parciales en función de las características seleccionadas

En este modo de funcionamiento se ofrecen distintas opciones de gráficas para visualizar los resultados (Figura 7.19).

C:\Users\Paula\Documents\UNITFM\GSC
LOC_20230525114457 ▼

Seleccionar que tipo de gráfico se desea visualizar:

Gráfico circular

Diagrama de caja

Diagrama de barras

Gráfico de dispersión

Figura 7.19: Selector gráficas para resultados parciales.

En función del tipo de gráfica seleccionada se analizan los errores que comenten distintos subconjuntos de datos. A continuación se describe cada una de ellas:

- **Diagrama circular:** En el diagrama circular se muestra el porcentaje de oscilos que comenten

un error (fijado dentro de unos rangos) frente al total.

Este tipo de gráfico se emplea para visualizar los errores cometidos por los IEDs, por el algoritmo de LAYCA o por el mismo tras las correcciones y así conocer la mejora en la precisión que presenta el sistema experto desarrollado. El error se analiza en porcentaje.

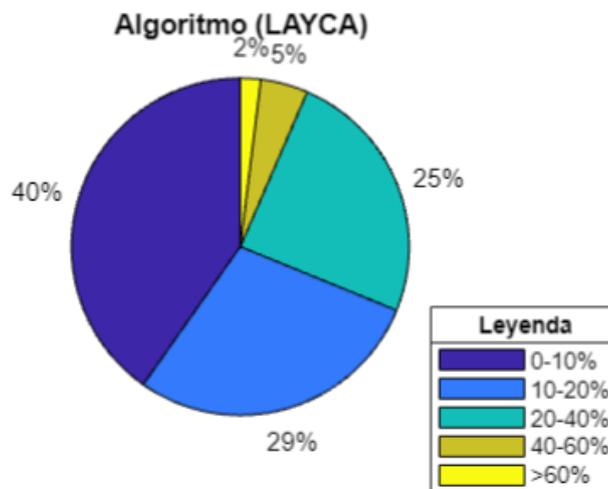


Figura 7.20: Ejemplo de diagrama circular donde se representa los errores cometidos por el algoritmo de LAYCA.

- **Diagrama de caja (*Boxplot*):** Este tipo de gráfico permite conocer como se distribuyen los datos de error de cada una de las características de la base de datos. En él se muestra la mediana de los datos junto con los cuartiles.

Este diagrama se emplea para ver la variación que presenta el error cometido en el cálculo de la distancia en función del algoritmo para cada una de las características de los oscilos disponibles. Este diagrama permite analizar el error en porcentaje y en kilómetros.

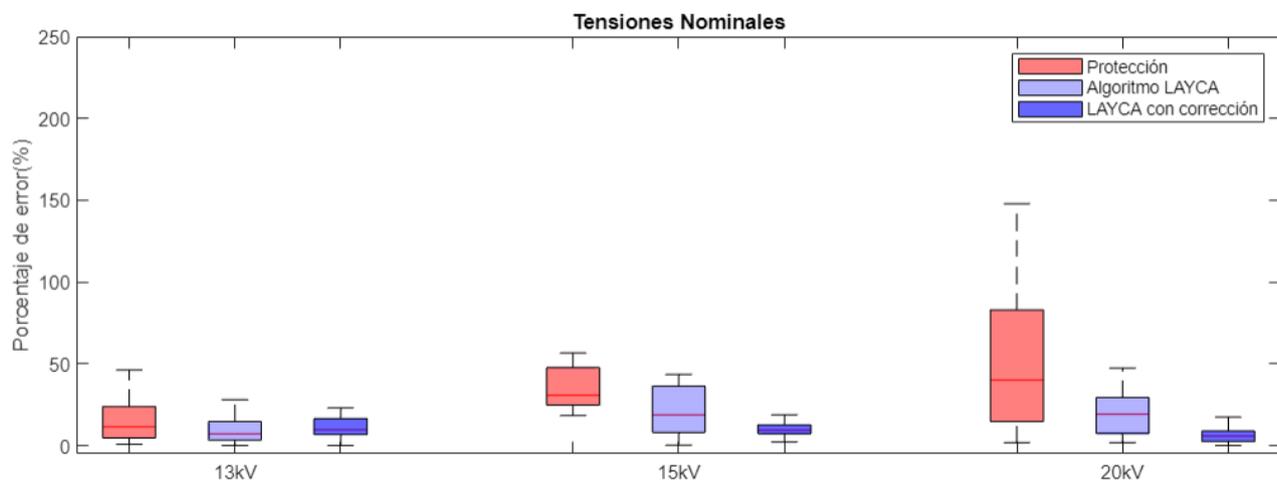


Figura 7.21: Ejemplo de diagrama de caja para las distintas tensiones nominales.

- **Diagrama de barras:** El diagrama de barras tiene una funcionalidad similar a la del diagrama circular pero, en vez de emplearse para el conjunto de la base de datos, se muestra cada una de las características por separado, pudiendo analizar como se comporta cada algoritmo con cada una de ellas. El análisis de error se puede realizar tanto en porcentaje como en kilómetros.

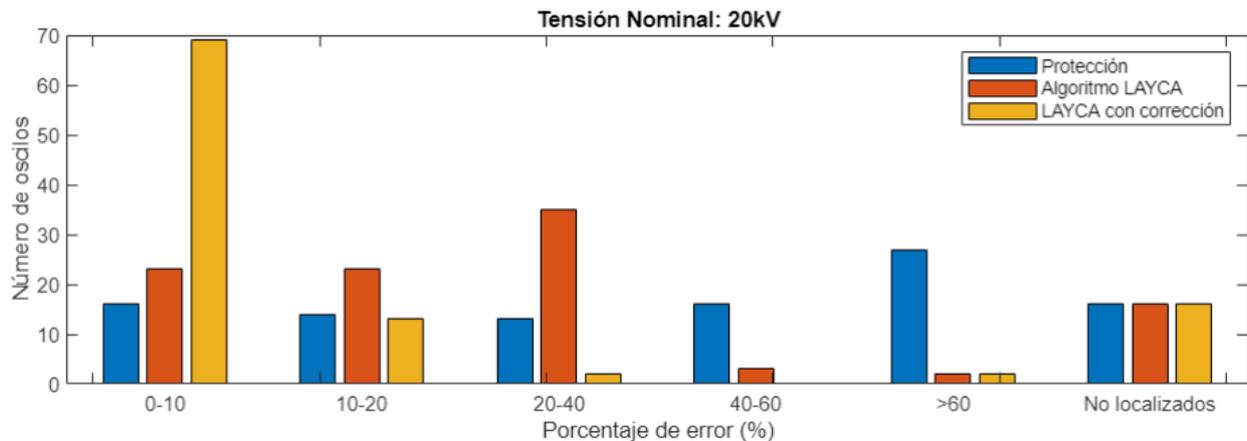


Figura 7.22: Ejemplo de diagrama de barras para el subconjunto de datos cuya tensión nominal es de 13 kV (Error mostrado en porcentaje).

- **Diagrama de dispersión:** Este tipo de gráfica se emplea para conocer si existe alguna relación o correlación entre los datos mostrados en cada uno de los ejes. Al igual que el diagrama de barras permite analizar cada una de las características por separado. Estas gráficas se emplean para representar el error cometido frente a la distancia real o frente a la duración de la falta.

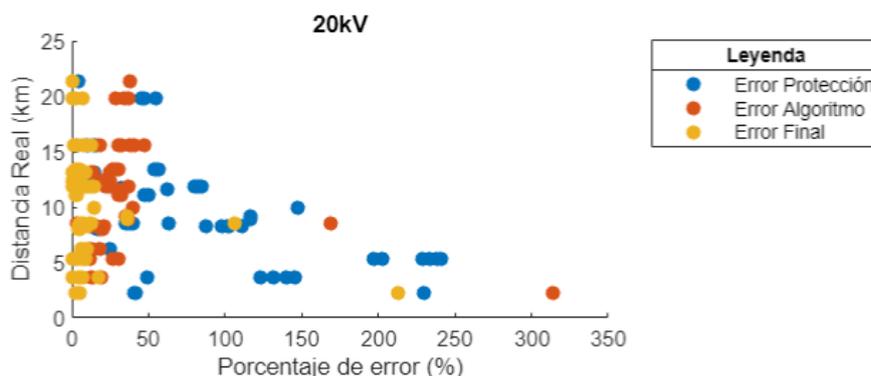


Figura 7.23: Ejemplo de diagrama de dispersión para el subconjunto de datos cuya tensión nominal es de 20 kV (Porcentaje de error frente a distancia real).

7.3.5 Exportar la aplicación

Una vez comprobado el correcto funcionamiento de la aplicación se procede a diseñar un instalador de la misma para poder ser utilizada en diferentes ordenadores, siempre y cuando estos dispongan de una licencia de MATLAB vigente.

Este instalador se genera desde el módulo principal de la aplicación. Para ello se tienen que pulsar los botones *Designer>Share>MATLAB App*, y se abre el módulo mostrada en la Figura 7.24.

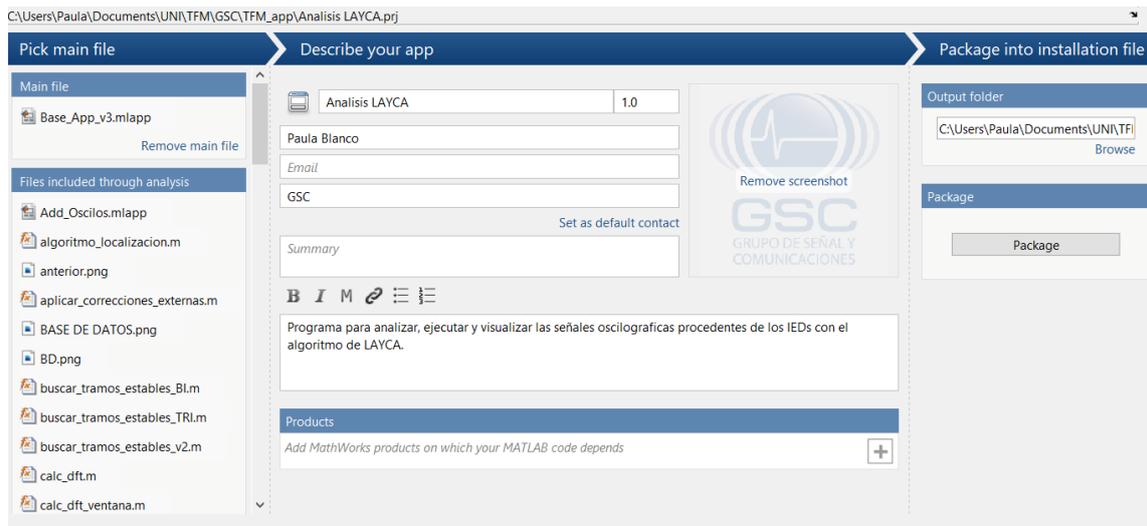


Figura 7.24: Proceso para generar el instalador de la aplicación.

Para que el instalador se genere de forma correcta, en la parte izquierda del módulo deberán aparecer todas las funciones empleadas para su funcionamiento así como imágenes o el resto de módulos necesarios. La zona central del módulo sirve para asignar el nombre a la aplicación, su icono y una breve descripción de la misma.

Finalmente, en la parte derecha se debe seleccionar la carpeta donde se desea almacenar el instalador y si se pulsa el botón *Package* se genera el instalador cuya extensión es *.mlappinstall*.

8. Descripción y análisis de resultados

En este capítulo se analizan los resultados obtenidos del procesado realizado sobre la BD descrita en la metodología del Capítulo 7. A partir de las distancias calculadas por LAYCA y por los IEDs se obtienen las desviaciones con respecto a la distancia real anotada para cada oscilo. Con los errores calculados del sistema experto LAYCA se analiza la mejora en la precisión de la localización de la falta, para ello se compara los errores cometidos por el sistema experto y los cometidos por los distintos modelos de IEDs. Dichos errores se calculan de la siguiente forma:

$$error(\%) = \frac{DistanciaReal - DistanciaCalculada}{DistanciaReal} \cdot 100 \quad (12)$$

Del total de la base de datos, 252 oscilos, LAYCA calcula distancias para el 61 % de los oscilos (154). Como el objetivo de este proyecto es analizar la precisión del sistema experto LAYCA, solo se analizan las distancias ofrecidas por los IEDs para aquellos oscilos en los que LAYCA ha ofrecido un resultado.

