



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

Departamento de Ingeniería Eléctrica

TESIS DOCTORAL

Diseño de un relé neuronal de protección para líneas aéreas de AT con procesamiento de señal mediante la transformada wavelet

Autor

Ing. Javier Iglesias Lorenzo

Director

Prof. Dr-Ing Ángel L. Orille Fernández

2003

AGRADECIMIENTOS

Mi más sincero agradecimiento al Profesor Ángel L. Orille, sin cuya valiosa colaboración, apoyo técnico y moral no habría sido posible llevar a término este trabajo.

También mi profundo agradecimiento al Profesor R. K. Aggarwal, de la universidad de Bath, Inglaterra, por su acogida, consejos y ayuda prestada durante la realización de la parte experimental de esta tesis.

Mi agradecimiento y recuerdo a los compañeros y amigos con los que compartí parte de del período de realización de ésta tesis: Nabil Khalil, Jaime Valencia, Fernando Villada, Gamal Sowilam, Mohamed Ahmed, Santiago Bogarra; al personal del departamento así como a los profesores de Ingeniería Eléctrica de las Escuelas Técnicas Superiores de Ingenieros Industriales de Tarrasa y Barcelona.

Mi reconocimiento también a la Direcció General de Recerca de la Generalitat de Catalunya por la concesión de la beca FI de formación de personal investigador, sin la cuál este trabajo tampoco habría sido posible.

Finalmente agradezco a la Asociación Electrotécnica y Electrónica Española por el reconocimiento y valoración que han concedido a este trabajo.

A mis padres, Bernardino y Esther, y a mi hermana M^a Esther



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE CATALUÑA

Departamento de Ingeniería Eléctrica

TESIS DOCTORAL

Diseño de un relé neuronal de protección para líneas aéreas de AT con procesamiento de señal mediante la transformada wavelet

Autor: Ing. Javier Iglesias Lorenzo

Director: Prof. Dr-Ing Ángel L. Orille Fernández

RESUMEN

El avance de las tecnologías de los microprocesadores y ordenadores ha permitido sustituir las protecciones electromecánicas y analógicas clásicas por protecciones digitales. Sin embargo, los algoritmos empleados en éstas últimas tienen serias dificultades cuando las señales procedentes de los transductores de las corrientes y tensiones están afectadas por la saturación de los mismos o por efectos de ferorresonancia respectivamente, o cuando la falta que se presenta en la línea está afectada por un arco dinámico.

Por otro lado, en los últimos años se habían hecho pequeños avances en la aplicación de la inteligencia artificial y en especial en redes neuronales a los sistemas de energía eléctrica. Éstas resultaban especialmente útiles en la predicción del flujo de carga y en la clasificación de patrones de faltas. El término clasificación de patrones engloba un amplio marco de problemas de procesamiento de información de gran importancia práctica. Con frecuencia estos problemas se resuelven mediante técnicas estadísticas, desarrollando un algoritmo capaz de clasificar correctamente un patrón no visto anteriormente. Una aproximación al reconocimiento estadístico de patrones se realiza mediante el teorema de Bayes, que expresa la probabilidad de que un patrón pertenezca a una determinada clase, expresando ésta

probabilidad a posteriori en función de medidas realizadas previamente. En función de las características observadas se divide el espacio en regiones de decisión separadas por fronteras de decisión o clasificación. Análogamente, las salidas de una red neuronal se pueden interpretar como las probabilidades obtenidas a partir de la función de error (minimizar la función error durante el entrenamiento de la red neuronal es equivalente a buscar la máxima probabilidad), y la red neuronal aproxima las fronteras del clasificador Bayesiano óptimo.

Ante estos hechos, y la gran ventaja que supone el modo de trabajo en paralelo de las redes neuronales nos propusimos, como objetivo, el estudio de la aplicación de las mismas en los sistemas de protección de líneas eléctricas con la finalidad de resolver los problemas anteriormente apuntados.

La metodología empleada consistió en el entrenamiento de los diferentes tipos de redes neuronales utilizadas en los relés de protección mediante datos generados, para distintos tipos de fallos, con un programa de transitorios electromagnéticos (EMTDC/PSCAD) aplicado a un modelo de red muy general que incluye todas las posibles topologías y niveles de carga. Estos patrones fueron empleados para entrenar las redes neuronales mediante un programa en C++ realizado por el autor.

También se incorporó en este trabajo, el estudio y la aplicación de la transformada wavelet, que presenta una serie de ventajas frente a métodos tradicionales de procesamiento de señales. Entre las herramientas tradicionales de análisis de sistemas eléctricos de potencia, se encuentran numerosos algoritmos, basados entre otros, en la transformada de Fourier, filtros de Kalman, etc. Sin embargo, si ocurre un transitorio, las formas de onda asociadas no son periódicas, conteniendo oscilaciones de alta y de baja frecuencia superpuestas a la frecuencia de funcionamiento del sistema eléctrico. En tal situación, debido a que la transformada de Fourier realiza un promedio de la contribución de las frecuencias, se pierde la localización de la perturbación en el tiempo. El análisis mediante wavelets supera ésta limitación realizando un procesamiento de la señal que proporciona información en tiempo y en frecuencia. Por ello, la transformada wavelet es una potente ayuda para el análisis, estudio e interpretación de los distintos fenómenos transitorios que se pueden presentar en un sistema eléctrico de potencia.

Además, en este trabajo se ha implementado la transformada wavelet mediante una red neuronal, que nos permite integrar dentro de la red neuronal general de reconocimiento de patrones la red encargada de llevar a cabo el procesamiento de señal. El funcionamiento en paralelo de

la red neuronal con la información suministrada por las wavelets ha permitido incrementar la velocidad y seguridad de la respuesta del relé neuronal en los primeros instantes del fallo.

Asimismo, uno de los objetivos de este trabajo es la implementación práctica del diseño realizado mediante un sistema electrónico que permite comprobar la eficacia del mismo. Para llevar a cabo el montaje experimental se necesita un sistema que permita simular los sistemas eléctricos similares a los empleados en el proceso de diseño y entrenamiento del relé.

El Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Bath cuenta con un equipo de estas características con el que es posible ensayar los prototipos. Las pruebas de laboratorio del relé neuronal se llevaron a cabo bajo la supervisión del Prof. Aggarwal.

Los resultados obtenidos, plenamente satisfactorios, son un buen estímulo para el uso de las redes neuronales en las protecciones de alta velocidad para líneas de transmisión de alta tensión ya que hemos obtenido un tiempo de respuesta en la detección en la red neuronal de incluso 1.8 ms para fallos cercanos al relé. El relé también ha dado una buena respuesta frente a ruidos, pérdida de información y cambios bruscos de carga.



POLYTECHNIC UNIVERSITY OF CATALONIA

Electrical Engineering Department

THESIS DOCTORAL

Wavelet Transform–Neural Network based protection relay
design for high voltage transmission lines

Author: Eng. Javier Iglesias Lorenzo

Director: Prof. Dr-Ing Ángel L. Orille Fernández

Abstract

The great advance of the microprocessor and computer technology has allowed the electromechanical and analog protection devices to be substituted by digital ones. However, the algorithms used in digital protections have some disadvantages related to the errors caused by current transformer saturation, voltage transformer ferro-resonance or by dynamics arcing faults.

Over the past 10 years there have been some advances in the application of artificial intelligence, especially of neural networks, on power system analysis. These applications were useful in the prediction of optimum load flow and fault pattern classification. The term pattern classification encompasses a wide range of information processing problems of great practical significance. Often the framework in which to formulate solutions to pattern recognition is the statistical one, with the develop of an algorithm to be able to correctly classify a previously unseen pattern. One approach to statistical pattern recognition is using Bayes' theorem, which gives the probability of the pattern belonging to a particular class, and expresses this posterior probability in terms of previous measurements. The space is divided up into decision regions depending on the observed features. The boundaries between regions

are known as decision boundaries. The outputs of a neural network can be interpreted as posterior probabilities calculated with the error function (the network training is based on maximum likelihood which is equivalent to minimization of an error function), and the neural network approximates the decision boundaries of the Bayes' theorem.

For these reasons and because of the advantage of the parallel processing capabilities of the neural networks, our objective here is to search for new applications of neural networks on power system protection in order to improve it and solve the problems mentioned above.

In order to do this in this thesis, the artificial neural networks are applied to the protection of high voltage transmission lines, assuming dynamic arcing faults, the current transformer saturation, the change of the short circuit levels, the change of the power network topology, the bad and noisy data, and sudden load changes.

The methodology carried out in a special training process of the neural networks, using protection relays by means of simulated faults data, obtained by the electromagnetic transient program (EMTDC/PSCAD) applied to a generalized power network model which includes all the possible topologies and load levels. The training algorithm was implemented by the author in the C++ language program.

Within this project we included the study and application of the wavelet transform, which showed a series of advantages in front of traditional methods in signal processing. In traditional power signal analysis tools, among several algorithms, the Fourier transform has been used as well as the Kalman filtering, etc. However, in presence of non stationary signals the performance of these techniques are limited. Thus, if there is a local transient over some small interval of time in the lifetime of the signal, the transient will contribute to the Fourier transform, but its location on the time axis will be lost. Wavelets analysis overcomes this limitation by employing an analyzing function that is local both in time and frequency. The wavelet transform is a powerful tool for the study and analysis of transient phenomena in electric power systems.

Furthermore, in this work the wavelet transform has been implemented with a neural network which allows us to incorporate it within the whole network for pattern recognition. Both neural networks along with the information supplied by the wavelets, have made it possible to increase the speed and reliability of the relay, especially during the fault inception.

Also, one of our aims was to carry out the practical implementation of an electronic board in order to test the performance of the neural relay. To do this, it was necessary to use equipment to carry out the laboratory test, by emulating the same or a similar system employed while designing and training the relay.

Prof. R. K. Aggarwal, in the Electrical department in the University of Bath expertise in the application of signal processing and Artificial Intelligence technology for the development of novel intelligent relays for Power Systems, both for transmission and distribution systems. Their experience is not only in the CAD work but also in the design and engineering of prototype hardware. To do this the RTDS (Real Time Digital Simulator) system was employed. The obtained results were fully satisfactory.

These successful tests results encourage investment in neural networks in high speed protection for high voltage transmission lines. The response time is even less than 1.8 ms for faults close to the relay, which has a good performance in front of noise, faulty data and sudden change of load.

ÍNDICE GENERAL

1. Introducción

2. Métodos de protección de líneas de transmisión

2.1. Introducción

2.2. Métodos de protección de las líneas de transmisión

2.2.1. La protección de distancia

2.2.2. La protección por hilos pilotos

2.3. Protecciones analógicas de líneas de transmisión de alta tensión

2.4. Protecciones digitales de líneas de transmisión de alta tensión

2.5. Métodos avanzados de protección de líneas de alta tensión

3. Modelización del sistema de potencia

3.1. Introducción

3.2. Barras

3.3. Líneas de transmisión

3.4. Cargas y generadores

3.5. Transformadores de tensión y de intensidad

3.5.1. Transformadores de intensidad

3.5.2. Transformadores de tensión capacitivos

3.6. Fallos con arcos eléctricos dinámicos

4. Redes neuronales artificiales

4.1. Introducción

4.2. Modelo de neurona

4.3. Arquitectura de redes neuronales

4.4. Procedimiento de entrenamiento supervisado de las redes neuronales artificiales

4.5. Consideraciones sobre el entrenamiento de una red neuronal artificial

4.5.1. Inicialización de pesos

4.5.2. El factor de aprendizaje

4.5.3. Regla de aprendizaje “Delta-Bar-Delta”

4.5.4. El momento

4.5.5. Parámetros de la función de activación tangente hiperbólica

4.5.6. Método de validación cruzada

- 4.6. El mecanismo mixto de actualización de pesos
- 4.7. Consideraciones sobre el cambio del valor de la salida de la ANN
- 4.8. Consideraciones de normalización
- 4.9. Estabilización de la respuesta de la red neuronal
- 4.10. Implementación de las redes neuronales

5. La transformada wavelet

- 5.1. Introducción
- 5.2. Representación temporal
- 5.3. Transformada de Fourier
- 5.4. Transformada de Gabor
- 5.5. Transformada wavelet
 - 5.5.1. Fundamentos de la transformada wavelet
 - 5.5.2. Aplicaciones de la transformada wavelet
- 5.6. Ejemplo
- 5.7. Parámetros básicos en la transformada wavelet
- 5.8. Estudios previos
- 5.9. Influencia de los parámetros de la transformada wavelet
- 5.10. Ejemplo
- 5.11. Valoración de los resultados
- 5.12. Transformada wavelet “off-line”
- 5.13. Transformada wavelet “on-line”
- 5.14. Ejemplo
- 5.15. Conclusiones

6. La transformada wavelet mediante redes neuronales

- 6.1. Introducción
- 6.2. La red neuronal como elemento de cálculo

7. Metodología, diseño y análisis de los relés propuestos

- 7.1. Introducción
- 7.2. Sistema empleado en la simulación
- 7.3. El relé MLF-DWT
- 7.4. Entrenamiento del relé MLF-DWT
- 7.5. Comportamiento del relé MLF-DWT y análisis estadísticos

7.6. El relé MLF-ZON

7.7. Entrenamiento del relé MLF-ZON

7.8. Comportamiento del relé MLF-ZON

7.9. Tiempos de respuesta del relé MLF-ZON

7.10. Conclusiones

8. Implementación y test de laboratorio del relé

8.1. Introducción

8.2. Sistema empleado en la simulación. RTDS

8.3. DSP empleada

8.4. Resultados experimentales

9. Conclusiones y recomendaciones

10. Bibliografía

11. Apéndice A: Comportamiento del relé MLF-DWT

12. Apéndice B: Comportamiento del relé MLF-ZON

Capítulo 1 Introducción

La función básica de las protecciones de los sistemas eléctricos de potencia es proteger a los mismos contra condiciones de funcionamiento anómalo y los fallos que pueden causar pérdidas y averías de equipos y aparatos. Existen muchos tipos de perturbaciones que sufren los sistemas eléctricos de potencia como son: cortocircuitos, sobrecargas, sobretensiones, oscilaciones y desequilibrios. La mayoría de los fallos son cortocircuitos que se producen a causa del deterioro mecánico del aislamiento, sobretensiones atmosféricas y de maniobra, viento y objetos entre los conductores.

Las perturbaciones se pueden limitar mediante diseño mecánico resistente de los diferentes equipos e instalaciones, reforzando la malla de tierras, limitando las corrientes de la falta, aumentando los niveles de aislamiento, apantallamientos y el empleo de protecciones. Con equipos bien diseñados, bien aislados y con resistencias mecánicas elevadas se pueden disminuir las probabilidades de los fallos. Por otro lado, la duplicación de los equipos puede reducir la probabilidad de la interrupción del servicio pero aumentará el coste de las instalaciones. Ambas medidas aumentarán la fiabilidad del sistema pero también el coste de la instalación. Una combinación de ambas medidas junto a un sistema de protección adecuado dará los índices deseados de fiabilidad y hará que la instalación sea económicamente viable. Por supuesto, el factor que determina todo esto es la importancia que se dé a la continuidad del servicio eléctrico.