Para las distancias calculadas, la mediana del error cometido por los IEDs es de un 22 % frente a la mediana del error cometido por el algoritmo de LAYCA (13.2 %) además, tras las correcciones el sistema experto logra reducir el valor de la mediana del error en 5.7 puntos porcentuales alcanzando un 7.5 %.

En la Figura 8.1 se representan los porcentajes de errores cometidos por los IEDs, el algoritmo de LAYCA y el mismo tras las correcciones, también conocido como LAYCA final. Por un lado, analizando los errores inferiores al 10 % se puede ver que LAYCA, tras aplicar las correcciones, mejora los resultados de los IEDs en 39 puntos porcentuales. Por otro lado, se puede ver que los IEDs cometen un error superior al 60 % para el 12 % de las distancias calculadas en cambio, con LAYCA únicamente se supera el 60 % de error para el 2 % de las distancias calculadas.

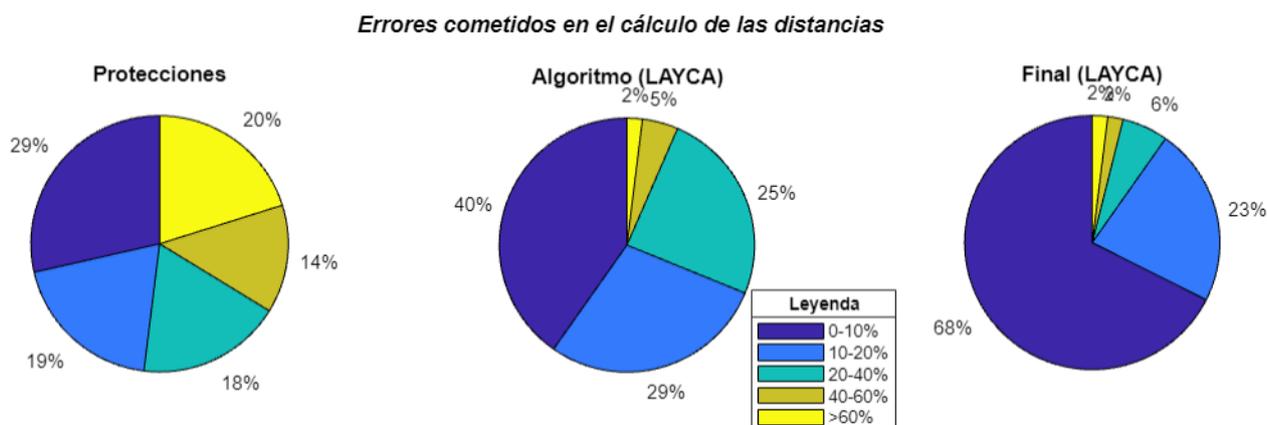


Figura 8.1: Porcentaje de error cometido por los IEDs y LAYCA.

Del anterior análisis se concluye que haciendo uso del sistema experto LAYCA la precisión en la localización de la falta es mucho mayor que la ofrecida por los IEDs empleados hoy en día en la red.

A continuación se analizan los errores cometidos en el cálculo de las distancias en función de 3 características:

- **Tensión nominal**

Los resultados de la Tabla 8.1 representan los resultados obtenidos distribuidos en función de la tensión nominal de la línea.

Tensión Nominal	Nº total	Nº localizado	Error Algoritmo (%)	Error Final (%)	Error IED (%)
13 kV	141	63	7.2 (3.3-14.6)	9.8 (6.8-16.5)	11.5 (4.7-23.7)
15 kV	9	5	18.8 (8-36.3)	9.5 (7.2-12.6)	30.8 (24.7-47.8)
20 kV	102	86	19.2 (7.3-29.4)	5.8 (2.6-9.9)	40.1 (14.6-82.9)

Tabla 8.1: Mediana, percentil 25 y percentil 75 de los errores en función de las tensiones nominales.

En primer lugar, del conjunto total de la base de datos, el 55.9 % de los oscilos se han registrado en líneas cuya tensión nominal es de 13 kV (141 oscilos). El sistema experto LAYCA ha sido capaz de ofrecer una localización de falta al 44 % de los oscilos disponibles para dicha tensión (63). Como se puede observar la mediana del error cometido por el algoritmo (7.2 %) es inferior a la del IED (11.5 %). En cambio cuando se introducen las correcciones el valor de la mediana del error aumenta significativamente (9.8 %). Esto se puede ver en detalle en la Figura 8.2, donde el número de oscilos cuyo error es inferior al 10 % disminuye de 38 a 32 tras aplicar las correcciones al algoritmo de LAYCA. Se concluye por tanto que las correcciones empleadas no son idóneas para aquellos oscilos cuya tensión nominal es de 13 kV.

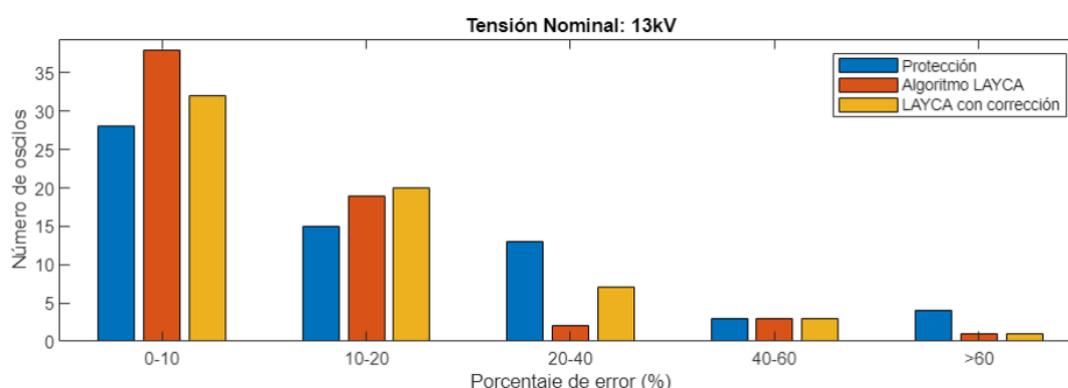


Figura 8.2: Porcentajes de error para tensiones nominales 13 kV.

En segundo lugar, de las líneas cuya tensión nominal es 15 kV únicamente se dispone de 9 oscilos (3 % de la base de datos), de los cuales LAYCA solo calcula la distancia para 5 de ellos. La mediana del error cometido por los IEDs en este caso es del 30.8 %, en cambio, LAYCA una vez aplicadas las correcciones reduce este valor en 20 puntos, alcanzando un 9.5 % de mediana de error. En esta situación, debido al número reducido de oscilos disponibles, los resultados obtenidos no son concluyentes.

Finalmente, los oscilos cuya tensión nominal es de 20 kV representan el 40 % de la base de datos (102 oscilos). LAYCA ofrece resultados para el 84.3 % de ellos, es decir, 86 oscilos. La mediana del error cometido por los IEDs en esta situación es del 40.1 %. El algoritmo de LAYCA disminuye dicho valor a más de la mitad (19.2 %) y, gracias al uso de las correcciones,

el valor de la mediana se reduce aún más llegando a un 5.8 %.

En la Figura 8.3 se pueden ver los errores cometidos en el cálculo de las distancias. Los oscilos cuyos errores cometidos por los IEDs son inferiores al 10 % suman un total de 16. Haciendo uso del algoritmo de LAYCA ese valor aumenta hasta los 23 oscilos. Finalmente, si se aplican las corrección el número de oscilos que alcanzan como máximo un 10 % de error suman un total de 69. Este valor triplica el ofrecido por los IEDs suponiendo una importante mejora en la localización de la falta.

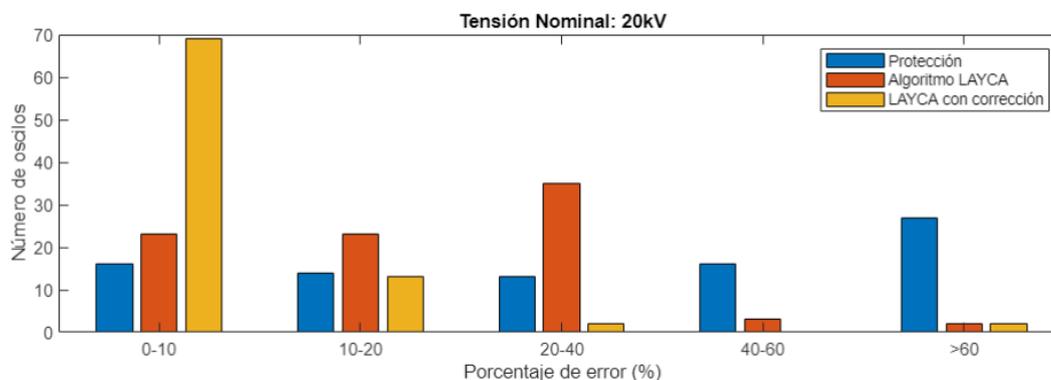


Figura 8.3: Porcentajes de error para tensiones nominales 20 kV.

De los resultados analizados se puede concluir que las correcciones aplicadas al algoritmo de LAYCA no funcionan de la misma forma para todas las tensiones nominales. Por lo tanto, lo idóneo sería generar distintas correcciones para cada valor de tensión nominal disponible.

- **Tipo de falta**

A continuación se muestra el análisis de los errores en función del tipo de falta detectada por LAYCA.

Tipo de falta	Nº total	Nº localizado	Error Algoritmo (%)	Error Final (%)	Error IED (%)
Simultánea	23	6	6.4 (2.1-14.4)	6.8 (2.2-8.3)	41 (10.6-56.6)
Evolutiva (Mono-Bi)	4	4	15 (6.8-35.9)	12.3 (7-37.2)	53.3 (25.6-190.5)
Monofásica	167	134	13.5 (5.4-27.1)	7.6 (4.3-11.9)	18.3 (8-55)
Bifásica	10	7	15.6 (5.5-16.3)	15.6 (2-16.3)	33.1 (32.2-36.6)
Trifásica	3	3	3.3 (0.9-3.5)	2.1 (0.6-3)	6 (4.4-28.2)

Tabla 8.2: Mediana, percentil 25 y percentil 75 de los errores en función del tipo de falta.

En primer lugar, LAYCA define como simultáneos 23 oscilos. De este total ofrece distancias al 26.1 %, suponiendo esto 6 oscilos. Para estos 6 oscilos, la mediana del error cometido por los IEDs es de un 41 %. El resultado de la mediana calculada haciendo uso del algoritmo de LAYCA disminuye en 34,6 puntos porcentuales suponiendo una importante reducción del error. Continuando con el procedimiento de cálculo establecido, tras aplicar las correcciones al algoritmo de LAYCA se obtiene que el valor de la mediana del error es de un 6.8 %. Como se puede observar, este ultimo valor empeora ligeramente los resultados obtenidos pero, si se analiza el percentil 25 y 75, conocido como rango intercuartil, se puede ver que la dispersión

presentada por los errores cometidos en el cálculo de las distancias tras aplicar las correcciones al algoritmo de LAYCA es menor que en el caso de no aplicarlas. En la Figura 8.4 se muestra un diagrama de caja (*boxplot*) representando los valores de mediana, percentil 25 y percentil 75 del algoritmo de LAYCA y de este mismo tras aplicar las correcciones donde se confirma lo mencionado previamente.

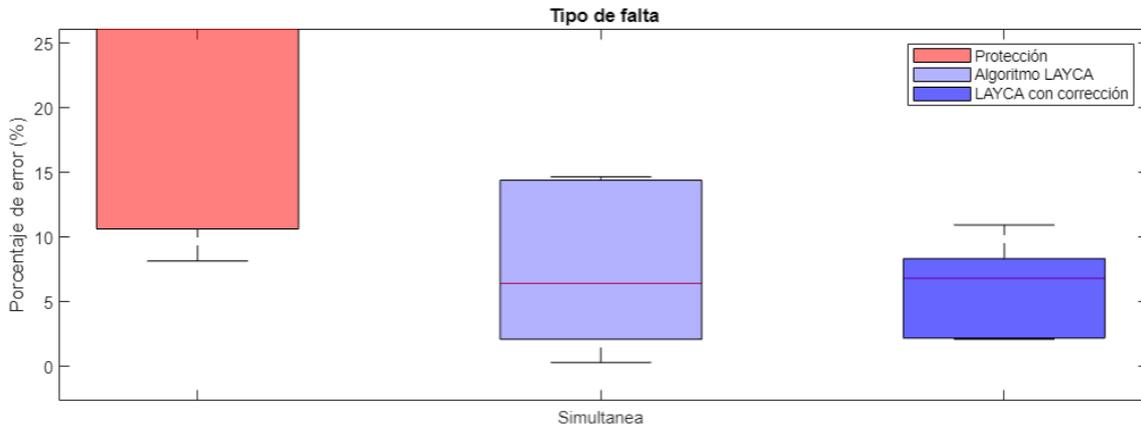


Figura 8.4: Diagrama de caja del error de las faltas simultáneas.