Esta tesis se enmarca dentro del campo de las protecciones de las líneas de transmisión de alta tensión (400 kV). Hay dos tipos principales de protecciones de líneas de transmisión: las protecciones de distancia y las protecciones diferenciales. La protección de distancia, objeto de esta tesis, se basa en la medición de la impedancia aparente de la línea de transmisión desde el punto del relé hasta el punto del fallo, que se comparará con la impedancia de la línea

por kilómetro para detectar y localizar el fallo, y coordinar las operaciones de los relés. Esto se hace midiendo las tensiones y las corrientes en el punto del relé. Por otro lado, los relés diferenciales miden las corrientes en los dos extremos de la línea, y dependiendo de la diferencia entre ellas, se manda o no una señal de disparo. Las protecciones diferenciales son las más fiables y selectivas de las protecciones, pero son mucho más caras que las protecciones de distancia por los canales de comunicación que intercambian los valores de las corrientes entre los relés.

En la actualidad, en los sistemas eléctricos de potencia existen muchos tipos de relés digitales en funcionamiento. La mayoría de ellos están directamente afectados por el tipo del filtro usado para eliminar los armónicos introducidos por los dispositivos semiconductores, junto con los fenómenos extraordinarios como los arcos, la saturación de los transformadores de intensidad, la ferorresonancia de los transformadores de tensión, etc. Estos fenómenos, pueden causar un retardo adicional de tiempo y afectar negativamente al rendimiento del relé.

Las aplicaciones de los métodos de la inteligencia artificial en el campo del análisis de los sistemas de potencia han aumentado muy rápidamente. Uno de estos métodos es el empleo de las redes neuronales artificiales (ANN) que imitan el funcionamiento del cerebro humano. Las redes neuronales se usaron para el reconocimiento de las imágenes y sonidos, para el procesamiento de los datos y señales, y como clasificadores. En el campo del análisis de los sistemas de potencia, hay investigaciones para aplicar la tecnología de las redes neuronales para la predicción de los parámetros y las cargas del sistema, el análisis de la seguridad, la estabilidad y las protecciones.

En esta tesis, las redes neuronales artificiales se usarán para solucionar el problema de las protecciones de las líneas de transmisión de alta tensión teniendo en cuenta unos fenómenos críticos como son los arcos dinámicos, la saturación de transformadores de intensidad, el cambio del nivel de cortocircuito y el cambio de la topología de la red. Para entrenar las redes neuronales, se generó una gran base de datos, para una sistema de cinco barras y cinco líneas de transmisión cuyos parámetros fueron tomados de una parte del sistema de Red Eléctrica de España (REE). Las simulaciones se realizaron usando el programa PSCAD-EMTDC. El entrenamiento de las redes neuronales se hizo mediante un programa en lenguaje C++, desarrollado por el autor, usando ordenadores personales que funcionan bajo el sistema operativo Windows.

Asimismo, uno de los objetivos de este trabajo era realizar la implementación práctica del diseño realizado en un sistema electrónico que permitiera comprobar la eficacia del mismo. Para llevar a cabo el montaje experimental se necesitaba un sistema que permitiera simular los sistemas eléctricos similares a los empleados en el proceso de diseño y entrenamiento del relé.

El Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Bath cuenta con el equipo RTDS, que constituye el complemento del sistema de simulación PSCAD, con el que es posible llevar a cabo la simulación y ensayo de prototipos de equipos eléctricos. Bajo la dirección del Prof. Aggarwal se llevó a cabo las pruebas de laboratorio del relé neuronal que resultaron plenamente satisfactorias.

Los alentadores resultados obtenidos, son un buen estímulo para el uso de las redes neuronales en las protecciones de alta velocidad para líneas de transmisión de alta tensión ya que hemos obtenido un tiempo de respuesta máximo de 5 ms para los fallos muy débiles y un tiempo mínimo de 1.8 ms para los fallos muy cercanos al relé. También han dado una buena respuesta frente a datos defectuosos y ante la pérdida de información, y frente a los cambios bruscos de carga.

Estos resultados, enseñan que el uso de las redes neuronales en las protecciones de alta velocidad para líneas de alta tensión cumplen con las cuatro propiedades básicas de las protecciones:

Velocidad: Los relés basados en redes neuronales han dado pequeños tiempos de respuesta entre menos de 2 ms y 4 ms para el 95 % de los casos estudiados.

Economía: se puede implementar complejos sistemas de protección basados en redes neuronales utilizando tarjetas simples de DSP de coste reducido frente a tarjetas especiales de redes neuronales.

Selectividad: el relé neuronal cumple con las premisas de selectividad actuando dentro de su zona de protección

Fiabilidad: la propiedad de generalización de las redes neuronales permite un alto grado de fiabilidad.

Capítulo 2 Métodos de protección de líneas de transmisión

2.1 Introducción

Las partes principales de un sistema de potencia son los generadores, transformadores y líneas de transmisión. Cada día, se mejora el diseño, los métodos de control y las protecciones. Los fallos que pueden surgir en un generador son muy limitados y controlables por tratarse de un equipo ubicado en el interior del edificio de la central. Además, puede existir otro generador de reserva y que puede hacer frente a la demanda, de forma total o parcial, cuando falla el generador principal. Con los transformadores ocurre lo mismo. Sin embargo, las líneas de transmisión de alta tensión suelen ser muy largas de modo que no se pueden localizar a priori los lugares en que se van a producir los fallos y por tanto no permiten tomar medidas similares a las anteriores.

Por tanto, resulta evidente que las líneas de transmisión son las partes más críticas de los sistemas de potencia y deben protegerse perfectamente para mantenerlas en las mejores condiciones de servicio. La desconexión de una línea significa la pérdida de capacidad de transmisión y de alimentación de las cargas, y en consecuencia una disminución de la fiabilidad del sistema de potencia. Para evitar las consecuencias de una falta, los sistemas de protección de las líneas de transmisión tiene que actuar de forma muy rápida y selectiva evitando que una falta en una de ellas no se propague al resto del sistema.

Las partes principales de un sistema de protección de una línea de transmisión son:

1- Los transductores de señales.

Están constituidos por transformadores de intensidad y transformadores de tensión que permiten convertir los valores elevados de las tensiones y de las corrientes de las líneas en valores reducidos para su aplicación al relé. Estos equipos pueden introducir errores en las medidas a causa de la saturación de los transformadores de intensidad o de la ferresonancia de los transformadores de tensión, que al aplicarlas a los relés pueden producir una operación incorrecta del mismo. Un buen relé tiene que hacer frente a estos errores.

2- Los relés.

Son dispositivos que toman las señales de los transformadores de tensión y de intensidad y las procesan de una manera digital o electromagnética, dando una señal de operación a los interruptores, para que estos aíslen de la red al elemento que está afectado por el fallo. Sin embargo, hay unos factores que provocan la mala actuación del relé, como son los arcos que pueden acompañar a los fallos y los errores de los transductores de tensión e intensidad.

3- Los interruptores automáticos.

Son los aparatos dotados de suficiente poder de corte, encargados de aislar el elemento de la red afectada por el fallo cuando recibe una señal de apertura de los relés. Para minimizar los efectos del arco entre los contactos, este elemento debería abrir instantáneamente en el momento en que la corriente pase por cero.

Por tanto, la protección de una línea se compone de una cadena de sensores, cables que conectan los sensores a los relés, los relés y los interruptores. Para mejorar el sistema de protección, hay que mejorar la respuesta de los sensores, aumentar la velocidad de los relés y de los interruptores. Además, el relé tiene que responder bien a todo tipo de fallos, incluso cuando hay saturación en los transformadores de intensidad, ferresonancia en el transformador de tensión o cuando el fallo va acompañado de un arco.

2.2 Métodos de protección de las líneas de transmisión

Hay muchos métodos que se pueden usar juntos o separados para proteger las líneas de transmisión. Estos métodos dependen directamente del nivel de la tensión, de la longitud de la

línea y de la topología del sistema de potencia. A continuación, nos centraremos en explicar los métodos relativos a la protección de distancia y a la protección usando hilos piloto.

2.2.1 La protección de distancia

La protección de distancia es el método más empleado en la protección de las líneas de alta tensión. La idea principal del método de operación de este tipo de relés consiste en calcular la impedancia entre el relé y el punto del fallo, a partir de los valores transformados de la tensión y la corriente de la línea. Comparando los valores de la impedancia calculada y de la línea podemos saber donde está el fallo, dado que la impedancia de la línea es directamente proporcional a su longitud. Cada relé tiene un valor de ajuste que se puede determinar de la topología de la red. Si la impedancia calculada por el relé es menor o igual a este valor, el relé dispara inmediatamente, y si no, sólo actuará como respaldo de otra protección, una vez transcurrido un tiempo de retardo preajustado. El punto del ajuste hay que determinarlo correctamente, porque si su valor es mayor que el de la impedancia de la línea a proteger, el relé va a actuar para los fallos que se producen fuera de su zona lógica. Este efecto se llama sobrealcance del relé. Por el contrario, si el valor del punto de ajuste es menor que el de la impedancia de la línea a proteger, entonces el relé va a ver los fallos que se producen al final de la línea como fallos externos y actuará como si se tratase de fallos en la segunda zona, tardando en aislarlos. Este efecto se llama subalcance del relé. El ajuste ideal es aquél en que la primera zona del relé cubre el 100% de la línea. Sin embargo, a causa de la existencia de los errores provocados por los equipos de medida, de los arcos que acompañan a los fallos y de los transformadores de potencia, que pueden existir en los extremos de la línea, la primera zona se ajusta al 85% de la longitud de la línea, y el 15% restante se protege mediante otro relé puesto al final de la línea. Por tanto, la primera zona del relé se ajusta en subalcance.

El método más común para proteger una línea, es la protección de distancia escalonada, donde el alcance del relé está dividido en tres zonas.

- a- La primera zona, en la que el relé tiene que dar una señal de disparo instantánea, cubre el 85% de la línea a proteger.
- b- La segunda zona, cubre entre el 120% y el 150% de la línea a proteger.
- c- La tercera zona, cubre toda la zona más allá de la segunda zona.

La figura 2.1 presenta los ajustes ideales y reales para una relé de distancia.

En la figura 2.1 podemos ver que el ajuste ideal de los relés *A* y *B* cubre el 100% de la línea *AB* como primera zona. Por otra parte, la segunda zona del relé *A* cubre la línea *CD*, y la segunda zona del relé *B* cubre la línea *EF*.

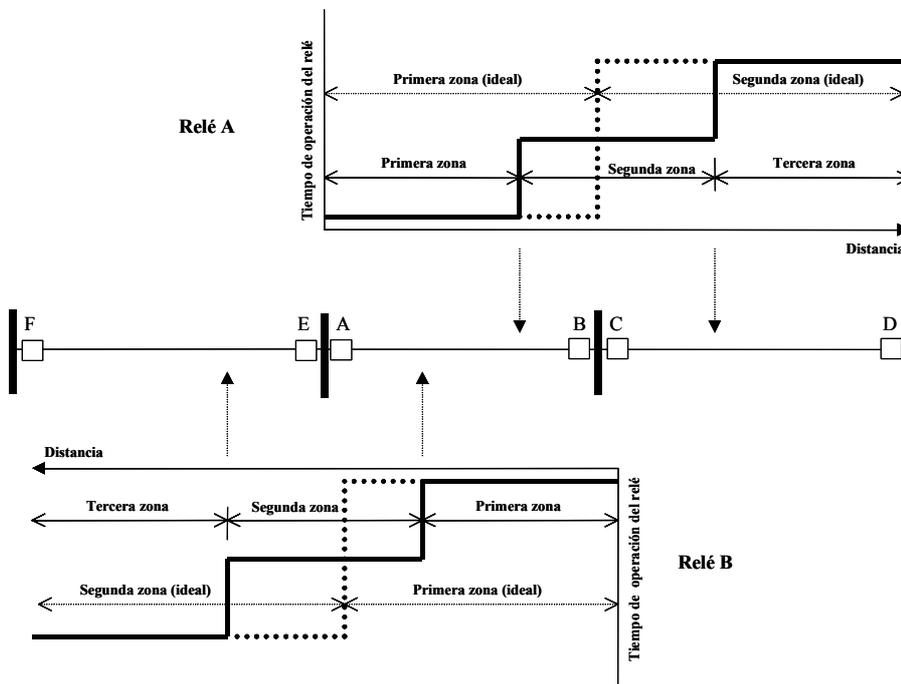


Fig. 2.1 Zonas de protección ideales y reales de los relés *A* y *B*.

A partir de estos ajustes, resulta evidente que el relé *A* va a disparar los fallos que se produzcan en el último 15% de línea *AB* como fallos en la segunda zona, mientras que lo debería haber disparado como primera zona. Para compensar este problema, el relé *B* va a disparar como primera zona y mandar una señal al relé *A* para que dispare instantáneamente. Otro problema que puede existir, es que la tercera zona puede tener un gran nivel de errores y se puede producir un subcance del relé *A* por los problemas de “infeed” en las barras *BC*. Para solucionar este problema, la tercera zona del relé *A* se reajustará para proteger la zona detrás del mismo.

Los relés de distancia se clasifican dependiendo de la forma de sus características. Básicamente, todas sus características son circulares porque se basan en las de los primeros relés electromecánicos. Sin embargo, las características se pueden modificar, usando dispositivos electrónicos y ordenadores. Los tipos más habituales de los relés de distancia son el relé de impedancia, el relé de admitancia (el relé mho), el relé de reactancia y el relé cuadrilateral. Usando una combinación de las características de estos relés se puede diseñar un relé con una característica más compleja. Los diferentes tipos de relés de distancia y los

algoritmos de protección están explicados detalladamente en los libros de texto [55-61]. También, hay muchos métodos digitales que dependen de los cálculos de los parámetros de las líneas y de los del fallo, y de los algoritmos de análisis de señal digital empleados, como la FFT (“Fast Fourier Transform”), filtros digitales FIR (“Finite Impulse Response”) o el filtro Kalman.

Los relés de distancia están muy condicionados por las topologías especiales de las redes eléctricas, como por ejemplo las líneas multi-terminales y líneas en paralelo. Estas diferentes topologías pueden afectar a las protecciones de distancia negativamente y pueden producir subalcance o sobrealcance. Otro problema que puede afectar a los relés de distancia es el margen de cargabilidad del relé. Un relé de distancia no debe disparar por un cambio de carga. Los relés “mho” tienen un margen de cargabilidad mayor que el relé de impedancia. También, este margen aumenta usando una combinación entre un relé “mho” y un relé “mho” de característica desplazada.

2.2.2 Las protecciones con comunicación por hilos pilotos

La protección con comunicación por hilos pilotos es una adaptación de los principios de operación de la protección diferencial, que permite usar cables de comunicación entre los relés. Este tipo de protecciones depende básicamente de un canal de comunicación entre los relés que permite despejar instantáneamente los fallos que pueden ocurrir en cualquier punto de la línea a proteger. Como vías alternativas de comunicación se emplean enlaces por microondas, uniones mediante fibras ópticas, cables de comunicaciones como se presenta en figura 2.2 (a), o usando la propia línea de potencia a la que se inyecta las señales de los relés mediante una onda portadora de alta frecuencia (40 a 500 kHz) que se pueden filtrar en los extremos de la línea usando circuitos de bloqueo (circuitos de trampa) como se presenta en figura 2.2 (b).

Una señal en un extremo de la protección por hilos piloto, se puede usar para bloquear o activar el relé en el otro extremo. En caso de una línea de transmisión con comunicación por ondas portadoras superpuestas a la línea, el método de bloqueo es el más favorable frente al riesgo de perder la señal inyectada cuando ésta se transmite por la línea que tiene el fallo. Sin embargo, cualquier otro método de comunicación permite usar el sistema de disparo. La idea básica de las protecciones piloto de una línea consiste en que estas deben actuar cuando cada

uno de los relés ubicados en los extremos de la misma ven el defecto en la dirección del otro, bloqueándose en cualquier otro caso.