Algo similar ocurre con las faltas detectadas como bifásicas. Al comparar los resultados obtenidos por los IEDs y el algoritmo de LAYCA se puede ver que la mediana del error cometido se reduce a más de la mitad (de 33.1 % a 15.6 %). Sin embargo, cuando se aplican las correcciones los resultados obtenidos son iguales a los ofrecidos por el algoritmo de LAYCA. En cambio, como se puede ver en la Figura 8.5, si se analiza el percentil 25 y el valor mínimo de los dos resultados ofrecidos por LAYCA se puede ver que sus valores disminuyen cuando se aplican las correcciones indicando esto que parte de los errores cometidos en el cálculo de las distancias han reducido su valor.

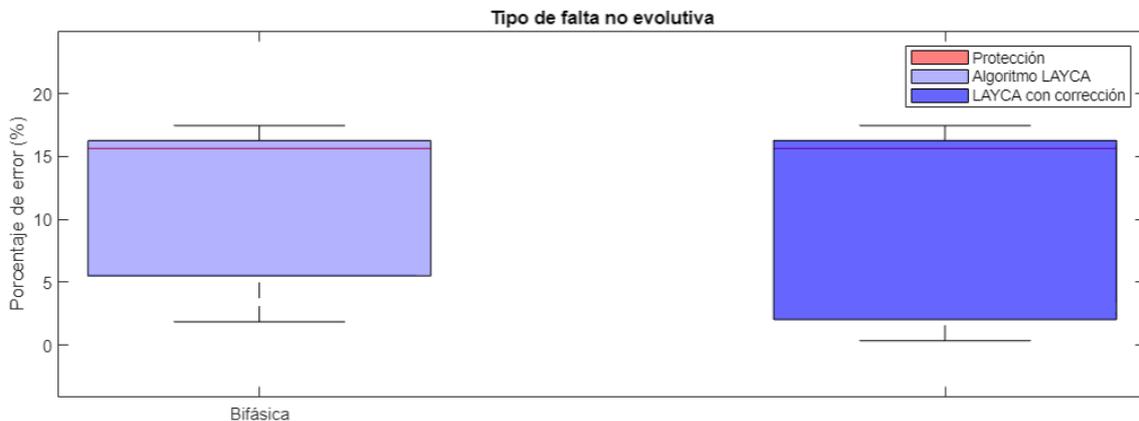


Figura 8.5: Diagrama de caja del error cometido por LAYCA de las faltas bifásicas.

Los tres tipos de falta restantes (evolutiva, monofásica y trifásica) presentan el comportamiento esperado. Es decir, los resultados obtenidos por LAYCA tras las correcciones presentan una mediana de error inferior a la obtenida tanto por el IED como por el algoritmo de LAYCA.

- **Modelo del IED**

En la Tabla 8.3 se muestran los errores en función del modelo de protección empleado. Como

se observa, los resultados obtenidos por LAYCA para los oscilos grabados por el IED 7IRD son los más exactos presentando una mediana del error de un 5.2 %.

Las variaciones en la precisión debido al tipo de IED empleado pueden deberse a las variables almacenadas en el archivo de ajuste de cada uno de ellos.

Modelo del IED	Nº total	Nº localizado	Error Algoritmo (%)	Error Final (%)	Error IED (%)
PL250	135	59	6.8 (3.2-14.4)	9.5 (7.2-17.1)	10.6 (4-20.2)
PL300	14	10	15.9 (12.1-17.4)	10.3 (6.6-16.2)	27.8 (18.4-33.1)
3IRD	19	14	10.1 (4-17.4)	8.9 (3.1-13.2)	82.8 (50.2-123.2)
7IRD	84	71	22.6 (8.5-30)	5.2 (2.3-8.1)	36.8 (12.1-56.9)

Tabla 8.3: Mediana, percentil 25 y percentil 75 de los errores en función del modelo de la protección.

Por último se realiza un análisis exclusivo de los resultados de LAYCA final (tras las correcciones), estudiando si existe alguna relación entre diferentes parámetros. Este análisis se realiza a través del coeficiente de determinación, también llamado R cuadrado, que indica si existe alguna relación lineal entre los dos parámetros objeto de estudio. Cuanto mayor es el valor de dicho parámetro, mayor es la relación existente.

- En primer lugar, se analiza si existe relación alguna entre la distancia real y el error cometido en el cálculo de la distancia por LAYCA final. El valor obtenido para el coeficiente de determinación es de 0.0073 indicando que no existe relación alguna entre dichas variables. La regresión lineal obtenida del cálculo desarrollado se muestra en la Figura 8.6.

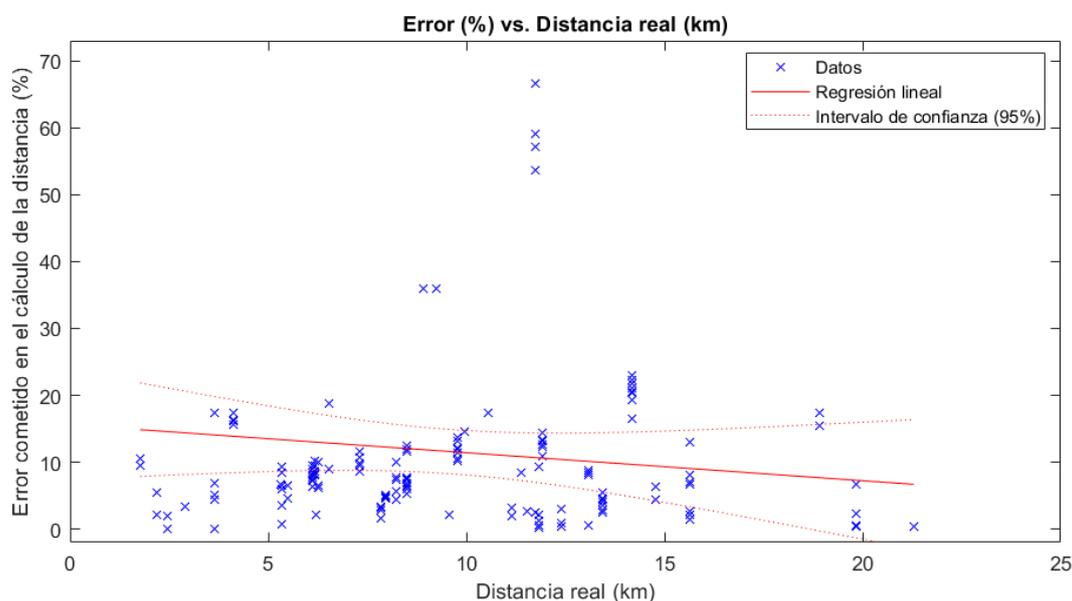


Figura 8.6: Representación de la regresión lineal para los parámetros de distancia real y de error cometido en el cálculo de la distancia por LAYCA.

- En segundo lugar, se analiza si existe relación entre la duración del segmento empleado por LAYCA para el cálculo de la distancia y el error cometido por LAYCA tras las correcciones. El valor del coeficiente de determinación obtenido es de 0.00255, indicando que entre dichas

variables no existe relación. La regresión lineal obtenida de dicho cálculo se muestra en la Figura 8.7.

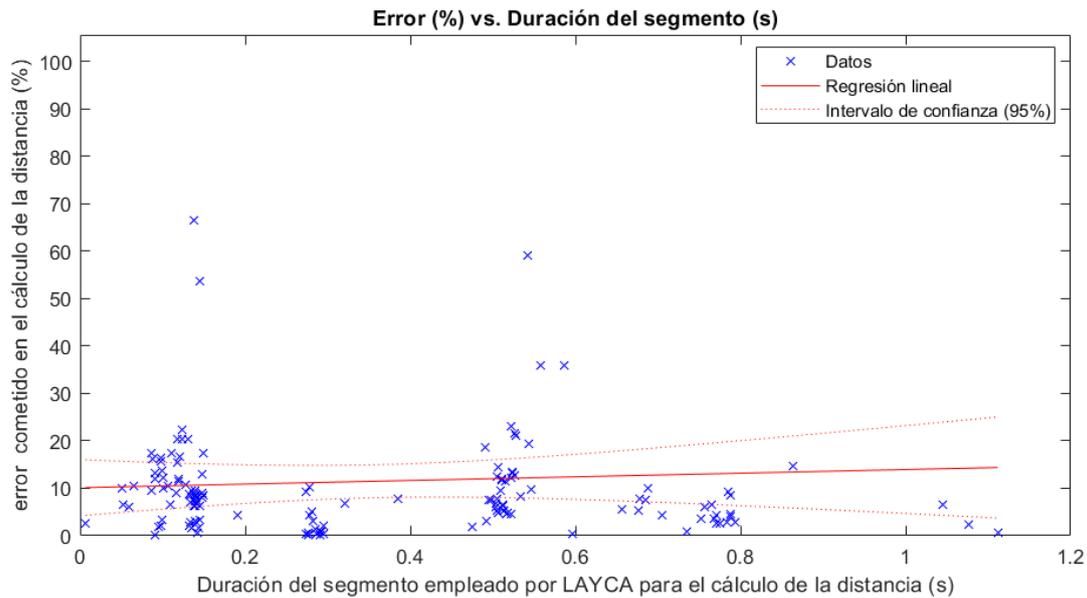


Figura 8.7: Representación de la regresión lineal para los parámetros de duración del segmento empleado para el cálculo de la distancia por LAYCA y el error cometido en dicho cálculo.

9. Planificación del proyecto

9.1 Grupo de trabajo

Nombre y Apellido	Identificador	Cargo
Gutiérrez, José Julio	D.1	Director del proyecto
Redondo, Koldo	I.1	Investigador de la Univeridad
Blanco, Paula	A.1	Desarrolladora del proyecto (Alumna)

Tabla 9.1: Equipo de trabajo.

Las funciones específicas de cada uno de los cargos dentro de este proyecto son las siguientes:

- **Director el proyecto:**
 - Propuesta
 - Planificación
 - Dirección
- **Investigador de la Universidad:**
 - Formar a la alumna en lo relativo al proyecto
 - Supervisión
- **Alumna/Desarrolladora del proyecto:**
 - Desarrollo
 - Redacción

9.2 Fases del proyecto

En el desarrollo de un proyecto, la planificación es de gran importancia ya que permite llevar a cabo una buena organización y un control de los tiempos en el transcurso del mismo.

La planificación se divide en paquetes de trabajo (PT) que comprenden el conjunto completo del proyecto. Cada PT está dividido en:

- **Tareas (T):** Acciones a realizar para completar el paquete de trabajo.
- **Hitos (H):** Se trata de instantes específicos dentro del desarrollo del proyecto que sirven para comprobar si la ejecución del proyecto está siendo conforme a la previsión inicial.

A continuación se describen las fases seguidas para el desarrollo del proyecto:

Paquete de trabajo 1 (P.T.1): Propuesta y definición del proyecto 26-9-2022/27-9-2022

T.1.1: Propuesta y discusión del proyecto

- **Descripción:** Presentación de varias propuestas de proyecto para su posterior selección, discusión y reformulación.

- **Fecha de inicio:** 26-9-2022.
- **Fecha final:** 26-9-2022.
- **Recursos técnicos:** Ordenador y sala de reuniones.
- **Recursos humanos:** Director (4h), Investigador de Universidad (4h) y Alumna (4h).

T.1.2: Definición de alcance y objetivos del proyecto

- **Descripción:** Definición del alcance del proyecto y los objetivos a cumplir.
- **Fecha de inicio:** 27-9-2022.
- **Fecha final:** 27-9-2022.
- **Recursos técnicos:** Ordenador, Word, proyector y sala de reuniones.
- **Recursos humanos:** Director (4h), Investigador de Universidad (4h) y Alumna (4h).

H.1: Inicio del desarrollo del proyecto

Paquete de trabajo 2 (P.T.2): Formación 28-9-2022/10-10-2022

T.2.1: Formación presencial sobre LAYCA

- **Descripción:** Formación ofrecida por el investigador de la Universidad para conocer el funcionamiento de la herramienta LAYCA.
- **Fecha de inicio:** 28-9-2022.
- **Fecha final:** 6-10-2022.
- **Recursos técnicos:** Ordenador, MATLAB, proyector y sala de reuniones.
- **Recursos humanos:** Investigador de la Universidad (14h) y Alumna (14h).

T.2.2: Visita a Iberdrola

- **Descripción:** Visita a Iberdrola para conocer los dispositivos y herramientas empleadas para el desarrollo del proyecto así como para recopilar datos para su posterior análisis.
- **Fecha de inicio:** 30-9-2022.
- **Fecha final:** 30-9-2022.
- **Recursos técnicos:** Ordenador y sala de reuniones.
- **Recursos humanos:** Director (5h), Investigador de la Universidad (5h) y Alumna (5h).

T.2.3: Formación sobre APP Designer

- **Descripción:** Formación necesaria para el posterior desarrollo de la aplicación.
- **Fecha de inicio:** 3-10-2022.
- **Fecha final:** 10-10-2022.
- **Recursos técnicos:** Ordenador y MATLAB.
- **Recursos humanos:** Alumna (24h).

T.2.4: Lectura de documentación

- **Descripción:** Lectura de artículos y documentos relacionados con el proyecto a desarrollar para obtener los conocimientos necesarios.
- **Fecha de inicio:** 27-9-2022.

- **Fecha final:** 10-10-2022.
- **Recursos técnicos:** Ordenador.
- **Recursos humanos:** Alumna (10h).

H.2: Definición de objetivos

Paquete de trabajo 3 (P.T.3): Recopilación de datos 11-10-2022/21-10-2022

T.3.1: Definición de la estructura de la base de datos (BD)

- **Descripción:** Toma de decisiones relacionada con la optimización de la estructura de archivos.
- **Fecha de inicio:** 11-10-2022.
- **Fecha final:** 11-10-2022.
- **Recursos técnicos:** Ordenador, MATLAB, y proyector.
- **Recursos humanos:** Investigador de la Universidad (2h) y Alumna (2h).

T.3.2: Desarrollo de la función para crear la base de datos (DB)

- **Descripción:** Desarrollo de una función en MATLAB que permita crear la BD de forma automática.
- **Fecha de inicio:** 13-10-2022.
- **Fecha final:** 21-10-2022.
- **Recursos técnicos:** Ordenador y MATLAB.
- **Recursos humanos:** Alumna (21h).

H.3: Estudio de la BD

Paquete de trabajo 4 (P.T.4): Maquetado de la aplicación 24-10-2022/25-10-2022

T.4.1: Definir los módulos de la aplicación

- **Descripción:** Definición de la estructura de módulos genérica de la aplicación a desarrollar para que sea intuitiva para el usuario.
- **Fecha de inicio:** 24-10-2022.
- **Fecha final:** 24-10-2022.
- **Recursos técnicos:** Ordenador.
- **Recursos humanos:** Alumna (4h).

T.4.2: Definir las funciones de cada uno de los módulos

- **Descripción:** Definición de funcionalidades asociadas a cada uno de los módulos.
- **Fecha de inicio:** 25-10-2022.
- **Fecha final:** 25-10-2022.
- **Recursos técnicos:** Ordenador.
- **Recursos humanos:** Alumna (4h).

H.4: Bocetos de la aplicación.

**Paquete de trabajo 5 (P.T.5): Diseño del funcionamiento de la Protección
20-10-2022/15-11-2022**

T.5.1: Definición del funcionamiento del IED

- **Descripción:** Estudio, discusión y definición del funcionamiento del IED.
- **Fecha de inicio:** 20-10-2022.
- **Fecha final:** 20-10-2022.
- **Recursos técnicos:** Ordenador y MATLAB.
- **Recursos humanos:** Directo (1h), Investigador de Universidad (1h) y Alumna (3h).

T.5.2: Desarrollo de la función del IED

- **Descripción:** Desarrollo de una función en MATLAB que implemente el funcionamiento del IED de la forma definida.
- **Fecha de inicio:** 21-10-2022.
- **Fecha final:** 7-11-2022.
- **Recursos técnicos:** Ordenador y MATLAB.
- **Recursos humanos:** Alumna (22h).

T.5.3: Definir puntos de apertura

- **Descripción:** Del conjunto de la base de datos, se definen los puntos de apertura de cada uno de los oscilos para poder calcular la distancia que define el IED.
- **Fecha de inicio:** 8-11-2022.
- **Fecha final:** 15-11-2022.
- **Recursos técnicos:** Ordenador y MATLAB.
- **Recursos humanos:** Director (2h), Investigador de la Universidad (5h) y Alumna (5h).

H.5: Comprobar el correcto funcionamiento de la función de los IEDs.

**Paquete de trabajo 6 (P.T.6): Desarrollo de la aplicación
16-11-2022/3-5-2023**

T.6.1: Desarrollo del módulo principal.

- **Descripción:** Desarrollo del módulo principal de la aplicación.
- **Fecha de inicio:** 16-11-2022.
- **Fecha final:** 18-11-2022.
- **Recursos técnicos:** Ordenador y MATLAB.
- **Recursos humanos:** Alumna (4h).

T.6.2: Desarrollo del módulo de ejecución.

- **Descripción:** Desarrollo del módulo de ejecución. Se deben definir los parámetros de entrada y de salida y fijar las funciones asociadas.
- **Fecha de inicio:** 21-11-2022.
- **Fecha final:** 19-12-2022.
- **Recursos técnicos:** Ordenador y MATLAB.
- **Recursos humanos:** Investigador de la Universidad (1h) y Alumna (48h).

T.6.3: Desarrollo del módulo de visualización de oscilos.

- **Descripción:** Desarrollo del módulo de visualización. Se debe definir los archivos de entrada y los que se verán afectados por cambios llevados a cabo por el usuario.
- **Fecha de inicio:** 20-12-2022.
- **Fecha final:** 19-1-2023.
- **Recursos técnicos:** Ordenador y MATLAB.
- **Recursos humanos:** Investigador de la Universidad (1h) y Alumna (92h).

T.6.4: Desarrollo del módulo de gestión de la base de datos.

- **Descripción:** Desarrollo del módulo de gestión de la base de datos. Se deben seleccionar los archivos de entrada así como las carpetas generadas y las variables a modificar.
- **Fecha de inicio:** 20-1-2023.
- **Fecha final:** 6-3-2023.
- **Recursos técnicos:** Ordenador y MATLAB.
- **Recursos humanos:** Investigador de la Universidad (2h) y Alumna (172h).

T.6.5: Desarrollo del módulo de gestión de resultados.

- **Descripción:** Desarrollo del módulo de gestión de resultados. Se definen que variables son necesarias para cada una de las gráficas y tablas que se desarrollan.
- **Fecha de inicio:** 7-3-2023.
- **Fecha final:** 28-4-2023.
- **Recursos técnicos:** Ordenador y MATLAB.
- **Recursos humanos:** Investigador de la Universidad (6h) y Alumna (128h).

H.6: Comprobación del correcto funcionamiento de la aplicación**Paquete de trabajo 7 (P.T.7): Análisis de resultados
2-5-2023/5-5-2023***T.7.1: Análisis de resultados*

- **Descripción:** Análisis de resultados globales y parciales del sistema experto LAYCA para conocer la mejora que ofrece.
- **Fecha de inicio:** 2-5-2023.
- **Fecha final:** 5-5-2023.
- **Recursos técnicos:** Ordenador, MATLAB, y proyector.
- **Recursos humanos:** Director (9h), Investigador de la Universidad (9h) y Alumna (9h).

**Paquete de trabajo 8 (P.T.8): Redacción de memoria
17-4-2023/5-6-2023***T.8.1: Redacción del documento*

- **Descripción:** Redacción del documento donde se describe el proceso llevado a cabo a lo largo del mismo.
- **Fecha de inicio:** 17-4-2023.

- **Fecha final:** 5-6-2023.
- **Recursos técnicos:** Ordenador.
- **Recursos humanos:** Director (10h), Investigador de la Universidad (15h) y Alumna (100h).

H.7: Fin del proyecto

10. Diagrama de Gantt

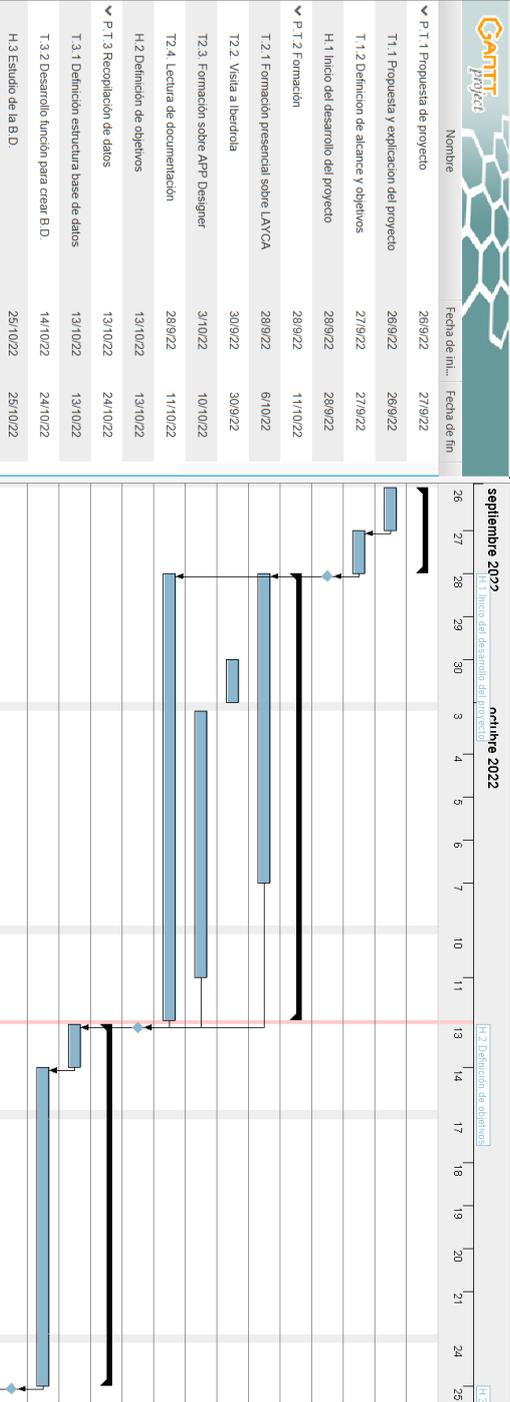


Figura 10.1: Diagrama de Gantt (1).

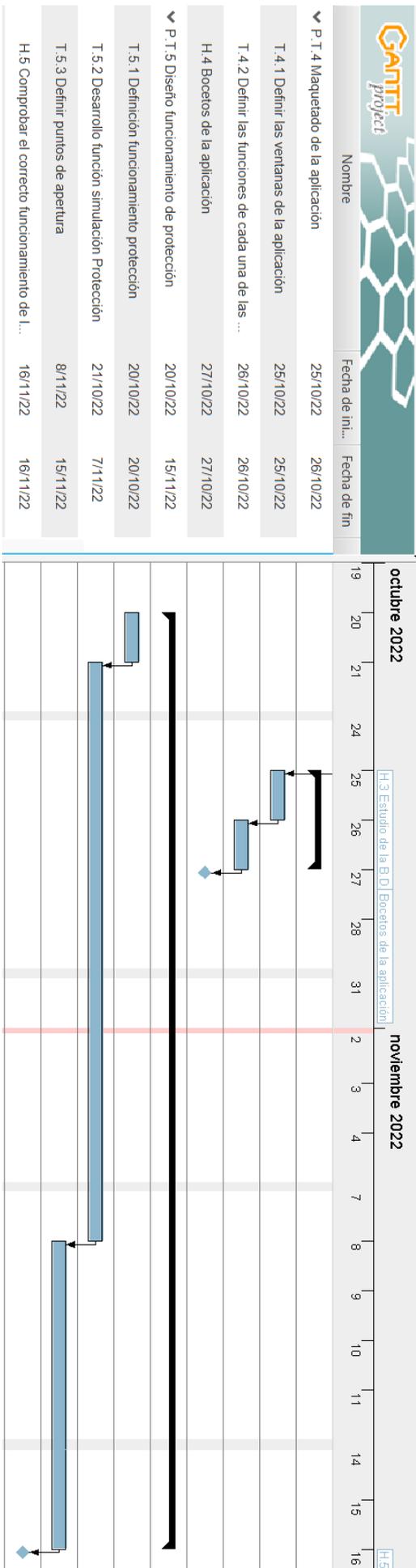


Figura 10.2: Diagrama de Gantt (2).