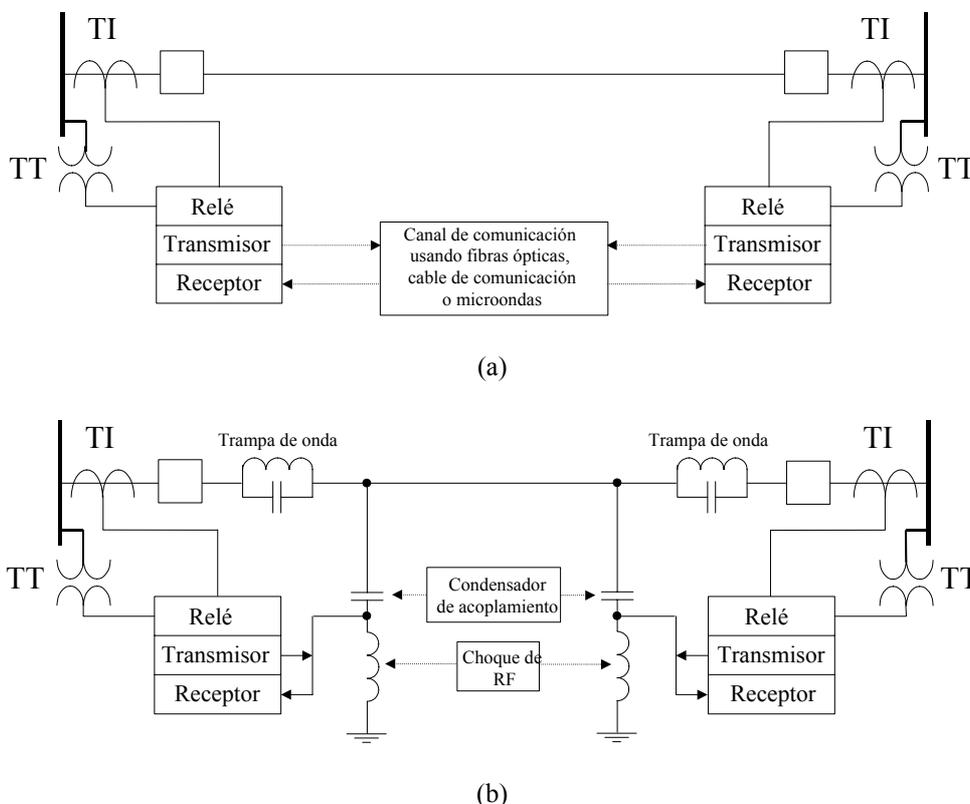


Fig. 2.2 Los diferentes tipos de esquemas de protección piloto: (a) usando un canal especial de comunicaciones (b) Usando ondas portadoras de alta frecuencia a través de la propia línea eléctrica a proteger.

2.3 Protecciones analógicas de líneas de transporte de alta tensión

Los primeros sistemas de protección de las líneas eléctricas de transporte estaban basados en sistemas electromecánicos. Estos sistemas pueden ser sencillos, como electroimanes, o más complejos, como los relés de inducción de disco o copa. Su actuación está basada en la fuerza que ejerce sobre el núcleo magnético o en el par electromagnético que las bobinas de corriente y tensión producen sobre el disco o la copa respectivamente. En condiciones normales de operación, existirá un par mecánico resistente mayor o igual que el electromagnético. En las condiciones de fallo, la tensión baja y aumenta la corriente produciéndose un par electromagnético mayor que el par resistente, por lo que el relé disparará.

Antes de los años cuarenta, las líneas no eran muy largas y los sistemas de protección de las mismas estaban basados en la protección diferencial. El gran desarrollo industrial posterior

originó la necesidad de emplear grandes líneas de transmisión lo que ocasionó un encarecimiento del sistema de protección diferencial. Este aspecto negativo dió lugar a que se empleasen en mayor medida las protecciones de distancia, lo que se tradujo en un auge de las investigaciones en este tipo de protecciones.

2.4 Protecciones digitales de líneas de transmisión de alta tensión

Las investigaciones para el uso de los ordenadores digitales para las protecciones de sistemas de potencia empezaron en los años sesenta. Sin embargo, los primeros equipos comerciales no aparecen hasta los años ochenta. En un principio, los relés digitales constituían tan solo una implementación digital de las protecciones analógicas, que procesan los datos disponibles de la red, es decir las tensiones y las corrientes. Usando los relés digitales, se pueden introducir unas características más complejas que las de las protecciones analógicas. En esta parte haremos una revisión sucinta de los sistemas de protección digital de líneas de alta tensión, que presentamos de forma cronológica.

- En 1969 G. D. Rockefeller [1], presentó las bases fundamentales para el uso de los ordenadores como relés de protección para las diferentes partes de una subestación.
- En 1971 Barry J. Mann y I. F. Morrison [2], presentaron un nuevo algoritmo digital de cálculo de la impedancia de una línea para un relé de distancia.
- En 1972 G. B. Gilerest, G. B. Rockefeller y E. A. Urden [3,4] describen y presentan los resultados de las pruebas de un relé de distancia para un sistema de 230 kV. Un programa almacenado en un ordenador hace todas las funciones del relé usando las salidas de un convertidor analogico-digital, que lee instantáneamente los valores de la tensión y la corriente.
- En 1977 A. G. Phadke, M. Ibrahim y T. Hlibka [5], presentaron las ecuaciones de las prestaciones de un relé de distancia de alta velocidad, basadas en la teoría de las componentes simétricas.
- En 1978 M. Chamia y S. Liberman [6], publicaron un artículo sobre la utilización de las ondas viajeras para la determinación de la dirección en los relés de protección de alta velocidad.
- En 1979 J. S. Thorp y otros [7], hicieron un repaso completo de los relés de impedancia en sistemas modernos de protección de líneas de transmisión. En este artículo muestran que

hay un nivel de incertidumbre en los valores de las impedancias estimadas por el relé, que depende directamente de la velocidad de la estimación.

- En 1988 G. D. Rockefeller y otros [8], propusieron la necesidad de sistemas de protección adaptativos, para incluir todos los cambios del sistema.
- En 1990 A. G. Phadke, and S. H. Horowitz [9], sugieren la idea de protecciones adaptativas, en las que el relé puede adaptarse, ponerse fuera de servicio cuando tiene un defecto y transferir su función a otro intacto. Aquí también abordan el uso de sistemas de protecciones redundantes, en los que se pueden tomar decisiones usando operaciones lógicas como AND, OR o VOTE.
- En 1992 Michel Meunier y otros [10], propusieron el uso de los filtros de respuesta a impulso finito para sistemas de protección. En el mismo año, P. K. Dutta and P. B. Dutta [11], propusieron un algoritmo basado en la teoría de las ondas viajeras para una protección de distancia de muy alta velocidad.

En estos diez métodos que se han presentado de forma resumida, se ve claramente que las protecciones digitales dependen directamente del análisis matemático de las ecuaciones de los sistemas de transmisión y en general del sistema de potencia. Estos métodos tienen la ventaja de ser muy rápidos y precisos. Por el contrario, tienen la desventaja de ser muy sensibles a los cambios en los parámetros del sistema, y por este motivo se han propuesto el uso de las protecciones adaptativas [11].

2.5 Métodos avanzados de protecciones de líneas de alta tensión

Con el avance de la tecnología de los ordenadores y el aumento de sus capacidades, el avance de los sistemas digitales y los dispositivos de procesamiento digital de las señales (DSP), ha aumentando la posibilidad de implementar sistemas de protección muy complejos. Por otro lado, la mayoría de los métodos matemáticos dependen directamente del análisis de Fourier que necesita al menos medio ciclo después de que se inicia el fallo para tener una respuesta válida. Los algoritmos de inteligencia artificial como la lógica difusa, las redes neuronales y los sistemas expertos tienen la ventaja de obtener una relación entre los parámetros que se puede medir y las decisiones que hay que tomar sin necesidad de usar métodos matemáticos sofisticados y, también, pueden implementarse mediante circuitos electrónicos y microprocesadores.

Las redes neuronales artificiales (ANN), se han implementado perfectamente para el reconocimiento de las imágenes y los sonidos, la clasificación de las señales de radar y el procesamiento y clasificación de los datos. En los sistemas eléctricos de potencia se emplearon las redes neuronales para solucionar el despacho económico [12], la predicción de la carga [13], la estabilidad de los sistemas de potencia [14], la restauración de los sistemas eléctricos de potencia [15], la seguridad de los sistemas eléctricos de potencia [16], la estimación de los armónicos [17,18], la protección diferencial de transformadores [19-23] y el control de los motores de inducción [24]. También, existen patentes de la empresa Siemens para un detector de fallos para líneas de alta tensión [25]. En esta parte haremos una revisión cronológica rápida de los artículos más recientes en el campo de protecciones de sistemas eléctricos de potencia, especialmente en las líneas de alta tensión usando las técnicas de la inteligencia artificial.

- En 1992 D. J. Fedirchuk [26], presenta una red neuronal para detectar los fallos de alta impedancia con arco y distinguir entre ellos y las cargas que tienen características similares, como las soldaduras con arco eléctrico y las lámparas fluorescentes.
- En 1993 A. T. Jones y otros [27], propusieron el uso de una red neuronal para un reenganchador adaptativo. Se han procesado las ondas de tensión e intensidad en el punto del relé usando la transformada de Fourier rápida (FFT) antes de aplicarla a la red neuronal para identificar la presencia del arco.
- En 1994 Hong-Tzer Yang y otros [28], propusieron el uso de un sistema jerárquico de redes neuronales, para identificar el lugar del fallo usando las informaciones grabadas por los registradores.
- En 1996 Murari Mohan Saha y otros [29,30], propusieron el uso de las redes neuronales para mejorar el alcance de los relés de distancia y localizar el lugar de los fallos en las líneas con condensadores en serie.
- En 1996 L. Van der Sluis y otros [31], propusieron el uso de las redes neuronales para adaptar el ajuste de los relés de distancia para los circuitos de transmisión que contengan líneas dobles en paralelo. Los autores calculan un índice para corregir el valor de la impedancia vista por el relé, a fin de distinguir correctamente entre los fallos de primera y segunda zona cuando una línea está fuera de funcionamiento.
- En 1996 A. T. Jones y otros [32], presentaron una red neuronal para seleccionar la fase afectada por el fallo, y diseñar un reenganchador unipolar usando los ruidos de alta frecuencia generados por el fallo.

- Sachdev M. S. y otros [33], propusieron el diseño, la implementación y el test de una red neuronal para la estimación de la dirección del fallo. Las ondas de las tensiones y de las corrientes se mostraron a una frecuencia de 24 kHz, luego se procesaron usando un filtro de cuarto orden pasabajos, un filtro antisobrelapamiento y un filtro de respuesta a impulsos finitos de tres puntos. A continuación se volvieron a muestrear a una frecuencia de 1,2 kHz y finalmente estos valores se aplicaron a una red neuronal con retardo de tiempo. La red neuronal tiene cinco unidades de retardo de tiempo en la capa de entrada, y una estructura de tres capas con 12, 4, y 1 neuronas respectivamente. La salida de la red neuronal es +1 para fallos hacia adelante y -1 para fallos hacia atrás. Esta red neuronal se ha implementado mediante una tarjeta DSP obteniendo una respuesta muy rápida. El estimador propuesto dió una buena respuesta frente los fallos de alta y baja impedancia, altas y bajas relaciones de la impedancia de la fuente respecto a la línea (SIR), pérdidas de datos, datos erróneos y diferentes tipos de fallos. Desafortunadamente los autores no han mostrado la respuesta de la red neuronal frente la saturación de los transformadores de intensidad y los arcos dinámicos. El hecho de que los autores en su trabajo sólo hayan usado las muestras obtenidas posteriormente al fallo puede afectar negativamente a la generalización de la red neuronal.
- Thomas Dalstein y otros [34], presentan el uso de una red neuronal para la clasificación del fallo. En su trabajo muestrearon las ondas de tensión y corriente a 1 kHz y las normalizaron para tener un valor entre +1 y -1, y luego aplicaron dichos valores directamente a una red neuronal con cinco unidades de retardo de tiempo, y una arquitectura de tres capas, con 20, 15 y 11 neuronas respectivamente. A cada una de las salidas le corresponde un caso de fallo. El tiempo de respuesta de esta red neuronal varía entre 5 y 7 ms. Adicionalmente emplean una red neuronal para distinguir entre los fallos francos y los fallos con arcos como apoyo de los reenganchadores. Además, los autores en su trabajo incluyeron durante el entrenamiento fallos con arcos y la saturación de los transformadores de intensidad. Sin embargo no muestran la respuesta de la red neuronal bajo estas últimas condiciones. Tampoco han usado un modelo de arco dinámico, sino simplemente una onda cuadrada superpuesta a la onda de tensión en el punto del fallo, y no han tenido en cuenta la respuesta de la red neuronal ante los cambios bruscos de la carga, el cambio de la relación entre la impedancia de la fuente respecto a la de la línea (SIR), los datos erróneos y la pérdida de datos. El tiempo de respuesta de la red neuronal que detecta los fallos con arco es muy grande, entre de 1,25 y 3 ciclos, y es inestable.
- Thomas Dalstein; Dejan J. Sobajic y otros [35], propusieron una red neuronal para la estimación de la dirección del fallo. Las señales de tensión y corriente muestreadas a 1

kHz y normalizadas se aplicaron a una red neuronal sin preprocesamiento. La red neuronal se ha entrenado para distinguir entre fallos hacia adelante (+1), fallos hacia atrás (-1) y fallos en la línea paralela a la ubicación del relé (0). La estructura de la red neuronal empleada es de tres capas con 20, 12 y 1 neuronas respectivamente. El tiempo mínimo de respuesta de la red neuronal es de 5 ms. No aportan información sobre el comportamiento de la red neuronal en caso de la respuesta con la saturación de los transformadores de intensidad, de armónicos en las señales de corriente, de datos erróneos. Tampoco han mostrado la respuesta de la red neuronal para fallos de campos cruzados, ni para los fallos detrás del relé con alimentación desde sólo un extremo.

- Thomas Dalstein y otros [36,37], propusieron un grupo numeroso de redes neuronales artificiales con retardos de tiempo para detectar la zona afectada por el fallo, que funcionan como un relé de distancia para clasificar entre la primera y la segunda zona de fallo. La red neuronal usada tiene 4 unidades de retardo de tiempo en la capa de entrada. Además desarrollan un clasificador que se basa en los métodos de Phadke/Ibrahim y Bonard Bastide. Asimismo, emplean una red neuronal por cada tipo de fallo, y dependiendo del resultado del clasificador de fallos, se elige la red correspondiente. Cada red neuronal tiene una estructura de 20,20 y 1 neuronas por cada capa respectivamente. En su trabajo no han incluido la tercera zona de fallo. La respuesta de este grupo de redes neuronales es parecida a la obtenida mediante métodos numéricos, aunque mucho más rápida.
- Nabil Khalil [38], desarrolla un relé de protección basado en una red neuronal tipo FIR, cuyos cometidos son: la detección del fallo, la detección de la fase afectada y la estimación de la dirección del fallo en todas las condiciones de operación. El trabajo incluye también un relé específico para líneas paralelas y una unidad especial para cada subestación que toma todas las salidas de los relés de las líneas, la salida de la protección de la subestación y los estados de los interruptores locales, con el fin de poder respaldar el fallo de un relé, asegurar las respuestas de los relés y determinar la ruta del fallo. El relé ha sido entrenado teniendo en cuenta todas las contingencias de la red: saturación de transformadores de intensidad, arcos dinámicos, variación de la impedancia de las fuentes, etc., presentando un comportamiento excepcional en todos los casos considerados. La desventaja de este relé es su elevada complejidad, ya que la red neuronal tiene una estructura de dos subcapas dentro de las capas ocultas, que provoca un incremento muy elevado del número de operaciones que realiza, además de un entrenamiento muy complejo.