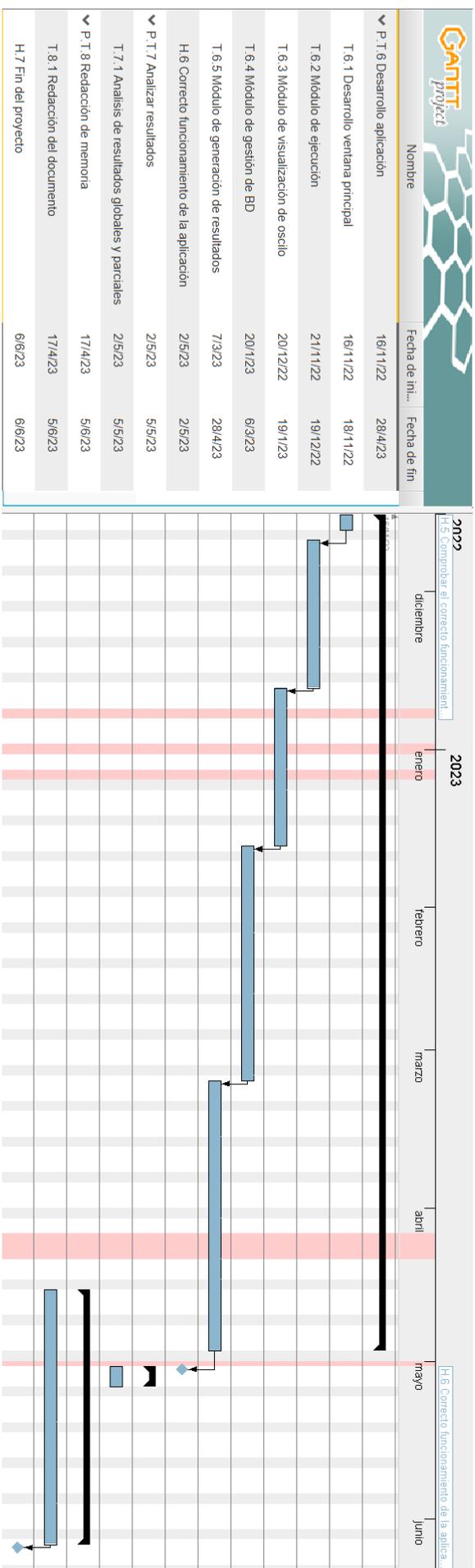


Figura 10.3: Diagrama de Gantt (3).

11. Presupuesto

En este apartado se muestra desglosado el coste total que ha supuesto la realización del proyecto en diferentes partidas: horas internas, amortizaciones y gastos.

11.1 Horas internas

En esta sección se muestran las horas que cada uno de los investigadores le ha dedicado al proyecto. Conociendo el coste unitario de cada uno de ellos y el número de horas se pueden obtener el valor del coste total de horas del proyecto.

Concepto	Nº de horas	Coste unitario (€/h)	Total (€)
D.1	35	70	2 450
I.1	70	50	3 500
A.1	677	25	16 925
<i>Subtotal</i>			22 875

Tabla 11.1: Partida de horas internas

11.2 Amortizaciones

En esta sección se muestra la partida de amortizaciones, entendiéndose por amortización la pérdida que sufre el valor de un activo fijo a lo largo del desarrollo del proyecto.

Concepto	Coste (€)	Vida útil (h)	Nº de horas	Total (€)
Licencia MATLAB	860	8 760	22	2.16
Licencia MATLAB	860	8 760	590	57.95
Ordenador A.1	800	5 000	650	104.00
Ordenador I.1	1 500	6 000	40	10.00
Ordenador D.1	2 000	7 000	18	5.14
<i>Subtotal</i>				179.25

Tabla 11.2: Partida de amortizaciones.

11.3 Gastos

En esta sección se muestra la partida de gastos. Estos pueden estar relacionados de forma directa o indirecta con el proyecto.

Concepto	Coste (€)
Transporte	133
Materiales de oficina	15
<i>Subtotal</i>	148

Tabla 11.3: Partida de gastos.

11.4 Coste total

A continuación se resume el coste total que ha supuesto desarrollar el proyecto con las diferentes partidas descritas previamente.

Concepto	Coste (€)
Horas internas	22 875.00
Amortizaciones	179.25
Gastos	148.00
Subtotal	23 202.25
Imprevistos (10 %)	2 320.23
<i>Total</i>	25 522.46

Tabla 11.4: Costes totales.

12. Conclusiones

El objetivo del desarrollo de este proyecto es conocer la precisión ofrecida por el sistema experto LAYCA a la hora de localizar y clasificar los tipos de faltas ocurridas en la red de distribución de media tensión. Para lograr este objetivo se ha diseñado una aplicación que ofrece las cuatro funcionalidades siguientes.

En primer lugar, permite llevar a cabo un análisis visual de las señales de tensión y corriente de cada uno de los oscilos albergados en la base de datos junto con la información más relevante asociada a cada uno de ellos (*Gold Standard*, distancia real, distancia calculada por LAYCA, distancia calculada por las correcciones, instante de apertura, etc...).

En segundo lugar, permite ejecutar una base de datos pudiendo definir los valores del archivo de parámetros como se desee. De dicha ejecución se genera una estructura de MATLAB que alberga las características más relevantes de cada oscilo de la base de datos junto con los resultados obtenidos.

En tercer lugar, la herramienta permite añadir nuevos oscilos procedentes de faltas producidas en la red siempre y cuando se reciban en formato COMTRADE [35]. Los resultados obtenidos de la ejecución de dichos oscilos se añaden a la base de datos y a la ejecución seleccionada por el usuario.

Finalmente, la última funcionalidad ofrecida por la aplicación desarrollada es la visualización de los resultados estadísticos. Estos se pueden visualizar para cada una de las ejecuciones realizadas asociadas a la base de datos seleccionada. De dichos resultados se analiza la mejora en la precisión obtenida gracias al sistema experto LAYCA. Los parámetros estadísticos empleados para el cálculo de la precisión son los percentiles 25, 50 (mediana) y 75 del error cometido analizado tanto en kilómetros como en porcentaje. Del análisis de resultados se concluye que:

- La mediana del error cometido por el sistema experto LAYCA es 16.3 puntos porcentuales más baja que la ofrecida por los IEDs.
- La dispersión del conjunto total de errores calculados por LAYCA es menor que la de los errores calculados mediante los IEDs.
- Las correcciones introducidas al algoritmo de LAYCA están optimizadas para una tensión de 20 kV. Lo idóneo sería diseñar diferentes correcciones para cada una de las tensiones nominales disponibles.
- Centrando el análisis únicamente en el sistema experto LAYCA, se ha estudiado la posible existencia de correlación entre los parámetros de error o duración de la falta frente a la distancia real concluyendo que no existe ningún tipo de relación.

Referencias

- [1] Jan Iżykowski. *Fault location on power transmission lines*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2008.
- [2] T. A. Short. *Electric Power Distribution Handbook*. 1 ed. CRC Press, 2004.
- [3] Joan A et al. Casey. “Power Outages and Community Health: a Narrative Review.” In: *Current environmental health reports* 7 (4 2020). DOI: 10.1007/s40572-020-00295-0.
- [4] Chen X Wang T Ying R Cao Z. “A Fault Diagnosis Method Considering Meteorological Factors for Transmission Networks Based on P Systems.” In: *Entropy (Basel)* 23.8 (2021), p. 1008. DOI: 10.3390/e23081008.
- [5] Red Eléctrica de España, Calidad de servicio.
- [6] R. R. Brown. *Electric Power Distribution Reliability*. 1 ed. Marcel Dekker INC., 2002.
- [7] Sophi Shilpa G, Hazlie Mokhlis, and Hazlee Illias. “Fault location and detection techniques in power distribution systems with distributed generation: A review.” In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 74 (2017), pp. 949–958. DOI: 10.1016/j.rser.2017.03.021.
- [8] Mladen Kezunovic. “Smart Fault Location for Smart Grids”. In: *IEEE Transactions on Smart Grid* 2.1 (2011), pp. 11–22. DOI: 10.1109/TSG.2011.2118774.
- [9] Hassan Nouri, Chun Wang, and Terry Davies. “An accurate fault location technique for distribution lines with tapped loads using wavelet transform”. In: *2001 IEEE Porto Power Tech Proceedings (Cat. No.01EX502)* 3 (2021), pp. 949–958. DOI: 10.1109/PTC.2001.964908.
- [10] Tzu-Chiao Lin and Zong-Jhen Ye. “A Signal-Superimposed Technique for Fault Location in Transmission Lines Through IED Measurements Considering Communication Service Failure”. In: *IEEE Systems Journal* 15.3 (2021), pp. 4525–4536. DOI: 10.1109/JSYST.2020.3034147.
- [11] Jorge De La Cruz et al. “Fault Location for Distribution Smart Grids: Literature Overview, Challenges, Solutions, and Future Trends”. In: *Energies* 16.5 (2023). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en16052280.
- [12] Murari Saha, Jan Izykowski, and E. Rosolowski. *Fault Location on Power Networks*. Vol. 48. 2010, pp. 1–422. ISBN: 978-1-84882-885-8. DOI: 10.1007/978-1-84882-886-5.
- [13] G.Krzysztof R.Kowalik D.Rasolomampionona S.Anwar. “Traveling wave fault location in power location in power transmission systems: An overview”. In: *Journal of Electrical Systems* (2011).
- [14] Chenhao Zhang et al. “Single-Ended Traveling Wave Fault Location Method in DC Transmission Line Based on Wave Front Information”. In: *IEEE Transactions on Power Delivery* 34.5 (2019), pp. 2028–2038. DOI: 10.1109/TPWRD.2019.2922654.
- [15] Andrea Di Tomasso, Giuliana Invernizzi, and Giorgio Vielmini. “Accurate Single-End and Double-End Fault Location by Traveling Waves: a review with some real applications”. In: *2019 AEIT International Annual Conference (AEIT)*. 2019, pp. 1–6. DOI: 10.23919/AEIT.2019.8893383.
- [16] OD Naidu and Ashok Kumar Pradhan. “A Traveling Wave-Based Fault Location Method Using Unsynchronized Current Measurements”. In: *IEEE Transactions on Power Delivery* 34.2 (2019), pp. 505–513. DOI: 10.1109/TPWRD.2018.2875598.
- [17] Aleksey Fedorov et al. “Limitations of Traveling Wave Fault Location”. In: *2020 Ural Smart Energy Conference (USEC)*. 2020, pp. 21–25. DOI: 10.1109/USEC50097.2020.9281153.