En este trabajo se desarrolla un sistema de protección para líneas eléctricas de alta tensión que usa las señales de las tensiones y corrientes sin filtrarlas, y que sirve como protección de distancia, protección mediante hilos piloto y protección diferencial transversal. El sistema propuesto usa diferentes estructuras de redes neuronales como:

- 1- Una relé neuronal MLF-DWT (MultiLayer Feedforward – Discrete Wavelet Transform), cuyos cometidos son la detección del fallo así como de la fase afectada.
- 2- Una red neuronal MLF-PRE, cuya misión consiste en determinar la dirección del flujo en ausencia de fallo.
- 3- Una red neuronal MLF-DIR, cuya tarea consiste en determinar la dirección del fallo.
- 4- Tres redes neuronales, MLF-ZON, una por cada tipo de fallo, monofásico, bifásico y trifásico, para determinar la zona del fallo.

También se llevó a cabo la implementación y el test experimental del mismo, labor que se realizó en el departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Bath, Inglaterra, bajo la dirección del profesor R. K. Aggarwal, empleando el sistema RTDS (Real Time Digital Simulator) [100], habiéndose obtenido unos resultados plenamente satisfactorios.

Capítulo 3 Modelización de sistemas de potencia

3.1 Introducción

El objeto de esta investigación es estudiar la posibilidad del uso de las redes neuronales en la protección de distancia de las líneas de alta tensión. En el capítulo cuatro se realiza una breve descripción de los fundamentos de las redes neuronales. Para el entrenamiento de las redes neuronales se necesitan patrones que deben contener todos los posibles tipos de fallos y condiciones de funcionamiento. Estos patrones se pueden obtener de dos maneras: la primera, a partir de la lectura de los valores reales registrados en los puntos de la red eléctrica real en donde están ubicados los relés de protección; y la segunda, mediante la simulación de una red eléctrica utilizando un programa informático a tal efecto. El primer procedimiento es de muy difícil aplicación y resulta inviable para cubrir todas las necesidades del entrenamiento. El motivo anteriormente apuntado hizo que nos decantásemos por la simulación. En este capítulo, para la simulación de una red eléctrica emplearemos el programa EMTDC-PSCAD [62]. Dicho programa es una herramienta informática contrastada dentro del campo de los sistemas eléctricos de potencia y muy ampliamente utilizada en los estudios realizados por las empresas del sector eléctrico y en los trabajos de investigación realizados en las universidades. Con el EMTDC-PSCAD se pueden obtener las evoluciones temporales de las magnitudes eléctricas de un sistema eléctrico ante cualquier tipo de perturbación. El sistema eléctrico de potencia objeto de estudio e investigación consta de cinco barras, cinco líneas de transmisión y cuatro cargas. La figura 3.1 muestra el esquema unifilar de dicho sistema. Los parámetros de las líneas de transmisión del sistema se han tomado de algunas líneas de transmisión de Red Eléctrica de España (REE).

A continuación, vamos a describir los distintos elementos de la red eléctrica como los generadores, las cargas, las barras y las líneas de transmisión. Posteriormente, se representarán los modelos de los transformadores de intensidad y de los transformadores de tensión capacitivos.

3.2 Barras

En la figura 3.1 se representa la red eléctrica utilizada en esta investigación. En ella, las barras se pueden agrupar formando tres grupos diferentes:

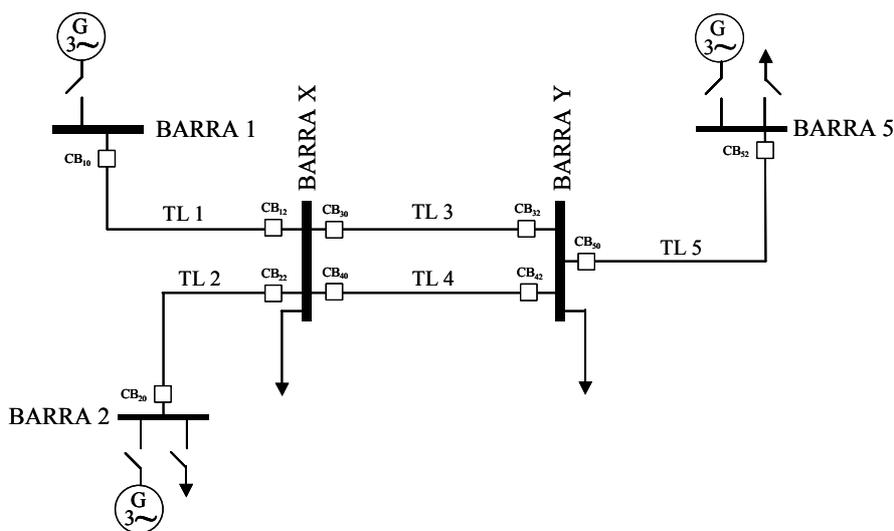


Fig. 3.1 Red eléctrica de cinco barras utilizada en esta investigación.

El primer grupo está formado por la barra 1, que es una barra con generación y una potencia máxima de 1,6 GW. Su nivel de cortocircuito puede variar entre 15 GVA y 45 GVA.

El segundo grupo está formado por las barras 2 y 5 que son barras que pueden tener tanto cargas pasivas como generación. La potencia máxima que pueden inyectar a la red cada una de estas barras es de 800 MW. El nivel de cortocircuito en la barra 2 puede variar entre 7,5 GVA y 22,5 GVA; y en la barra 5 entre 10 GVA y 30 GVA.

El tercer grupo está formado por las barras X e Y que son barras de carga pasiva y una intensidad máxima de corriente de 1 kA.

A efectos de simulación las barras se consideran como nudos simples.

3.3 Líneas de transmisión

Las líneas de transmisión se pueden representar usando modelos diferentes como: sección en Π con parámetros concentrados, sección en T con parámetros concentrados o parámetros distribuidos. Los modelos de parámetros distribuidos, son los más precisos para la simulación transitoria de las líneas de transmisión, y se dispone de varios en función del estudio a realizar. Para las líneas de la red eléctrica utilizada en esta investigación, las simulaciones se realizaron utilizando el modelo de Bergeron. Asimismo, se supone que las líneas están idealmente transpuestas.

Dentro de la red estudiada se pueden distinguir tres tipos diferentes de líneas de transmisión: El primer tipo corresponde a la línea TL1 que es una línea de 400 kV con un circuito triplex de 100 km de longitud. La resistencia eléctrica del conductor de fase es de $0,0583 \Omega/\text{km}$ y la del conductor de tierra es de $0.36 \Omega/\text{km}$ a 20°C . La carga nominal que puede fluir en esta línea es 2 kA. En la figura 3.2 se representan la configuración y el tipo de torre utilizada en la misma.

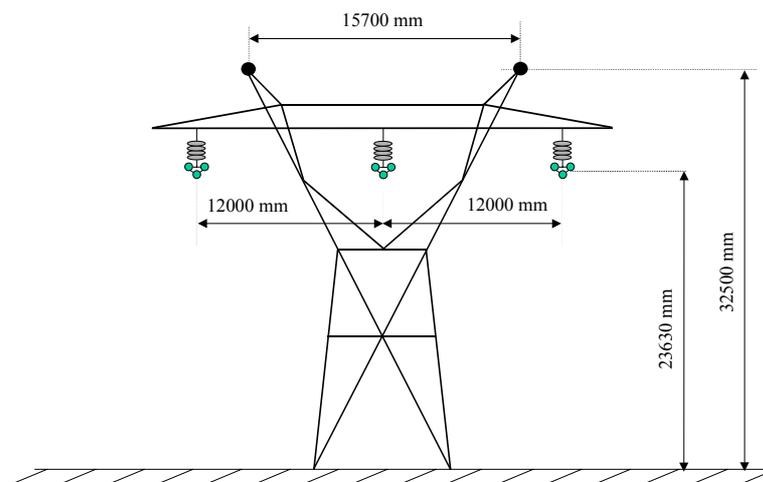


Fig. 3.2 Configuración y tipo de torre de la línea TL1.

El segundo tipo corresponde al de las líneas TL2 y TL5, que son líneas con un circuito y conductores en haz dúplex de 75 km y 120 km de longitud respectivamente. La resistencia eléctrica del conductor de fase es de $0,0583 \Omega/\text{km}$ y la del conductor de tierra es de $0.36 \Omega/\text{km}$ a 20°C . Su carga nominal es de 1 kA. En la figura 3.3 se representan la configuración y el tipo de torre utilizada en las mismas.

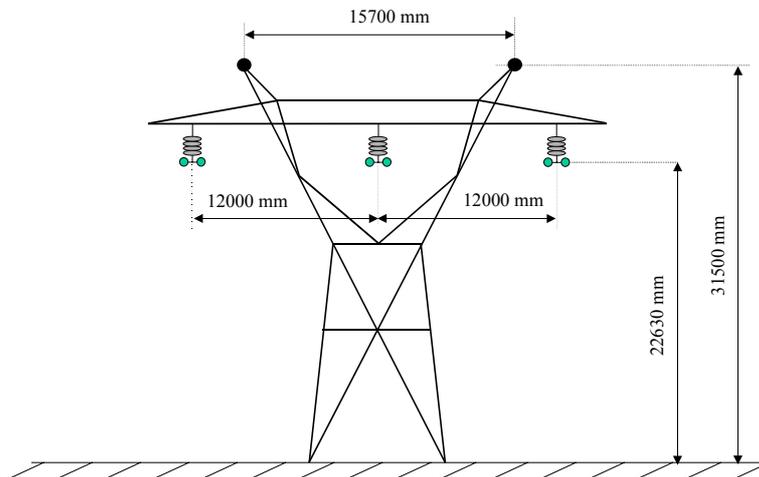


Fig. 3.3 Configuración y tipo de torre de las líneas TL2 y TL5.

En el tercer tipo están incluidas las líneas TL3, TL4 que son líneas de doble circuito dúplex. Ambas líneas tienen una impedancia homopolar de acoplamiento entre ellas, una longitud de 150 km y su carga nominal es de 1 kA por fase. La resistencia eléctrica del conductor de fase es de 0,0583 Ω /km y la del conductor de tierra es de 0.763 Ω /km a 20° C. En la figura 3.4 se representan la configuración y el tipo de torre utilizado en estas líneas.

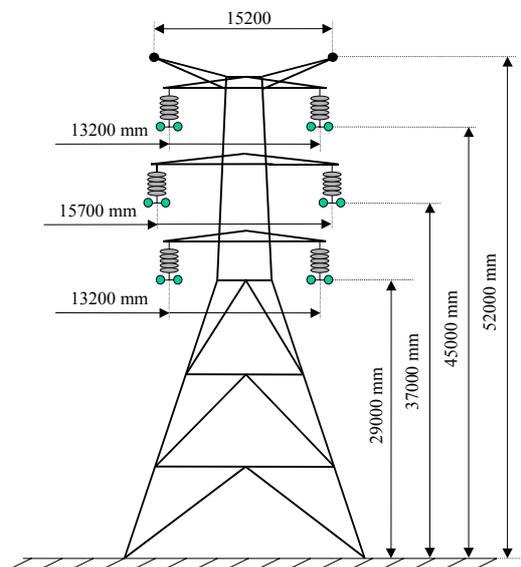


Fig. 3.4 Configuración y tipo de torre de las líneas TL3 y TL4.

Los parámetros de las líneas de transmisión que se usan en la simulación se calculan a partir de las dimensiones geométricas de las torres y de los parámetros físicos de los conductores. La frecuencia del sistema es 50 Hz y la resistividad del terreno es de 200 Ω .m.

3.4 Cargas y generadores

Se asume que todas las cargas son estáticas, pasivas y equilibradas, y pueden ser tanto resistivas como inductivas o capacitivas. Las cargas se simulan como simples impedancias. Los generadores se simulan como fuentes de tensión en serie con una impedancia inductiva pura que fija el nivel del cortocircuito deseado. En la barra 1 hay un generador siempre conectado, mientras que los generadores conectados a las barras 2 y 5 se pueden desconectar aleatoriamente. De esta manera se pueden obtener diferentes topologías, niveles de cortocircuito y cargas.

3.5 Transformadores de tensión y de intensidad

Debido a que los valores de la tensión y de la corriente que fluyen por las líneas de transmisión varían en un rango muy amplio, y a la gran variedad de sus valores nominales, no resulta rentable fabricar un relé para cada caso. Por ello todos los relés de un mismo tipo son intercambiables y se adaptarán a los niveles de tensión y corriente de la línea mediante transductores. Estos transductores son los transformadores de tensión e intensidad. Otra gran ventaja de estos transductores es que permiten un aislamiento galvánico entre el sistema de potencia de un lado y los relés y equipos de medida del otro lado. Los valores nominales de los secundarios de estos transductores están normalizados, lo que permite el intercambio de los mismos en caso de avería, por otro equivalente del mercado. El valor nominal de los secundarios de los transformadores de intensidad es de 5 A y el de tensión 120 V. Además, los transformadores de intensidad tienen que aguantar sobreintensidades de cortocircuito de hasta 50 veces de la corriente nominal, y los transformadores de tensión tienen que aguantar sobretensiones es de 1,25 veces la tensión nominal.

3.5.1 Transformadores de intensidad

Los transformadores de intensidad sólo tienen un primario y pueden tener más de un secundario. Estos transformadores se pueden sustituir por su circuito equivalente en los estudios de comportamiento permanente [63]. Aunque se produce un error pequeño por el desfase entre las corrientes del devanado primario y secundario y una pequeña caída de tensión, la relación de transformación se considera que es fija, lo que supone que el transformador está trabajando en la parte lineal de su curva magnética característica y se puede despreciar el efecto del hierro.

Aunque, el rendimiento del transformador de intensidad no es un tema importante, sí lo es su comportamiento en caso de fallo, dado que en ese caso el transformador se puede saturar, con lo que ya no se puede despreciar el efecto del hierro. Cuando hay un fallo, la corriente que circula por el transformador puede ser muy elevada y con un valor considerable de la componente unidireccional de la corriente, que puede producir flujo remanente en el hierro. Entonces, el transformador de intensidad se puede saturar y la corriente en el secundario se distorsiona. Sin embargo, hay otra solución que es usar los transformadores magneto-ópticos en los que la ausencia de núcleo ferromagnético les confiere una característica magnética parcialmente lineal. Este tipo de transformadores funciona como convertidores de corriente a tensión. La tensión en el secundario es directamente proporcional a la intensidad de la corriente del primario.

En esta investigación, las simulaciones se realizan con el modelo de transformadores magnéticos empleados corresponden a los modelos desarrollados [98] para ser empleados en el programa PSCAD. Este modelo es muy completo e incluye todas las consideraciones a tener en cuenta, como saturación de núcleo magnético, figura 3.5, así como fenómenos de ferorresonancia, etc,

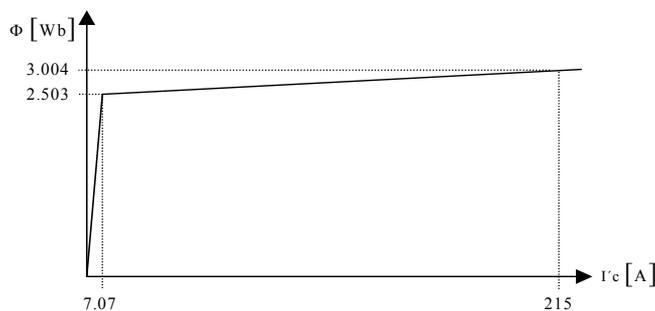


Fig. 3.5 Característica I- Φ del transformador.