- [18] Ali Rohan and Sung Kim. “Fault Detection and Diagnosis System for a Three-Phase Inverter Using a DWT-Based Artificial Neural Network”. In: *The International Journal of Fuzzy Logic and Intelligent Systems* 16 (2016), pp. 238–245. DOI: 10.5391/IJFIS.2016.16.4.238.
- [19] Hanif Livani and C. Yaman Evrenosoglu. “A Machine Learning and Wavelet-Based Fault Location Method for Hybrid Transmission Lines”. In: *IEEE Transactions on Smart Grid* 5.1 (2014), pp. 51–59. DOI: 10.1109/TSG.2013.2260421.
- [20] A. Borghetti et al. “On the use of continuous-wavelet transform for fault location in distribution power systems”. In: *International Journal of Electrical Power and Energy Systems* 28.9 (2006), pp. 608–617. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2006.03.001>.
- [21] Hsueh-Hsien Chang and Nguyen Viet Linh. “Statistical Feature Extraction for Fault Locations in Nonintrusive Fault Detection of Low Voltage Distribution Systems”. In: *Energies* 10.5 (2017). ISSN: 1996-1073. DOI: 10.3390/en10050611.
- [22] Shifei Ding et al. “Extreme Learning Machine: Algorithm, Theory and Applications”. In: *Artif. Intell. Rev.* 44.1 (2015), pp. 103–115. ISSN: 0269-2821. DOI: 10.1007/s10462-013-9405-z.
- [23] Nikhitha Nair and Asharaf S. “Tensor Decomposition Based Approach for Training Extreme Learning Machines”. In: *Big Data Research* 10 (Aug. 2017). DOI: 10.1016/j.bdr.2017.07.002.
- [24] F M Aboshady, D W P Thomas, and Mark Sumner. “A New Single End Wideband Impedance Based Fault Location Scheme for Distribution Systems”. In: *Electric Power Systems Research* 173 (2019), pp. 263–270. ISSN: 0378-7796. DOI: 10.1016/j.epsr.2019.04.034.
- [25] Jun Zhu, D.L. Lubkeman, and A.A. Girgis. “Automated fault location and diagnosis on electric power distribution feeders”. In: *IEEE Transactions on Power Delivery* 12.2 (1997), pp. 801–809. DOI: 10.1109/61.584379.
- [26] Zhao Zhang, Zhihong Zhao, and Honglei Yu. “Research on Fault Location Algorithm for Line Protection”. In: *2022 China International Conference on Electricity Distribution (CICED)*. 2022, pp. 1317–1321. DOI: 10.1109/CICED56215.2022.9928979.
- [27] Ganiyu Adedayo Ajenikoko and Olufemi Sangotola Segun. “An Overview of Impedance-Based Fault Location Techniques in Electrical Power Transmission Network”. In: *International Journal of Advanced Engineering Research and Applications (IJA-ERA)* 2 (2016). ISSN: 2454-2377.
- [28] Chaoqi Ji. *IMPEDANCE-BASED FAULT LOCATION METHODS FOR TRANSMISSION LINE CONNECTING WIND FARM PLANTS*. 2012.
- [29] Karl Zimmerman and David Costello. “Impedance-Based Fault Location Experience”. In: *2006 IEEE Rural Electric Power Conference*. 2006, pp. 1–16. DOI: 10.1109/REPCON.2006.1649060.
- [30] Anierobi Patrick Ogechukwu and Otuu Obinna Ogbonnia. “Review of Impedance-Based Fault Location Algorithm in Electric Power Transmission Line, using computerized fault recorders.” In: *International Journal of Applied Science Research* ().
- [31] Cezary Dzienis et al. “Accurate impedance based fault location algorithm using communication between protective relays”. In: *2015 Modern Electric Power Systems (MEPS)*. 2015, pp. 1–6. DOI: 10.1109/MEPS.2015.7477178.
- [32] Ramar Krishnathevar and Eng Eng Ngu. “Generalized Impedance-Based Fault Location for Distribution Systems”. In: *IEEE Transactions on Power Delivery* 27.1 (2012), pp. 449–451. DOI: 10.1109/TPWRD.2011.2170773.
- [33] G. Morales-Espana, J. Mora-Florez, and H. Vargas-Torres. “Elimination of Multiple Estimation for Fault Location in Radial Power Systems by Using Fundamental Single-End Measurements”. In: *IEEE Transactions on Power Delivery* 24.3 (2009), pp. 1382–1389. DOI: 10.1109/TPWRD.2009.2013400.

-
- [34] Heba Beder et al. "Inrush current detection enhancement for legacy overcurrent relays in north delta electric distribution company". In: *Electric Power Systems Research* 201 (2021), p. 107517. ISSN: 0378-7796. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2021.107517>.
- [35] International Electrotechnical Commission, IEC 60255-24. 2013.

A. ANEXO I

En este anexo se presenta la guía de usuario de la aplicación desarrollada.

A.1 Instalar la aplicación

En primer lugar se debe instalar la aplicación. Para ello se presiona dos veces sobre el archivo llamado “ALAYCA.minstallapp” y se abre la siguiente ventana (Figura A.1).

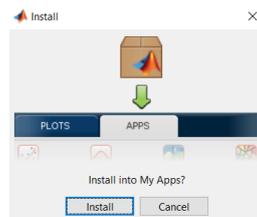


Figura A.1: Instalador TFM.

Una vez instalada la aplicación ya está disponible en la pestaña de APPS dentro de MATLAB. (Figura A.2).

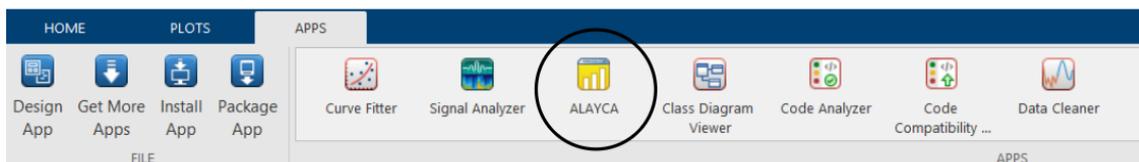


Figura A.2: Ubicación de la aplicación ALAYCA dentro de MATLAB.

Cuando se inicia la aplicación, el primer módulo que aparece es el mostrado en la Figura A.3. Si se presiona el botón asociado al número uno aparece una ventana emergente que permite cambiar de directorio en el que se va a trabajar. Una vez seleccionado aparece en el bloque de texto número 2. Dependiendo de la función que se desee llevar a cabo en el interior de la aplicación se pulsán los botones de 3 al 7:

- **3:** Inicia el módulo de visualización de oscilos.
- **4:** Inicia el módulo para la gestión de la base de datos.
- **5:** Inicia el módulo para llevar a cabo la ejecución completa de la base de datos.
- **6:** Genera los resultados asociados a la base de datos introducida por el usuario.
- **7:** Inicia el módulo para seleccionar que subconjunto de la base de datos se desea analizar.



Figura A.3: Panel principal.

A.2 Panel de visualización

Cuando se pulsa el botón número 3 del panel principal se abre el panel mostrado en la Figura A.4.

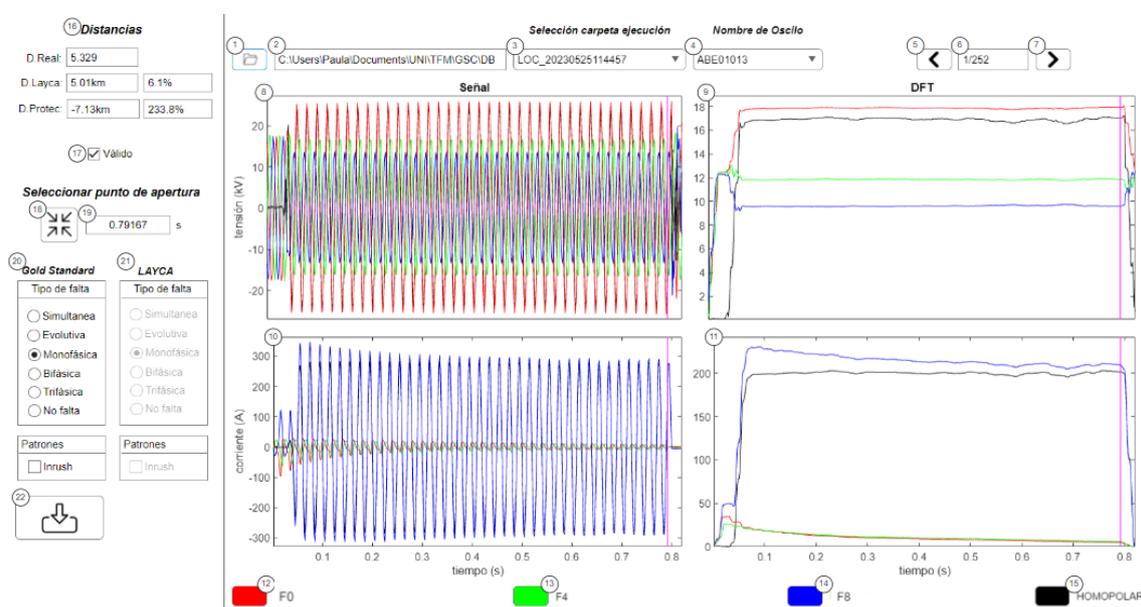


Figura A.4: Panel de visualización.

En dicho panel se debe seleccionar la base de datos donde se encuentran almacenados los oscilos que se desean visualizar. Esto se realiza, al igual que en el caso anterior, presionando el botón número 1. La carpeta seleccionada aparece reflejada en el cuadro de texto número 2. El desplegable número 3 permite seleccionar qué ejecución asociada a la base de datos se desea visualizar. Los botones números 5 y 7 permiten recorrer hacia atrás y hacia delante la base de datos visualizando cada uno de los oscilos. El cuadro de texto número 6 permite visualizar la posición en la que se encuentra el oscilo dentro del conjunto total de la base de datos.

En las gráficas números 8 y 10 se pueden ver la evolución temporal de las tres tensiones en la gráfica superior y de las tres corrientes en la inferior. En las gráficas número 9 y 11 se puede ver la evolución temporal de la DFT de 50Hz de las 3 tensiones y las 3 corrientes respectivamente. Además, marcado con una línea vertical morada, se muestra el instante de apertura de la línea almacenado en el *Gold Standard*.

Los botones asociados a los números 12, 13, 14 y 15 sirven para mostrar u ocultar de las gráficas las

distintas fases correspondientes, permitiendo analizar más fácilmente el resto.

En la sección izquierda, el número 16 muestra la distancia real y las calculadas por los IEDs y por LAYCA junto con sus errores. El selector de válido, número 17, permite al usuario definir si el oscilo que se está visualizando se tiene en cuenta o no para el cálculo estadístico de los resultados.

En caso de que el usuario detecte que el instante de apertura fijado en el *Gold Standard* sea erróneo debe pulsar el botón correspondiente al número 18. De esta forma, en la gráfica de la corriente aparece la herramienta mostrada en la Figura A.5 que permite fijar el nuevo instante de apertura haciendo uso de la línea roja. Cuando se selecciona el nuevo instante, el valor mostrado en el número 19 se actualiza y las líneas moradas de las 4 gráficas se reajustan mostrando el nuevo valor.

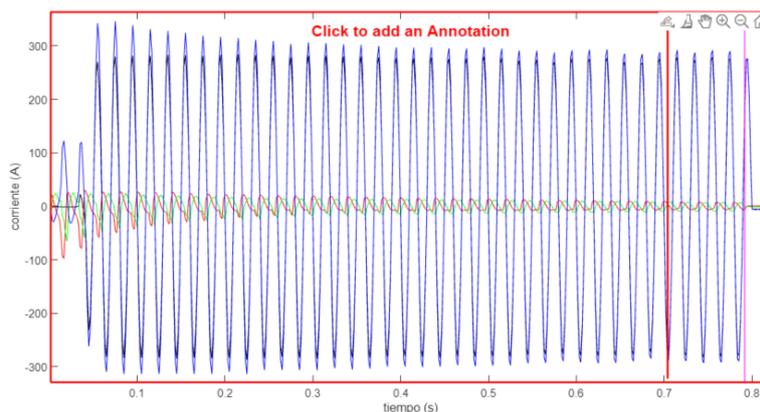


Figura A.5: Selector instante de apertura.

En el número 20 se muestra el *Gold Standard* fijado por el usuario. Al igual que con el instante de apertura, si se detecta que no está definido correctamente, se puede cambiar el valor del tipo de falta y el patrón. Cuando se fijan los nuevos valores se pulsa el botón de guardado (número 22).

Finalmente, en el número 21 se muestran el tipo de falta y el patrón obtenido por LAYCA para el oscilo mostrado.

A.3 Ejecución de la base de datos

Cuando se selecciona el botón número 5 del panel inicial se muestra el panel de ejecución de la base de datos.



Figura A.6: Panel de ejecución.

En este panel se deben seleccionar la base de datos que se desea ejecutar junto con el archivo de parámetros que se desea introducir. En caso de no seleccionar el archivo de parámetros o no hacerlo correctamente, aparece un panel emergente avisando al usuario del error cometido.

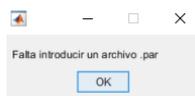
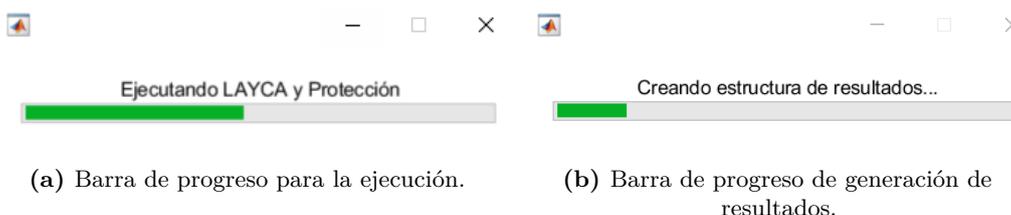


Figura A.7: Aviso de falta de archivo de parámetros.

Una vez introducidos correctamente los archivos necesarios se inicia la ejecución. Para poder realizar un seguimiento de la misma se muestra en un panel emergente una barra de avance durante la ejecución (Figura A.8a) y en el proceso de generación de resultados (Figura A.8b).



(a) Barra de progreso para la ejecución.

(b) Barra de progreso de generación de resultados.

Figura A.8: Barras de progreso.

A.4 Panel para agregar nuevos oscilos a la base de datos

Cuando se selecciona el botón número 4 en el panel principal se abre el panel mostrado en la Figura A.9.