La figura 3.6 muestra las corrientes de las bobinas primarias y secundarias del transformador de corriente durante la saturación. La red neuronal se ha de entrenar teniendo en cuenta este efecto, por lo que se han de incluir patrones bajo estas condiciones.

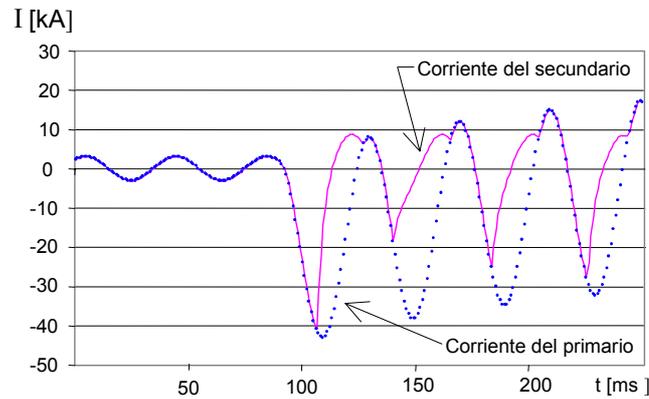


Fig. 3.6 Corrientes de las bobinas primaria y secundaria del transformador de intensidad durante la saturación.

3.5.2 Transformadores de tensión capacitivos

En general, los transformadores de tensión son transformadores electromagnéticos reductores normales donde su primario está conectado a la línea de transmisión y su secundario está conectado a los equipos de medición y protección. Sus características son similares a las de los transformadores de potencia, pero resultan muy costosos para las aplicaciones de alta tensión, por lo que se emplean transformadores de tensión capacitivos. Este tipo de transformador está formado por un divisor capacitivo y un elemento electromagnético. El punto de derivación se conecta a un transformador electromagnético de tensión mediante una bobina de ajuste que entra en resonancia con la impedancia equivalente de los condensadores de modo que se elimina el desfase entre la tensión de la línea y la del secundario del transformador. En esta investigación se usa el modelo de transformador de tensión capacitivo por cada fase con sus secundarios totalmente aislados entre sí, empleado en el PSCAD [98].

En la figura 3.7, se representa el esquema equivalente del transformador, en el que $C1$ y $C2$ son las capacidades equivalentes de los condensadores a ambos lados del punto de la derivación y L_t es la bobina de ajuste. Para eliminar los ruidos de alta frecuencia y los armónicos, que pueden existir en la señal de tensión originados por las cargas, arcos, fallos o sobretensiones, se pone un dispositivo de protección contra la ferresonancia.

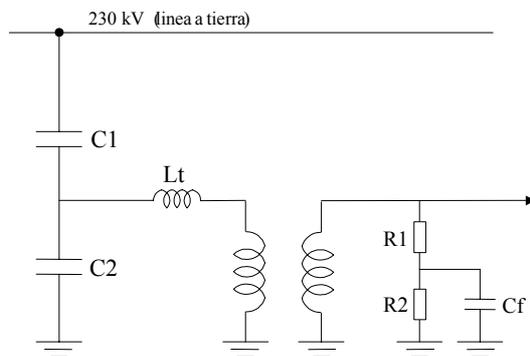


Fig. 3.7 Circuito equivalente de un transformador de tensión capacitivo.

3.6 Fallos con arcos eléctrico dinámicos

A menudo, los fallos en las líneas de alta tensión van acompañados de arcos, especialmente en los casos de fallos a tierra. Por tanto, los fallos que incluyen arcos se deben tener en cuenta cuando se investigan procesos transitorios en los sistemas eléctricos de potencia. En este apartado se presentan los conceptos básicos sobre la simulación de arcos dinámicos.

Cuando fluye una corriente muy elevada de cortocircuito vía un arco primario, la longitud de arco se mantiene y también su transcurso. Durante el proceso de arco eléctrico, se genera una gran cantidad de gas ionizado alrededor del mismo que disminuye la rigidez del medio. Al mismo tiempo debido a la posibilidad de que haga viento, a la convección del aire y del plasma alrededor del arco, y a la fuerza magnética de la corriente, el arco empieza a curvarse. Durante este proceso, las perforaciones del dieléctrico alrededor del arco se incrementan. El comportamiento de la conductancia del arco se puede escribir como:

$$\frac{dg}{dt} = \frac{1}{\tau}(G - g) \quad (3-1)$$

donde g es la conductancia instantánea del arco que varía con el tiempo, G es la conductancia estacionaria de arco y τ es la constante del tiempo.

El arco dinámico se simula usando el modelo del PSCAD [99]. El esquema de cálculo para la simulación del arco se presenta en el diagrama 3.8.

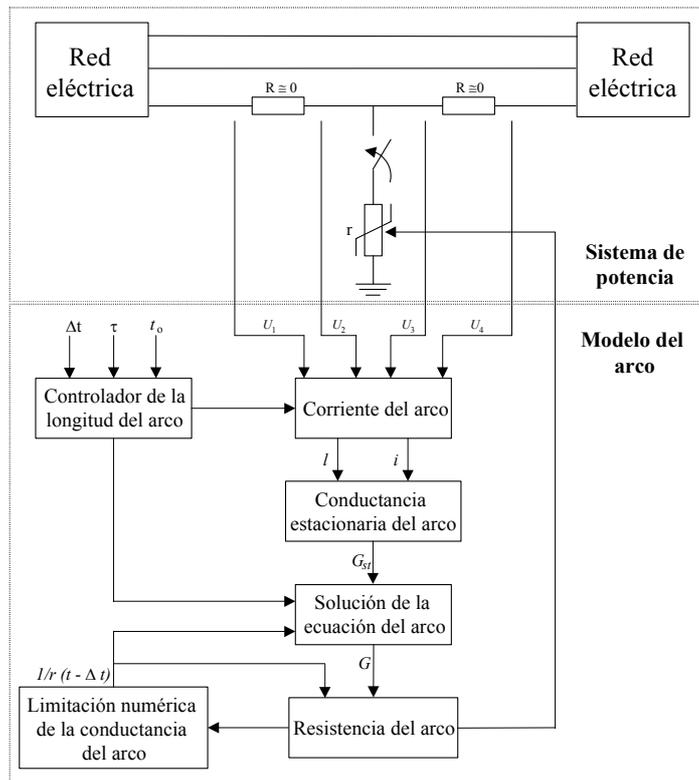


Fig. 3.8 Diagrama de bloques para la simulación del arco.

Este modelo nos permite realizar un estudio más pormenorizado del comportamiento del relé ante tal situación, puesto que la presencia del arco, produce una deformación característica de las ondas de tensión que lee el relé, tal como se muestra en la figura 3.9.

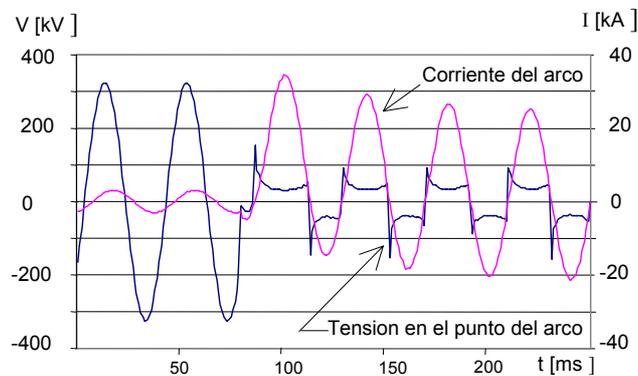


Fig. 3.9 Ondas de tensión y corriente de un arco dinámico.

Capítulo 4 Redes neuronales artificiales

4.1 Introducción

El objetivo de un problema de reconocimiento de patrones es desarrollar un algoritmo capaz de clasificar un patrón no visto previamente. La solución a los problemas de clasificación se ha abordado tradicionalmente desde un punto de vista estadístico haciendo uso, por ejemplo, de la teoría de Bayes. Asimismo, las redes neuronales artificiales se pueden interpretar como una extensión de las técnicas convencionales de reconocimiento estadístico de patrones. Con frecuencia, la resolución de un problema de este tipo se realiza de forma natural y sin esfuerzo por parte de un humano, pero su solución en computadores resulta más complicada, por ello, una red neuronal artificial imita el funcionamiento del cerebro [66-68] tratando de obtener sus mismas ventajas en el procesamiento de información. El cerebro humano contiene alrededor de diez mil millones neuronas con unos sesenta billones de conexiones entre sí llamadas sinapsis de las cuales depende su capacidad de memoria. Sin embargo, el cerebro tiene una velocidad lenta en comparación con los semiconductores. Mientras que en una computadora los tiempos de conexión son del orden de los nanosegundos; los de las neuronas son de varios milisegundos. Una red neuronal es un procesador enorme distribuido en paralelo, que puede filtrar y procesar las informaciones y tomar una decisión. Una red neuronal se parece al cerebro en dos ideas básicas:

- 1- La red necesita una cantidad de información para entrenarse.
- 2- Las conexiones entre las neuronas se usan para almacenar las informaciones. El proceso utilizado para adaptar las sinapsis se llama el proceso de aprendizaje.

El uso de las redes neuronales ofrece muchas propiedades, como el aprendizaje adaptativo, el funcionamiento en paralelo en tiempo real, la tolerancia a los fallos por la codificación

redundante de la información y la capacidad autoorganizativa. Los ordenadores convencionales usan algoritmos secuenciales mientras que las redes neuronales actúan como el cerebro humano, procesando la información en paralelo. También pueden aprender y generalizar a casos nuevos que no estaban incluidos durante el proceso del diseño. Las redes neuronales pueden procesar información más rápidamente que los ordenadores convencionales, pero tienen la desventaja de que no podemos seguir su respuesta paso a paso como se puede hacer al ejecutar un programa convencional en un ordenador, por lo que no resulta fácil detectar los errores.

En figura 4.1 se muestra una neurona humana típica. Una neurona típica recibe las señales de fuentes de actuaciones o de otras neuronas a través de las dendritas. Una neurona del cerebro típica recibe señales de aproximadamente cien mil dendritas. El axón o neurita conduce la excitación, que ha recibido de la célula nerviosa, como impulsos, a otras células nerviosas u órganos. Al final de cada axón existe una estructura llamada sinapsis que convierte la actividad del axón en un efecto eléctrico que activa o desactiva la actividad de la neurona receptora. A continuación, la neurona receptora responde a la suma de las señales que recibe, y manda su actividad a otras neuronas a través de su axón.

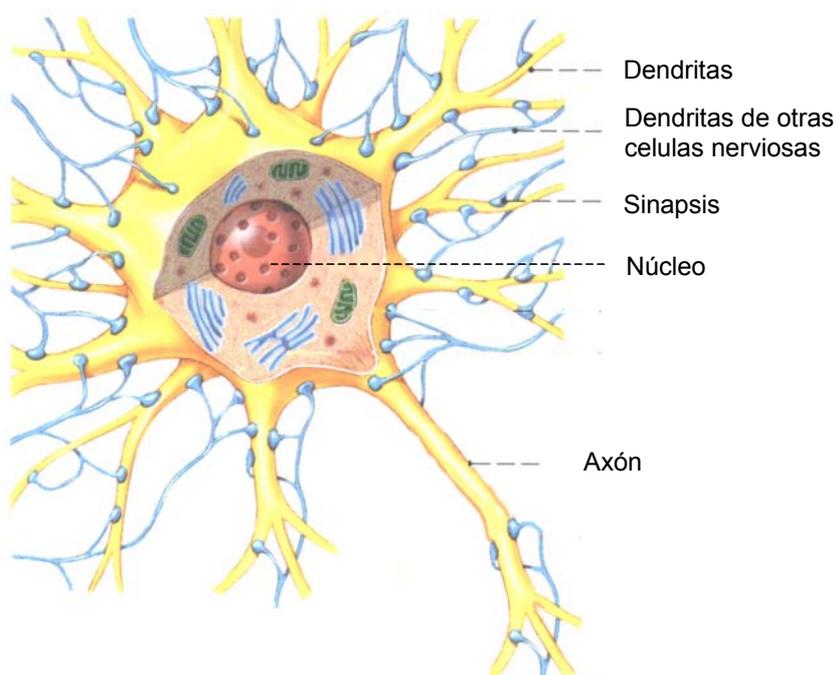


Fig. 4.1 Estructura de una célula nerviosa

Para imitar las neuronas biológicas mediante neuronas artificiales se deben hacer considerables restricciones, llegándose a un modelo muy simplificado de neurona artificial que reproduce básicamente la actuación de las neuronas naturales.

En 1943, McCulloch y Pitts construyeron un modelo básico de neurona artificial, con una neurona muy simple a base de un sumador y una función de activación. Las conexiones (sinapsis) de una neurona se consideran como se muestra en la figura 4.2. En ellas las activaciones X_i con unas determinadas intensidades W_i , de otras neuronas las sumamos y permitimos que en la salida de la neurona (axón) se origine una actividad siempre que la suma de las $X_i W_i$ supere un valor umbral θ .

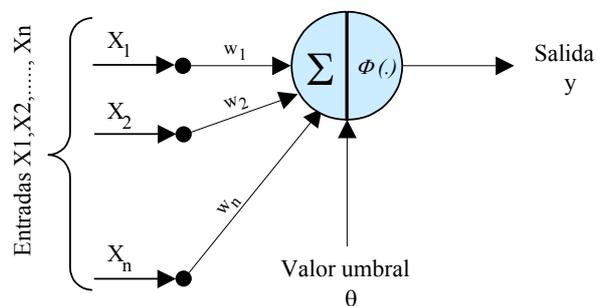


Fig. 4.2 Modelo de neurona.

4.2 Modelo de neurona

El modelo de neurona que muestra la figura 4.1 tiene tres elementos básicos:

- Un conjunto de sinapsis o enlaces conectables, caracterizados por un peso. Cada sinapsis puede conectar una neurona a otra o una entrada a una neurona.
- Un sumador que recibe todas las señales de las entradas de la neurona, las pondera por los respectivos pesos sinápticos y luego las suma.
- Una función de activación para limitar la amplitud de la salida de una neurona. Existen varios tipos de funciones, como la función escalón, la función rampa o la función sigmoidea.
- Una entrada directa e independiente, la cual puede ser positiva o negativa.

Por tanto, la salida y de una neurona puede expresarse como:

$$y = \Phi \left(\sum_{j=1}^n (w_j x_j \pm \theta) \right) \quad (4-1)$$

en donde:

w_j = valor del j -ésimo peso sináptico.

x_j = entrada j .

n = número total de pesos sinápticos conectados a la entrada de la neurona.

Φ = función de activación de la neurona.

θ = valor umbral.

Conectando varias neuronas de diferentes maneras, podemos conseguir diferentes arquitecturas de redes neuronales.

4.3 Arquitecturas de redes neuronales artificiales

Existen muchos tipos de redes neuronales artificiales, cada una tiene su método de conectividad y a su vez su algoritmo de entrenamiento [66]. Los tipos básicos con propagación hacia adelante son:

- a) Red neuronal de una sola capa, mostrada en la figura 4.3, en la cual las entradas se conectan a una sola capa de neuronas que es la capa de salida.

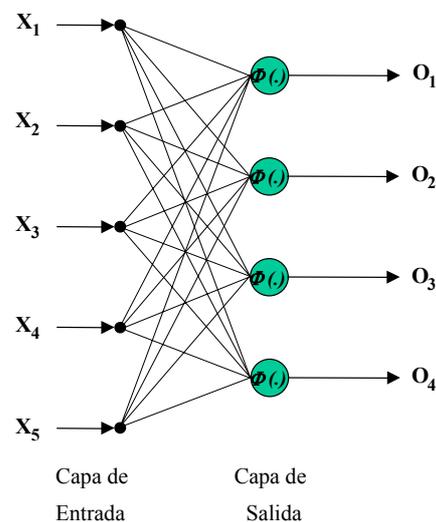


Fig. 4.3 Red neuronal artificial de propagación de una capa.

- b) Red neuronal de propagación multicapa (MLFANN), mostrada en la figura 4.4, que tiene una o más capas ocultas. Las entradas se conectan a la primera capa oculta. La salida de

cada neurona se conecta a las entradas de las neuronas siguientes de la capa superior hasta alcanzar la capa de salida.

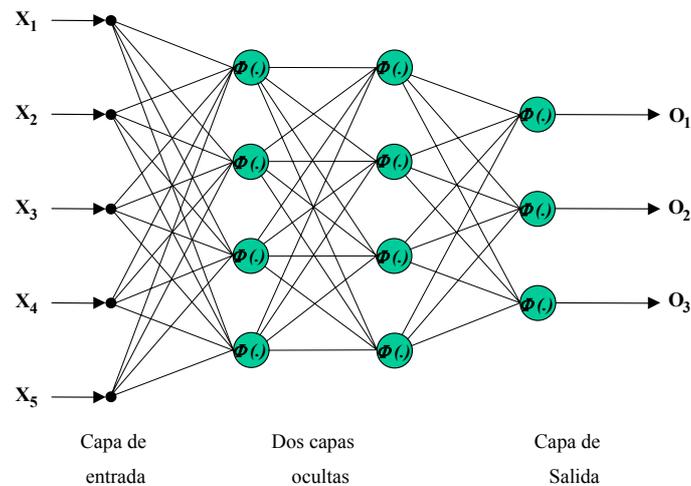


Fig. 4.4 Red neuronal artificial de propagación de tres capas (MLFANN).

4.4 Procedimiento de entrenamiento supervisado de las redes neuronales artificiales

El entrenamiento de una red neuronal se parece a las técnicas de ajuste de curvas, donde las entradas y salidas de una función son conocidas pero la función en sí misma no lo es. En palabras sencillas, el proceso de entrenamiento de una red neuronal consiste en encontrar los valores de los pesos sinápticos que conectan las entradas a la primera capa oculta, los pesos entre las capas ocultas, y los pesos de la capa oculta previa a la capa de salida. Aplicando las entradas a la red neuronal se calculan las correspondientes salidas. A continuación se calcula el error de salida como la diferencia entre las salidas calculadas y las salidas deseadas. Una vez se tiene calculado el error de salida, se propagará hacia atrás para encontrar los cambios adecuados en los pesos sinápticos de tal forma que se reduzca al mínimo el error de la salida.

A continuación, se discutirán brevemente algunos de los algoritmos de entrenamiento de las redes neuronales anteriormente mencionadas.

En el modelo de neurona mostrado en la figura 4.2, las entradas de la neurona se multiplican por los pesos sinápticos y se suman. Al resultado se le añade el valor el umbral o bias. A continuación, el resultado se aplica a una función de activación que puede ser una función tangente hiperbólica, como la representada en la figura 4.5. Para simplificar el entrenamiento,

los valores umbrales pueden asumirse como una entrada fija a la neurona (1 o -1 respectivamente) como se muestra en la figura 4.6.

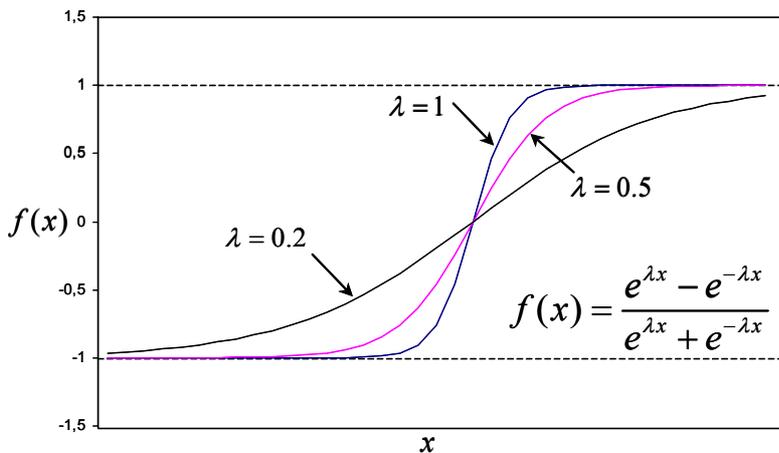


Fig. 4.5 Función tangente hiperbólica.

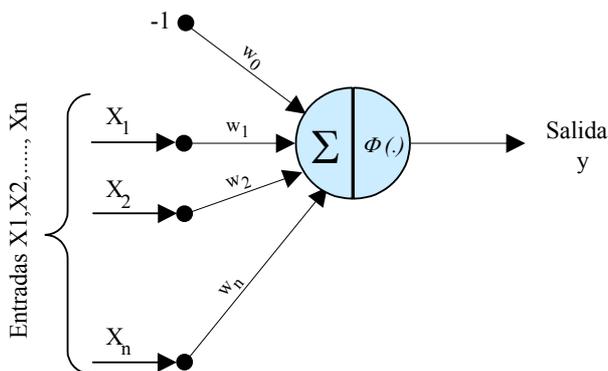


Fig. 4.6 Modelo de neurona simplificado.

La señal de error instantánea a la salida de la neurona j en la iteración n del ciclo de entrenamiento es:

$$e_j(n) = d_j(n) - y_j(n) \tag{4-2}$$

donde :

d_j = la salida deseada de la neurona j .

y_j = la salida real de la neurona j .

Usando la suma instantánea de los errores cuadráticos de la red E :

$$E(n) = \frac{1}{2} \sum_{j \in C} e_j^2(n) \tag{4-3}$$

donde C incluye todas las neuronas en la capa de salida de la red.

De las ecuaciones (4-1) a (4-3) está claro que los valores de los pesos están incluidos en $E(n)$. Esto significa que los valores de los pesos deben ser seleccionados para minimizar el error de la salida total de la red. Esto puede lograrse mediante las derivadas parciales del error $E(n)$ respecto a cada peso sináptico, lo que da el gradiente instantáneo que finalmente lleva al cambio de los pesos sinápticos, Δw , y que minimiza el error de la salida al final del proceso de entrenamiento. La obtención de las formulas de entrenamiento aparece más detallada en [69-82]. La figura 4.7 muestra un diagrama estructural de una MLFANN durante el proceso de propagación y de propagación hacia atrás (backpropagation).

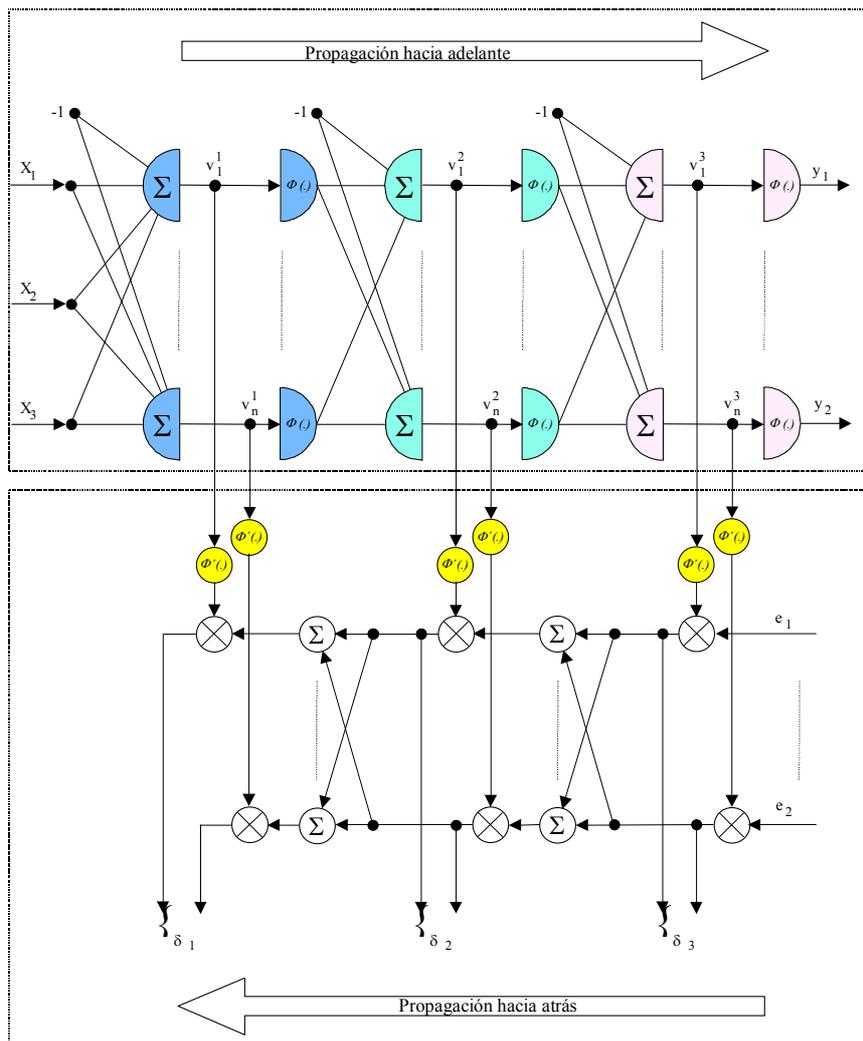


Fig. 4.7 Diagrama esquemático de la propagación hacia adelante y propagación hacia atrás.

De forma resumida, las ecuaciones que describen ambas operaciones pueden resumirse como:

a) La propagación hacia adelante:

El nivel de actividad de una neurona, v , puede escribirse como:

$$v_j^{(l)}(n) = \sum_{i=1}^p w_{ij}^{(l)}(n) y_i^{(l-1)}(n) \quad (4-4)$$

donde:

p = el número de las neuronas en la capa i .

$v_j^{(l)}(n)$ = la actividad interna de la neurona j , en la capa l , en el instante (iteración) n .

$y_i(n)$ = la salida de la i -ésima neurona en la capa $l-1$ que conecta a la neurona j con la siguiente capa a través del peso sináptico w_{ij} .

i = la neurona fuente.

j = la neurona de llegada.

La salida y de la neurona es:

$$y_j^{(l)}(n) = \Phi(v_j^{(l)}(n)) \quad (4-5)$$

donde Φ es la función de activación.

El error en la salida de la j -ésima neurona se obtiene aplicando la ecuación 4.1.

b) La propagación hacia atrás:

El error de salida de la red se usa para calcular el gradiente local δ en la capa de salida L :

$$\delta_j^{(L)}(n) = e_j^{(L)} \Phi'(v_j^{(L)}(n)) \quad (4-6)$$

Este gradiente de salida se propaga hacia la capa de entrada para tener un gradiente local para cada neurona en cada capa:

$$\delta_j^{(l)}(n) = \Phi'(v_j^{(l)}(n)) \sum_k \delta_k^{(l+1)}(n) w_{jk}^{(l+1)}(n) \quad (4-7)$$

donde w_{jk} es el peso sináptico que conecta la neurona j en la capa l a la neurona k en la capa $l+1$.

Usando el gradiente local calculado por cada capa, el cambio de un peso sináptico puede calcularse como:

$$\Delta w_{ij}^{(l)}(n) = \eta \delta_j^{(l)}(n) y_i^{(l-1)}(n) \quad (4-8)$$

donde η es el factor de aprendizaje, que tiene un valor positivo menor que la unidad. Adicionando cada cambio de peso a su correspondiente valor usado en la etapa de propagación se obtendrá en nuevo valor del peso:

$$w_{ij}^{(l)}(n+1) = w_{ij}^{(l)}(n) + \Delta w_{ij}^{(l)}(n) \quad (4-9)$$

Repitiendo el proceso de propagación y propagación hacia atrás secuencialmente, se obtendrá al final del proceso de entrenamiento la combinación óptima de los pesos que dan las salidas deseadas para los patrones de entrada. La figura 4.8 presenta un diagrama de flujo del proceso del entrenamiento. Este proceso se para cuando se minimiza el nivel de error al valor deseado o cuando para de minimizarse.

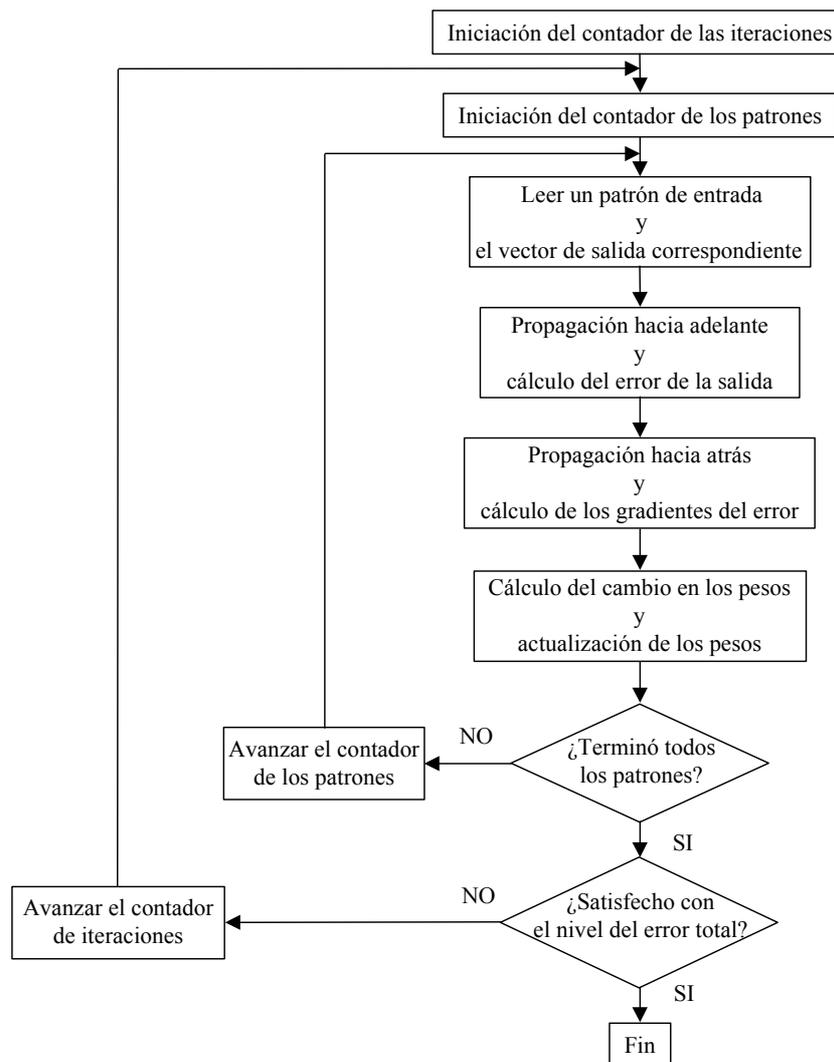


Fig. 4.8 Diagrama de flujo del proceso de aprendizaje con actualización patrón por patrón.

4.5 Consideraciones sobre el entrenamiento de una red neuronal artificial

El entrenamiento es un proceso que busca un grupo de pesos sinápticos que harán que la evolución del error decrezca hasta un valor mínimo. Sin embargo, la superficie del error no es uniforme y tiene muchos mínimos; sólo uno de ellos es un mínimo global y los otros son mínimos locales. El entrenamiento de una red neuronal debe detenerse cuando el error se vuelve constante y no puede ser reducido, esto significa que el proceso de entrenamiento ha

alcanzado un mínimo local o global. El problema ahora es como saber si se trata de un mínimo local o global. Esta pregunta es muy difícil de responder. Una respuesta podría ser que mediante la prueba de generalización de la red neuronal y otra que mediante el entrenamiento de la red con diferentes grupos de condiciones iniciales y factores de aprendizaje hasta lograr un error mínimo.