Base de datos a la que añadir nuevos oscilos

1 2 C:\Users\Paula\Documents\UNITFM\GSC\DB

Seleccionar ejecución a la que añadir los nuevos oscilos

3 4 C:\Users\Paula\Documents\UNITFM\GSC\LOC_20230505132645

Seleccionar archivo '.dat' de los oscilos a añadir

5 6

Visualizar (S/N)	Oscilo	Protección	Fecha	Hora	Distancia Real (km)	Tensión Nominal
<input checked="" type="checkbox"/>	PL300E1TZ11ZT1001	70564	2017/03/29	20:12:29	7.4	13
<input checked="" type="checkbox"/>	PL300E1TZ11ZT1001	70564	2017/03/29	20:12:31	7.4	13
<input checked="" type="checkbox"/>	PL300E1TZ11ZT1001	70564	2017/03/29	20:12:52	7.4	13
<input type="checkbox"/>	PL300E1TZ11ZT1001	70564	2017/03/29	20:13:13	7.4	13

COMUNICACIONES

Figura A.9: Panel para agregar nuevos oscilos a una base de datos.

Este panel permite agregar nuevos oscilos a la base de datos. Para ello, en el botón número 1 el usuario debe seleccionar el directorio donde se encuentra la base de datos. Esta información se ve reflejada en el cuadro de texto número 2.

El botón número 3 permite seleccionar la ejecución a la que añadir los resultados de los nuevos oscilos. El directorio asociado a ella se muestra en el cuadro de texto número 4.

Mediante el botón número 5 se abre el explorador de archivos para poder seleccionar los nuevos oscilos que se desean añadir a la base de datos. Para ello, el usuario debe seleccionar los archivos de datos de cada uno de ellos como se muestra en la Figura A.10.

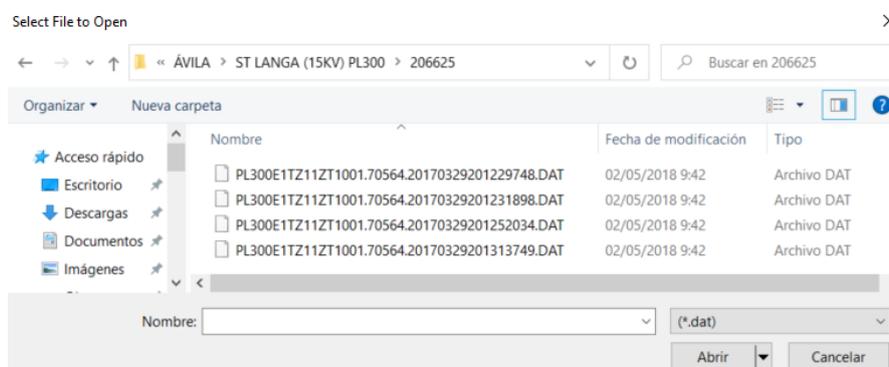


Figura A.10: Ejemplo de archivos de datos a añadir.

En la tabla número 6 mostrada en la Figura A.9, los dos últimos parámetros se deben añadir de forma manual (la tensión nominal, columna número 9 y la distancia real, columna número 8). Esta información, generalmente, viene indicada en un excel como se muestra en la Figura A.11 (las dos columnas sombreadas de color verde).

E	F	G	H	I	J	K	L	M
R1	X0	X1	OSCILO	TENSION NOMINAL	FASE	TIPO	3° ARMONICO I MOD	DISTANCIA REAL
0,25	1,5	0,39	3516900	13	F8	Monofásica	24,9	7,4
0,25	1,5	0,39	3516903	13	F8	Monofásica	26,0	7,4
0,25	1,5	0,39	3516901	13	F8	Monofásica	18,3	7,4
0,25	1,5	0,39	3516902	13	F8	Monofásica	16,0	7,4

Figura A.11: Ejemplo de un fragmento del excel que alberga la tensión nominal de la línea y la distancia real a la falta.

Cuando se inicia la ejecución de aquellos oscilos que tienen activo el selector de visualizar (columna número 7 de la Figura A.9) aparece una barra indicando el avance de la ejecución y de la creación de la estructura de resultados, al igual que en la Sección A.3. Finalizado este proceso se abre de forma automática un panel de visualización (Figura A.12), en el que únicamente se podrán visualizar los nuevos oscilos seleccionados.

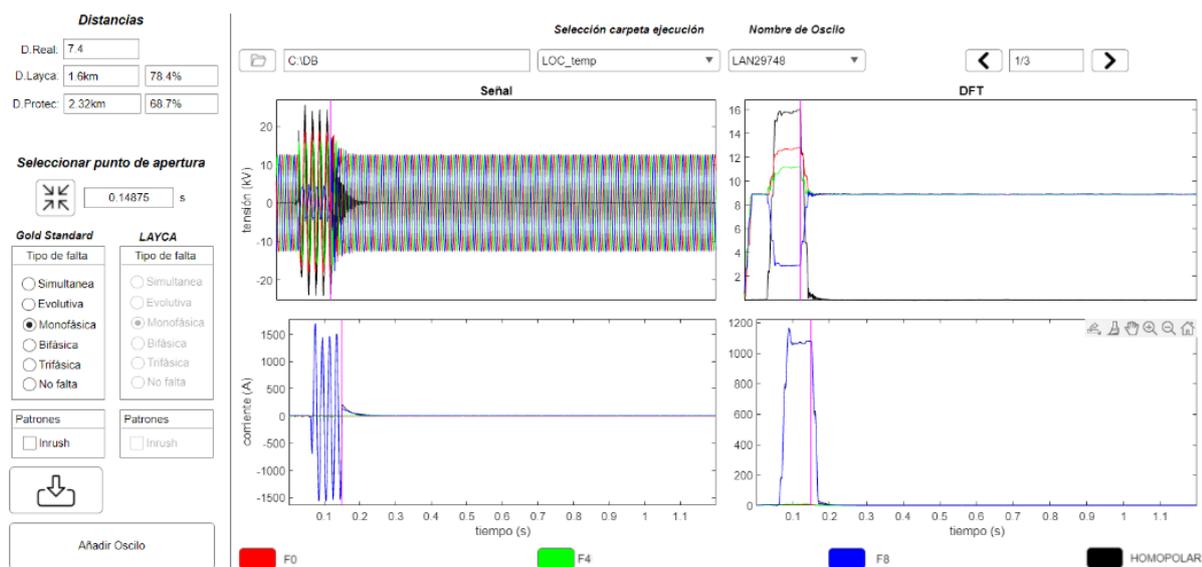
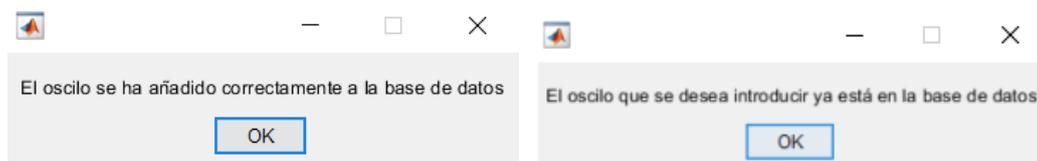


Figura A.12: Panel de visualización asociado a los nuevos oscilos a añadir.

El panel de visualización es similar al mostrado en la Sección A.2. En este se ha añadido un nuevo botón en la parte inferior del panel de la izquierda denominado *añadir oscilo*. Este botón sirve para añadir el oscilo que se está visualizando a la base de datos seleccionada inicialmente. Cuando el usuario decide pulsarlo puede ocurrir que el oscilo se añada sin problemas a la base de datos (Figura A.13a) o que ese oscilo ya estuviese en la misma (Figura A.13b) y por tanto, no se añade. En ambas situaciones se le notifica al usuario con un panel emergente.



(a) Añadir.

(b) Ya añadido.

Figura A.13: Posibles paneles emergentes a la hora de añadir.

A.5 Panel de resultados globales

Cuando se selecciona el botón número 6 en el panel principal se abre el panel mostrado en la Figura A.14. En él se muestran los errores cometidos en el cálculo de las distancias del conjunto de datos que el usuario ha marcado como válidos en la Sección A.2.

Ubicación de las ejecuciones

1  2

Seleccionar Ejecución

3

Información relevante de la base de datos

4

Características	Nº Total	Nº Total(%)	Nº Localizado	Error algoritmo(%)	Error algoritmo(km)	Error final(%)	Error final(km)	Error Protección(%)	Error Protección(km)
Total	252	100	154	13.2 (4.9 - 24.6)	0.86 (0.43 - 2.84)	7.5 (3.6 - 12)	0.56 (0.34 - 1.12)	22 (8.7 - 54.8)	1.75 (0.85 - 5.6)
Tension Nominal									
13 kV	141	56	63	7.2 (3.3 - 14.6)	0.66 (0.35 - 0.92)	9.8 (6.8 - 16.5)	0.67 (0.44 - 1.7)	11.5 (4.7 - 23.7)	0.99 (0.33 - 1.75)
15 kV	9	3.6	5	18.8 (8 - 36.3)	0.33 (0.15 - 2.37)	9.5 (7.2 - 12.6)	0.19 (0.16 - 0.74)	30.8 (24.7 - 47.8)	1.75 (0.49 - 3.08)
20 kV	102	40.5	86	19.2 (7.3 - 29.4)	1.61 (0.56 - 3.57)	5.8 (2.6 - 8.8)	0.46 (0.25 - 1.05)	40.1 (14.6 - 82.9)	3.25 (1.41 - 8.07)
30 kV	0	0	0						
45 kV	0	0	0						
66 kV	0	0	0						
Tipo de falta									
Simultanea (23)	23	9.13	6	6.4 (2.1 - 14.4)	0.5 (0.05 - 0.89)	6.8 (2.2 - 8.3)	0.32 (0.12 - 0.51)	41 (10.6 - 56.6)	0.89 (0.66 - 3.51)
Evolutiva (4)	4	1.6	4	15 (6.8 - 35.9)	0.7 (0.34 - 3.59)	12.3 (7 - 37.2)	0.54 (0.4 - 3.67)	53.3(25.6 - 190.5)	4.27 (0.95 - 13.25)
Mono-Bi	4	1.6	4	15 (6.8 - 35.9)	0.7 (0.34 - 3.59)	12.3 (7 - 37.2)	0.54 (0.4 - 3.67)	53.3 (25.6 - 190.5)	4.27 (0.95 - 13.25)
Mono-Tri	0	0	0						
Bi-Tri	0	0	0						
Mono-Bi-Tri	0	0	0						
No evolutiva	223	88.5	144	13.4 (5 - 25.4)	0.9 (0.5 - 2.9)	7.5 (3.5 - 12)	0.6 (0.3 - 1.1)	20.2 (8.4 - 54.2)	1.8 (0.9 - 5.5)
Mono (167)	167 (167,0,0,0)	66.3	134	13.5 (5.4 - 27.1)	0.98 (0.47 - 3.08)	7.6 (4.3 - 11.9)	0.58 (0.35 - 1.17)	18.3 (8 - 55)	1.89 (0.85 - 7.21)
Bi (10)	10 (0,10,0,0)	4	7	15.6 (5.5 - 16.3)	0.66 (0.58 - 0.71)	15.6 (2 - 16.3)	0.64 (0.13 - 0.67)	33.1 (32.2 - 36.6)	1.5 (1.33 - 3.21)
Tri (3)	3 (0,0,3,0)	1.2	3	3.3 (0.9 - 3.5)	0.1 (0.03 - 0.28)	2.1 (0.6 - 3)	0.1 (0.03 - 0.18)	6 (4.4 - 28.2)	0.17 (0.11 - 2.6)
Indeterminado (43)	43 (0,0,0,43)	17.1	0						
Patrones									
Inrush	12	4.8	2	25.3 (24.5 - 26.2)	3.57 (3.52 - 3.62)	5.9 (5.4 - 6.4)	0.83 (0.73 - 0.94)	42.8 (28.6 - 57)	5.94 (4.23 - 7.65)
Tierra	189	75	147	13.1 (5 - 25.7)	0.89 (0.44 - 2.91)	7.5 (4.1 - 11.6)	0.55 (0.34 - 1.16)	20 (8.3 - 55.1)	1.86 (0.81 - 6.82)
Cruzamiento	0	0	0						
Cable Subterráneo	6	2.4	1	22.8 (22.8 - 22.8)	2.83 (2.83 - 2.83)	0.8 (0.8 - 0.8)	0.1 (0.1 - 0.1)	5.1 (5.1 - 5.1)	0.64 (0.64 - 0.64)
Celda	3	1.2	3	3.3 (1.6 - 3.5)	0.1 (0.07 - 0.28)	3.3 (2.4 - 5.8)	0.21 (0.12 - 0.32)	6 (3.2 - 28.2)	0.17 (0.13 - 2.6)
Vano	5	2	5	16.2 (12.2 - 16.6)	0.66 (0.49 - 0.68)	16.2 (12.2 - 16.6)	0.66 (0.49 - 0.68)	36.4 (32.9 - 39)	1.36 (1.28 - 1.5)
Modelo de Prot...									
PL250	135	53.6	59	6.8 (3.2 - 14.4)	0.68 (0.34 - 0.95)	9.5 (7.2 - 17.1)	0.71 (0.45 - 2.22)	10.6 (4 - 20.2)	0.96 (0.28 - 1.75)
PL300	14	5.6	10	15.9 (12.1 - 17.4)	0.69 (0.64 - 0.8)	10.3 (6.6 - 16.2)	0.52 (0.19 - 0.66)	27.8 (18.4 - 33.1)	1.34 (1.13 - 1.5)
3IDR	19	7.5	14	10.1 (4 - 17.4)	0.53 (0.47 - 0.69)	8.9 (3.1 - 13.2)	0.49 (0.21 - 1.51)	82.8 (50.2 - 123.2)	5.45 (4.76 - 9.85)
7IDR	84	33.3	71	22.6 (8.5 - 30)	2.64 (0.59 - 3.92)	5.2 (2.3 - 8.1)	0.45 (0.26 - 0.94)	36.8 (12.1 - 56.9)	3.07 (1.31 - 7.47)

Figura A.14: Ejemplo de resultados de una base de datos asociados a una ejecución.