4.5.1 Inicialización de pesos

El primer paso en el entrenamiento de una red neuronal es inicializar la red. Una buena selección de los valores iniciales de los pesos sinápticos y de los umbrales puede ayudar enormemente en el diseño satisfactorio de la red y su entrenamiento. La inicialización de los pesos sinápticos y los umbrales en la red deben distribuirse uniformemente en un rango pequeño para reducir la probabilidad de saturación de las neuronas en la red. Sin embargo, el rango no debe ser muy pequeño ya que puede originar que los gradientes del error sean muy bajos y por tanto, que el aprendizaje sea inicialmente muy reducido. Los valores finalmente utilizados se han seleccionado mediante prueba y error en los diferentes entrenamientos realizados.

4.5.2 El factor de aprendizaje

Regresando a la ecuación (4-9), en ella se introdujo η un valor positivo menor que la unidad y que se denominó factor de aprendizaje. Está claro que este factor atenúa la actualización de los pesos para limitarla a lo largo del proceso de entrenamiento. El valor del factor de aprendizaje depende directamente del caso a resolver y lo más importante es que este factor debe reducirse cuando se reduce el error de aprendizaje. El dejar el factor de aprendizaje constante hará que en el entrenamiento se pueda saltar sobre mínimos globales y caer en uno local u oscilar alrededor de un mínimo global. El método más fácil de reducir el factor de aprendizaje multiplicándolo por un factor, por ejemplo 0,95, después de cada iteración. De otro lado, existen dos métodos para ajustar los factores de aprendizaje como una función del error de entrenamiento y a su vez reducirlo con la reducción del error. El primer método es el algoritmo de adaptación del factor de aprendizaje global y el segundo es el algoritmo de adaptación del factor de aprendizaje local [69]. En el primero, el factor de aprendizaje tiene el mismo valor para todos los pesos de la red neuronal. Sin embargo, en el segundo cada peso tiene factor de aprendizaje actualizable. El segundo método se conoce como la regla de aprendizaje “Delta-Bar-Delta”, que se usa en este trabajo.

4.5.3 Regla de aprendizaje “Delta-Bar-Delta”

En este método el factor de aprendizaje se actualiza localmente como una función del error de aprendizaje [77]. Por tanto la ecuación (4-8) puede escribirse como:

$$\Delta w_{ij}^{(l)}(n) = \eta_{ij}(n+1) \delta_j^{(l)}(n) y_i^{(l-1)}(n) \quad (4-10)$$

donde $\eta_{ij}(n+1)$ es el factor de aprendizaje actualizado. Este nuevo factor de aprendizaje puede calcularse como:

$$\eta_{ij}(n+1) = \eta_{ij}(n) + \Delta \eta_{ij}(n+1) \quad (4-11)$$

donde

$$\Delta \eta_{ij}(n+1) = \begin{cases} k & \text{si } S_{ij}(n-1) D_{ji}(n) > 0 \\ -\beta \eta_{ij}(n) & \text{si } S_{ij}(n-1) D_{ji}(n) < 0 \\ 0 & \text{si } S_{ij}(n-1) D_{ji}(n) = 0 \end{cases} \quad (4-12)$$

y

$$S_{ij}(n) = (1 - \xi) D_{ij}(n-1) + \xi S_{ij}(n-1) \quad (4-13)$$

y

$$D_{ij}(n) = - \sum_{b=1}^B \delta_j^{(b)}(n) y_i^{(b)}(n) \quad (4-14)$$

donde $D_{ij}(n)$ es el valor actual de la derivada parcial de la superficie del error respecto del peso $w_{ij}(n)$ y $S_{ij}(n)$ es una suma ponderada exponencialmente de los valores de las derivadas actuales y pasadas de superficie del error respecto del peso $w_{ij}(n)$ con ξ como base y el número de iteración como exponente.

La regla de aprendizaje “Delta-Bar-Delta” tiene otra ventaja, además de acelerar el proceso del aprendizaje y evitar los mínimos locales, reduce la influencia de la inicialización de los pesos.

4.5.4 El momento

Mientras el proceso del entrenamiento avanza, el error del aprendizaje se reduce, pero se mantiene el problema de que pueda incrementarse de nuevo. Para acelerar más el proceso del entrenamiento y asegurarse de escapar de los mínimos locales sin incrementar de nuevo el error después de haberlo reducido, se incluye el momento. Resolviendo la ecuación 4-10 usando el factor momento:

$$w_{ij}^{(l)}(n+1) = w_{ij}^{(l)}(n) + \Delta w_{ij}^{(l)}(n) + \alpha [w_{ij}^{(l)}(n) - w_{ij}^{(l)}(n-1)] \quad (4-15)$$

donde α es el momento, el cual tiene un valor positivo menor que la unidad. El momento también puede actualizarse usando la misma regla mencionada en el algoritmo de actualización del factor de aprendizaje Delta-Bar-Delta. Aún cuando el momento puede acelerar el proceso de aprendizaje, también puede introducir ruido en la evolución del error lo que puede ser útil para escapar de los mínimos locales.

4.5.5 Parámetros de la función de activación tangente hiperbólica

La expresión general de la función sigmoide viene dada por:

$$f(x) = \frac{e^{\lambda x} - e^{-\lambda x}}{e^{\lambda x} + e^{-\lambda x}} \quad (4-16)$$

donde x es la entrada de la función y λ es el parámetro que define la pendiente de la función.

4.5.6 Método de validación cruzada

A pesar de que en el entrenamiento usemos todos los patrones posibles, no se puede garantizar que la red neuronal artificial generalizará. Usando el método de validación cruzada, se puede saber si la red neuronal puede generalizar o no, y evitar sobreentrenamientos. Esto puede lograrse mediante una selección aleatoria de un 60-75% de los patrones disponibles como grupo de entrenamiento y el resto dejarlo para la prueba. Después de un cierto número de iteraciones, se detiene temporalmente el proceso de entrenamiento y se usa el grupo de prueba para ensayar la red neuronal. Repitiendo esto a lo largo de todo el proceso de entrenamiento se deberá reducir el error de prueba hasta un cierto instante, después del cual el error de prueba empezará a incrementarse de nuevo. El punto que corresponde con el mínimo error es el mejor ajuste de la red neuronal.

4.6 El mecanismo mixto de actualización de los pesos

El archivo patrón usado para entrenar la red neuronal consta de casi diez mil de patrones de fallo, cada patrón de fallo consta de un ciclo antes del fallo y 1 ciclo después de la iniciación del fallo (un total de 64 muestras).

El algoritmo de actualización de pesos se muestra en la figura 4.9. El cambio de pesos se calcula sólo para cada patrón de fallo y luego se actualiza. Este proceso se repite para todos los patrones de fallo.

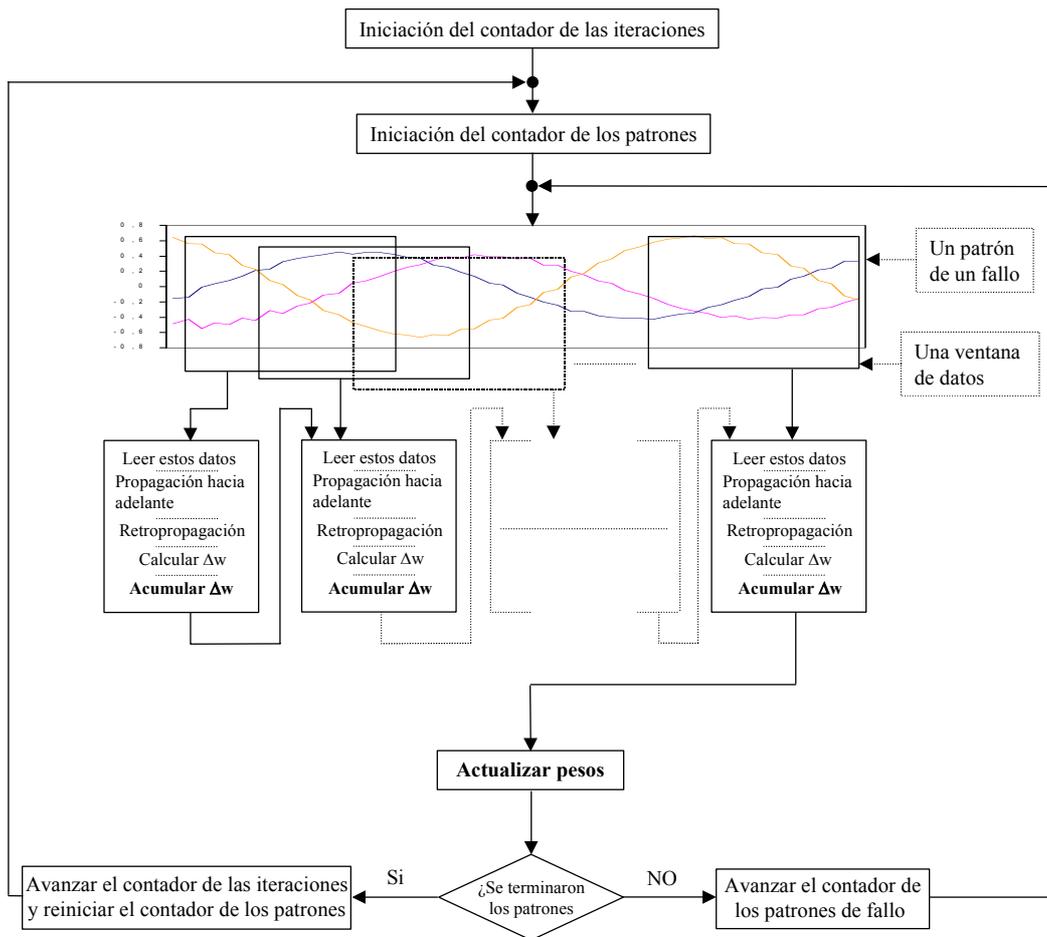


Fig. 4.9 Diagrama esquemático del algoritmo de actualización de pesos empleado.

4.7 Consideraciones sobre el cambio del valor de la salida de la ANN

Cuando ocurre un fallo en una línea de transmisión la ventana de datos de entrada estará llena de muestras con datos del fallo después de 6 muestras después de inicio del fallo. En otras palabras, la densidad de datos del fallo y la respuesta interna de la red neuronal se incrementará gradualmente hasta que la red neuronal esté alimentada al 100% con los datos del fallo. La figura 4.10 ilustra este hecho, donde la ventana de datos (1) tiene sólo datos antes del fallo. Con el avance del tiempo, se presentará la ventana de datos (2), la cual tiene datos de antes y después del fallo. Finalmente viene la ventana de datos (3) en la cual todos los datos son del fallo. Este análisis nos conduce a un hecho, él que durante la ventana de transición, ventana (2) en la figura 4.10, la salida de la red neuronal no puede ser diseñada para dar -1 o +1, debido a que esto ocasionará un error elevado durante el entrenamiento y puede caer en un mínimo local. Por lo tanto se deberá tener un valor de transición entre -1 y +1. Es por ello, por lo que se entrena la red neuronal para tener unos valores de transición que se muestran en la figura 4.11.

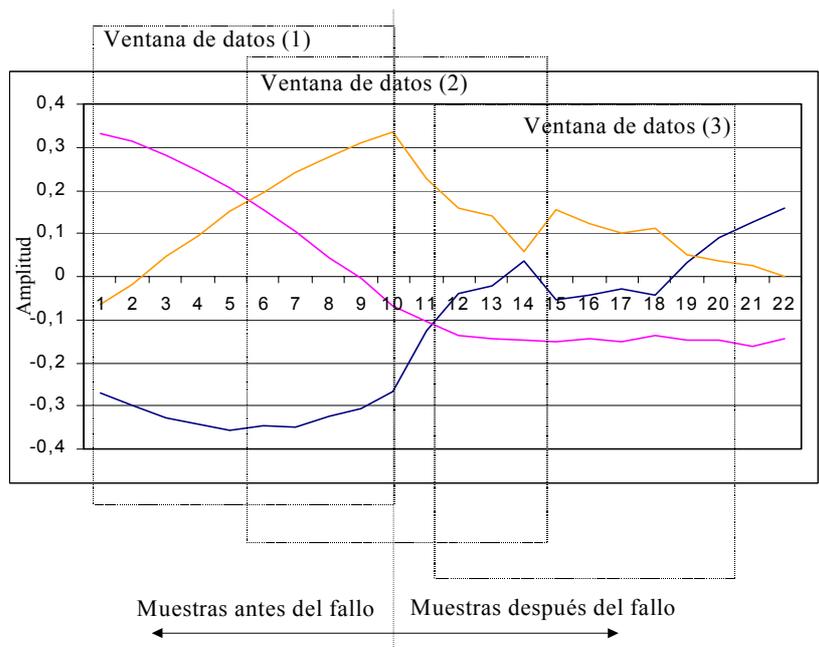


Fig. 4.10 Aspecto de la ventana de datos móvil.

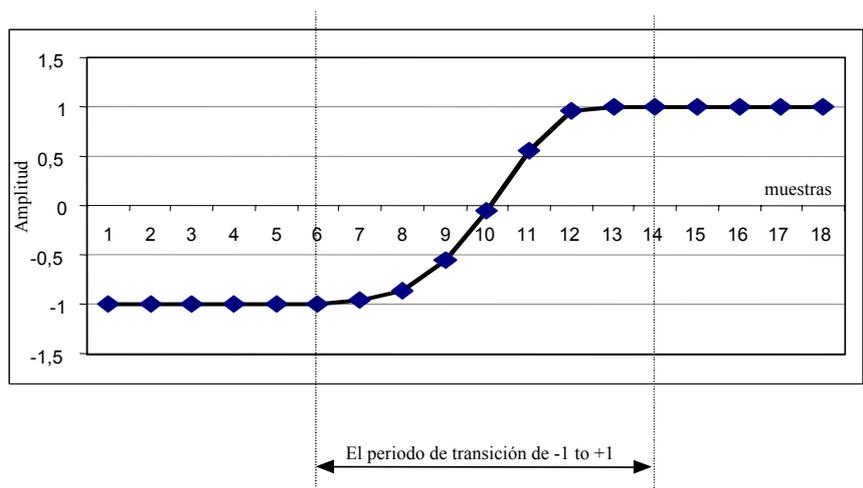


Fig. 4.11 Diseño de respuesta de transición de -1 a +1.

4.8 Consideraciones de normalización

En este trabajo, la base de normalización de la tensión es de 120 V (valor máximo) (o 1.75 del valor eficaz) y la base de normalización de la corriente es cuatro veces y media la corriente nominal de la línea (valor eficaz). Con estos valores de base elegidos, se dispone de margen suficiente para cubrir las sobretensiones que pueden existir después de los fallos en las fases sanas y tener unos valores significativos de las intensidades de las corrientes normalizadas antes del fallo, para poder detectar la dirección del flujo de la corriente antes del fallo y para incrementar el alcance del relé. Debe notarse que después de la normalización cualquier valor de entrada a la red neuronal estará limitado entre los valores -1 y +1.

4.9 Estabilización de la respuesta de la red neuronal

Aunque el entrenamiento de la red neuronal se detiene cuando el error se estabiliza, en la fase de prueba los valores de las salidas pueden oscilar entre -1 y +1. Para superar esto, se puede poner una neurona de histéresis a la salida de la red neuronal para eliminar el ruido. Esto debe acompañarse con la reducción de la pendiente de la función sigmoidea de las neuronas de salida. La figura 4.12 muestra la función de histéresis y como se aplica a la red neuronal, donde X es la mitad del ancho de la banda de histéresis.