Para llevar a cabo la visualización el usuario debe seleccionar el directorio en el que se encuentran alojados tanto la base de datos como la ejecuciones asociadas a ella. Esto se realiza, al igual que en el resto de paneles, haciendo uso del botón número 1. El directorio seleccionado se muestra en el cuadro de texto número 2 y las ejecuciones disponibles en el desplegable número 3. La tabla número 4 resume los resultados de la ejecución de la BD. Esta tabla se divide en 5 secciones:

- Resultados globales.
- Tensiones nominales.
- Tipo de falta.
- Patrones.
- Modelo de protección.

La descripción en detalle de la tabla número 4 se realiza en la Subsección 7.3.4.

A.6 Panel de resultados parciales

Finalmente, si el usuario selecciona el botón número 7 del panel principal se abre el panel mostrado en la Figura A.15. El usuario debe seleccionar el directorio donde se aloja la base de datos y la ejecución que se desea analizar (botón número 1). Una vez seleccionado el directorio, este se muestra en el cuadro de texto número 2. En el desplegable número 3 se pueden seleccionar cualquiera de las ejecuciones disponibles asociadas a la base de datos.

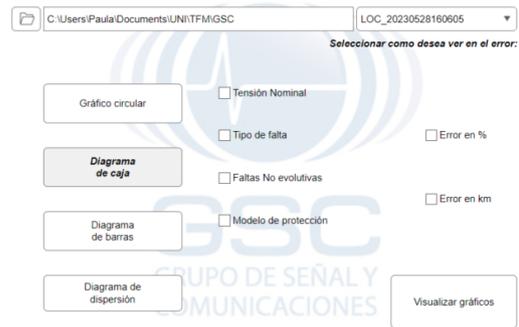


Figura A.15: Panel para seleccionar que gráfica se desea visualizar.

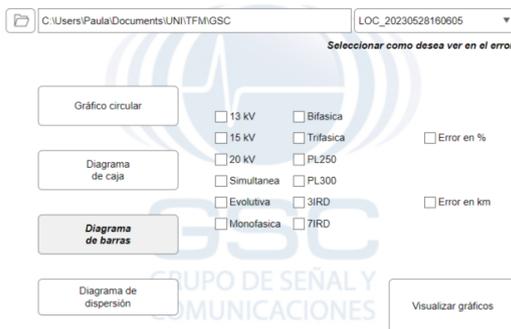
Dependiendo del subconjunto de resultados que desea visualizar el usuario debe seleccionar un tipo de gráfico u otro. Las opciones disponibles se muestran en la Figura A.16.



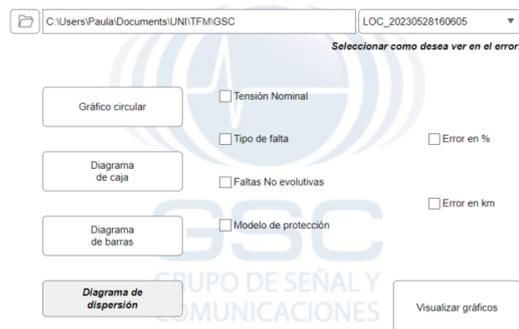
(a) Opciones de gráficos circulares.



(b) Opciones de diagramas de caja (boxplots).



(c) Opciones de diagramas de barras(bar).



(d) Opciones de diagramas de dispersión.

Figura A.16: Opciones de gráficas.

En cada uno de los casos de la Figura A.16, una vez seleccionados los datos que se quieren visualizar el botón denominado *Visualizar gráficos* (zona inferior derecha) genera las gráficas correspondientes. A continuación se muestra un ejemplo de cada una de las gráficas que se pueden visualizar:

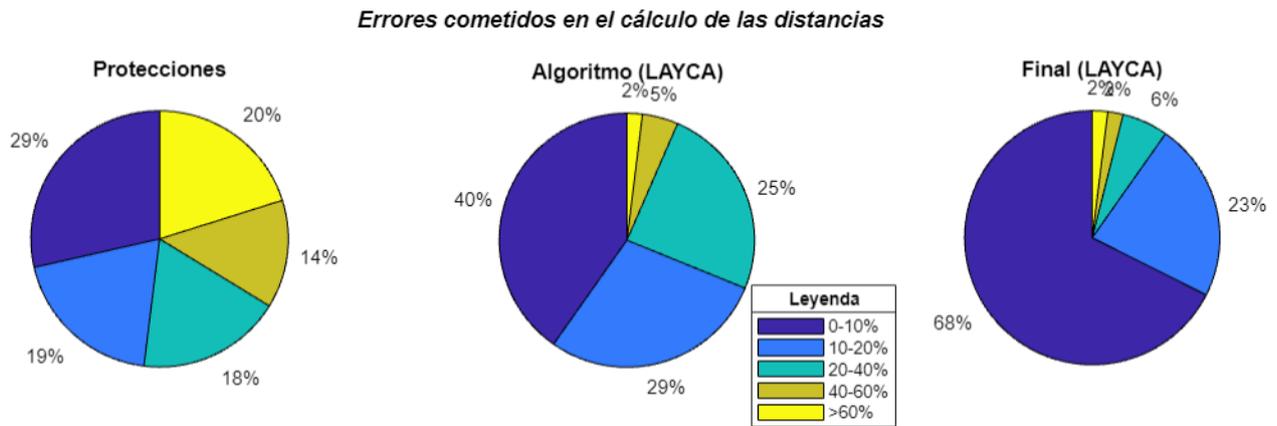


Figura A.17: Ejemplo en el que se muestran todas las opciones del diagrama circular.

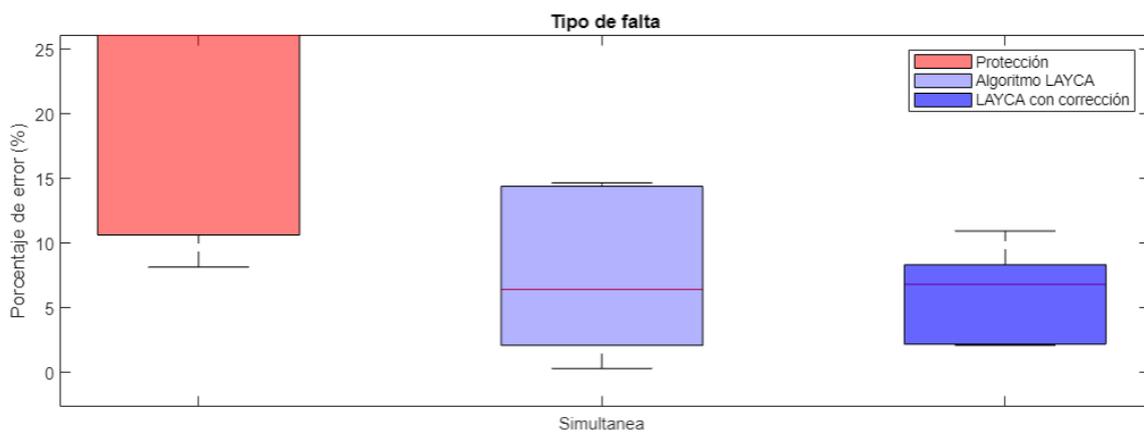


Figura A.18: Ejemplo de diagrama de caja (boxplot) para los distintos tipos de falta.

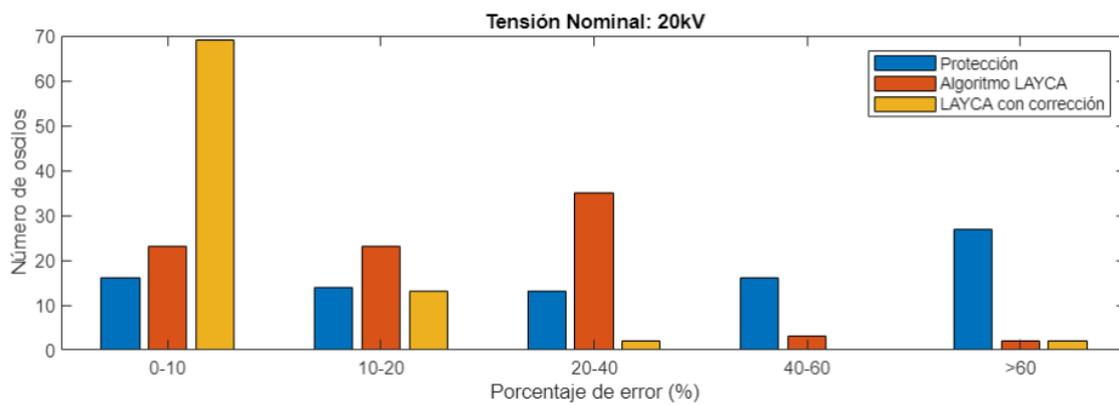


Figura A.19: Ejemplo de diagrama de barras para una tensión nominal de 20kV.

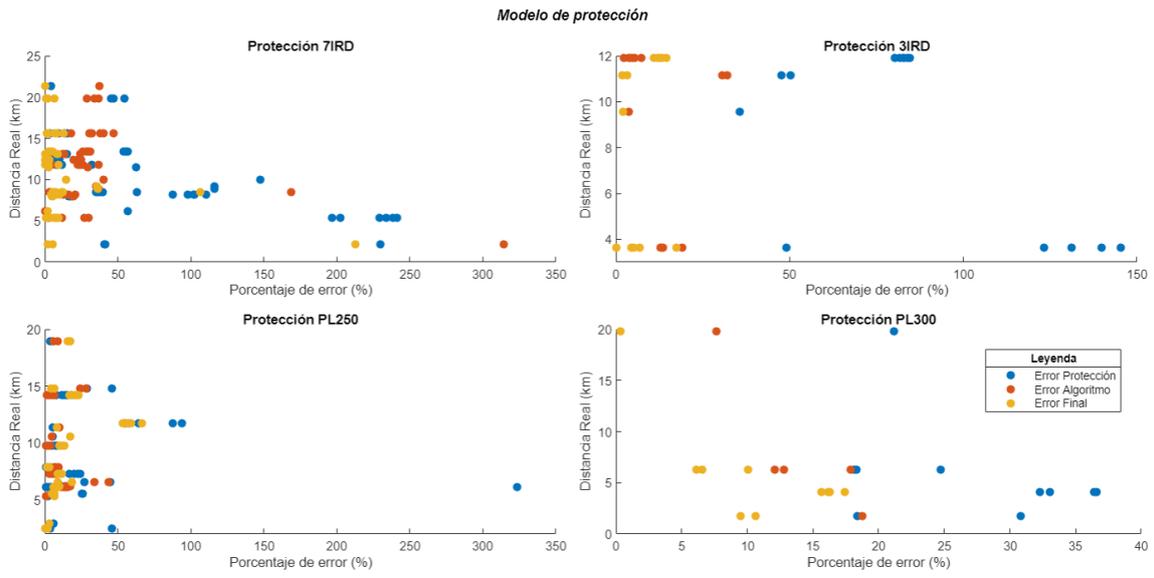


Figura A.20: Ejemplo de diagrama de dispersión para los distintos modelos de IED.