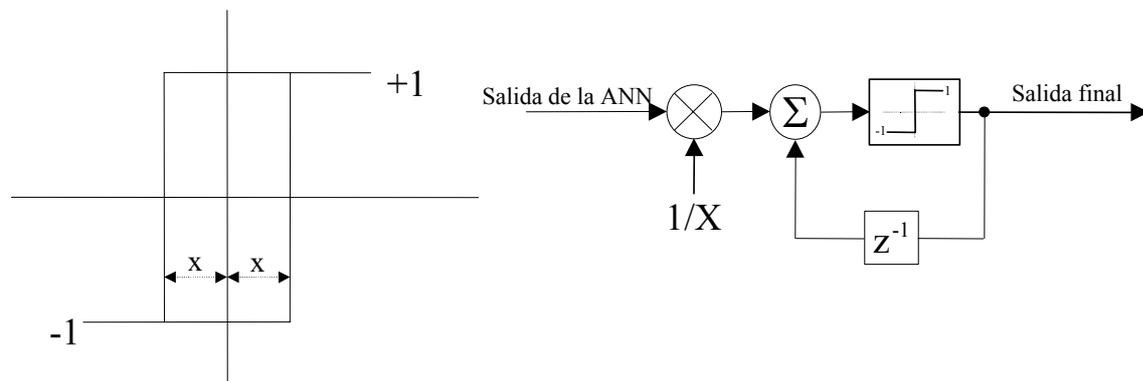


Fig. 4.12 (a) Función de histéresis. (b) Su implementación.

4.10 Implementación de las redes neuronales

Las redes neuronales durante la operación normal de propagación hacia adelante usan sólo dos operaciones matemáticas, la suma y la multiplicación, y las funciones sigmoideas. Cada neurona puede tener sus propios parámetros de la función sigmoidea. En este trabajo, las redes neuronales se entrenaron teniendo en cuenta que las neuronas en cada capa deben tener los mismos parámetros para facilitar la implementación de la misma. La implementación de las redes neuronales se hace de diferentes maneras:

- Mediante una tarjeta DSP ("Digital Signal Processing") [33] grabando la función sigmoidea en una EPROM. Este tipo tiene como aspecto negativo el elevado tiempo de respuesta de la red, especialmente si se trata de una red grande. Para solucionar este problema, se puede implementar la red neuronal usando una tarjeta DSP por cada capa, especialmente cuando cada capa tiene su propia función de activación.
- Usando tarjetas de redes neuronales que usan neuroprocesadores como la SAND y la SIOP [51,52]. En la tarjeta SAND una capa oculta puede tener hasta 512 neuronas y la función de activación hay que almacenarla en una EPROM y tiene que ser la misma para toda la red. La tarjeta SAND está diseñada para implementar las redes neuronales

MFANN, RBF y Kohonen. En la tarjeta SIOP su capacidad esta limitada y la función sigmoidea esta implementada en la misma tarjeta y es la misma para toda la red. La tarjeta SIOP tiene un tiempo total de propagación de 2,52 μ s y con ella se pueden implementar las redes MFANN y las redes recurrentes.

- c) Usando matrices de microprocesadores de 16 bits. En este caso, el tiempo de propagación se puede disminuir mucho poniendo un microprocesador por cada neurona y poniendo una EPROM por cada micro que contenga la tabla de la función sigmoidea por cada micro y otra para las matrices de los pesos. Esta configuración tiene la ventaja de ser de respuesta muy rápida y de cumplirse la idea básica de las redes neuronales, el procesamiento en paralelo de la señal. Otra configuración de este tipo de implementación es poner una matriz de una sola columna de microprocesadores cuyo número sea igual al mayor número de neuronas en cualquier capa y en cada paso del proceso de propagación, esta columna emula una capa concreta de la red neuronal.

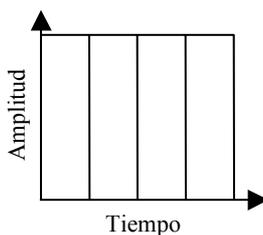
Capítulo 5 La transformada wavelet

5.1 Introducción

Entre las herramientas tradicionales de análisis de sistemas eléctricos de potencia, se encuentran numerosos algoritmos, basados entre otros, en la transformada de Fourier, filtros de Kalman, etc. Sin embargo, si ocurre un transitorio, las formas de onda asociadas no son periódicas, conteniendo oscilaciones de alta y de baja frecuencia superpuestas a la frecuencia de funcionamiento del sistema eléctrico. En tal situación, debido a que la transformada de Fourier realiza un promedio de la contribución de las frecuencias se pierde la localización de la perturbación en el tiempo. El análisis mediante wavelets supera ésta limitación, realizando un procesamiento de la señal, que proporciona información en tiempo y en frecuencia. Por ello, la transformada wavelet es una potente ayuda para el análisis, estudio e interpretación de los distintos fenómenos transitorios que se pueden presentar en un sistema eléctrico de potencia. Los principios básicos del análisis mediante wavelets se muestran a continuación.

5.2 Representación temporal

Muchos de los fenómenos físicos y socioeconómicos que nos rodean, han sido desde hace tiempo objeto de estudio y análisis (p.e. los sonidos, las señales eléctricas, los datos financieros, las vibraciones mecánicas, etc.) En un principio, se trataba de obtener una representación de los mismos que relacionara su valor con el instante en que tenían lugar, es decir, en el dominio tiempo-amplitud.



5.3 La transformada de Fourier

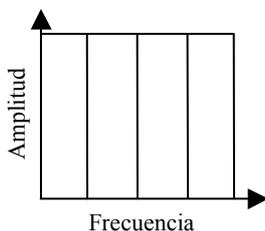
La transformada de Fourier [83] permite descomponer una señal en una suma de señales senoidales de diferentes frecuencias,

$$F(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t)e^{-j\omega t} dt \tag{5-1}$$

A partir de la señal descompuesta, se puede volver a reconstruir la señal original utilizando la expresión,

$$f(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} F(\omega)e^{j\omega t} d\omega \tag{5-2}$$

Es decir, se tiene una representación de la forma:



A continuación, se muestran unos ejemplos de señales en el dominio temporal y frecuencial:

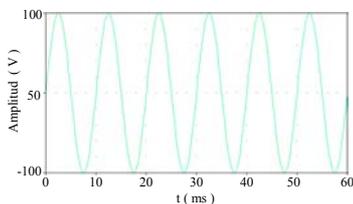


Fig. 5.1 $x_1(t)=sen(2\pi 100t)$.

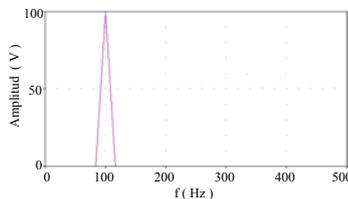


Fig. 5.2 Transformada de Fourier de $x_1(t)$.

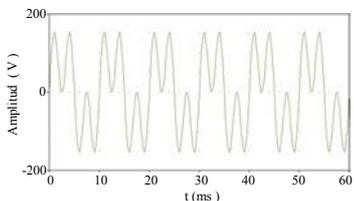


Fig. 5.3 $x_2(t)=sen(2\pi 100t)+ sen(2\pi 300t)$.

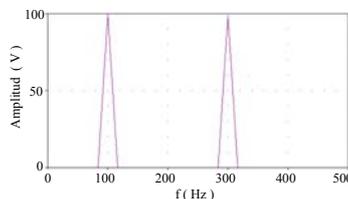
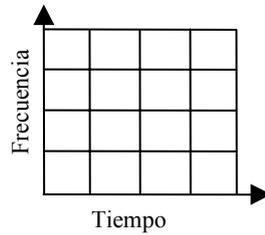


Fig. 5.4 Transformada de Fourier de $x_2(t)$.

Como se puede apreciar en las gráficas anteriores, la información del módulo de la transformada de Fourier no permite la localización de los fenómenos en el dominio temporal. Es necesario, por tanto, una herramienta que permita realizar este tipo de análisis, especialmente en el estudio de transitorios.

5.4 La transformada de Gabor

La transformada de Gabor realiza un análisis de la señal tal que es capaz de representar en cada instante de tiempo, las componentes frecuenciales de la señal, se trata pues de un dominio tiempo-frecuencia.



Gabor analiza la señal seleccionando intervalos temporales, tal como se muestra en la figura 5.5.

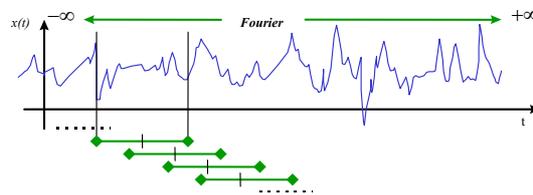


Fig. 5.5 Selección de ventanas temporales (según Gabor).

Matemáticamente, la transformada de Gabor, se expresa:

$$G(\omega, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot g(t - \tau) e^{-j\omega t} dt \tag{5-3}$$

A continuación se representan las señales anteriores en éste dominio:

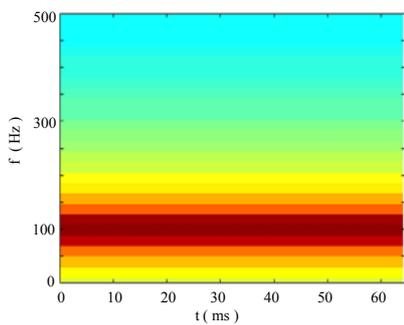


Fig. 5.6 Transformada de Gabor de $x_1(t)$.

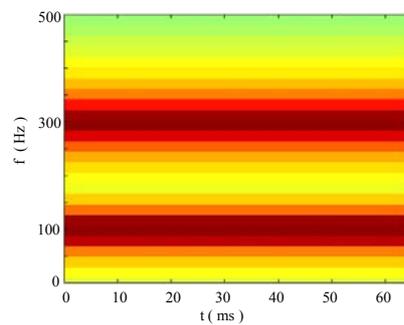


Fig. 5.7 Transformada de Gabor de $x_2(t)$.

Ahora es posible localizar la respuesta frecuencial en el tiempo, pero existe una incertidumbre en la localización. Este fenómeno se aprecia en el caso de una señal como la siguiente:

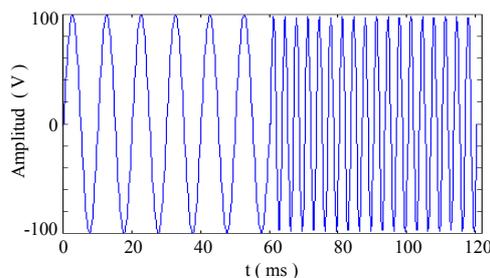
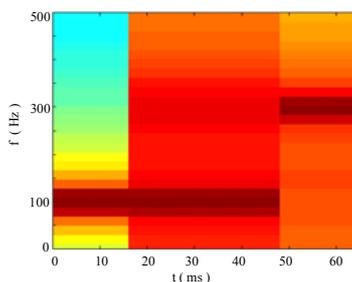


Fig. 5.8

$$x_3(t) = \text{sen}(2\pi 100t) \quad 0 \leq t \leq 60 \text{ ms.}$$

$$x_3(t) = \text{sen}(2\pi 300t) \quad 60 < t \leq 120 \text{ ms.}$$

Y su transformada,

Fig. 5.9 Transformada de Gabor de $x_3(t)$.

En la figura 5.9 se puede apreciar incertidumbre en el plano tiempo-frecuencia, cuando se produce una variación de frecuencia. Ello es debido a que la resolución depende del tamaño de la ventana escogida para el análisis. Intervalos mayores permiten una buena resolución en frecuencia, y ventanas estrechas una correcta localización temporal. Se ha de establecer un compromiso entre la incertidumbre temporal o la frecuencial, que dependerá de cada tipo de aplicación.

5.5 La transformada wavelet

De una forma sencilla, podemos decir que las condiciones que una onda ha de cumplir para ser una wavelet son:

- deber ser oscilatoria,
- debe decaer rápidamente a cero (es distinta de cero en un corto periodo de la función), y
- debe tener un valor medio nulo.

Un ejemplo de wavelet es la función representada en la figura 5.10.

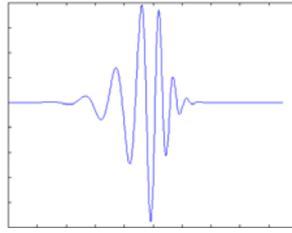
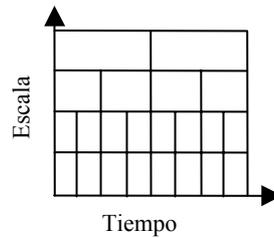


Fig. 5.10 Wavelet Daubechies de 20 coeficientes.

Las wavelets se emplean para realizar análisis en el dominio tiempo-escala.



5.5.1 Fundamentos de la transformada wavelet

De forma similar a como en el análisis de Fourier se representa una señal mediante la suma de senoides de distintas amplitudes y de frecuencias múltiplos de la fundamental, figura 5.11,

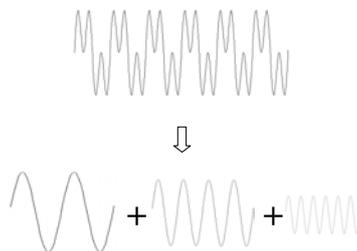


Fig. 5.11 Descomposición de Fourier.

en el análisis mediante wavelets, se representa una señal en función de una señal patrón o base, que es trasladada y escalada [84]. Mediante este método se compara una onda con una señal patrón $\psi(x)$, que se origina mediante la dilatación de forma iterativa de una función de escalonamiento $\phi(x)$, (expandiéndola horizontalmente), hasta que $\phi_j(x) = \phi_{j-1}(x)$ [85]. La forma final de la señal patrón obtenida, depende del número de coeficientes que se han utilizado para la generación de la función de escalonamiento. A menor número de coeficientes la señal es mas escarpada, y a mayor número de los mismos es más suavizada. A continuación se muestran dos wavelets de la familia “Daubechies”, con 4 y 20 coeficientes respectivamente:

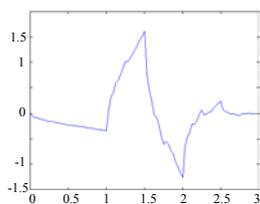


Fig. 5.12 Wavelet "Daubechies 4".

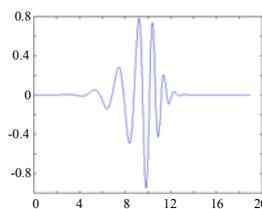


Fig. 5.13 Wavelet "Daubechies 20".

La D4 es una señal más localizada en el tiempo que su homóloga D20. Es por ello, que D4 es más adecuada para la detección de transitorios rápidos, como por ejemplo impulsos. La elección de una u otra, es función de la aplicación. Una vez escogida, mediante traslaciones y escalados se la compara con la señal a analizar,

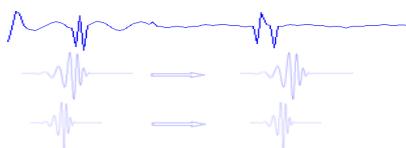


Fig. 5.14 Cálculo de la transformada Wavelet.

Realizando esta operación sucesivamente, se obtienen los coeficientes de la transformada wavelet discreta (DWT). Matemáticamente se define:

$$W(a,b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \cdot \psi\left(\frac{t-b}{a}\right) \cdot dt \quad (5-4)$$

A partir de estos valores, se realiza la descomposición de la señal original en distintos niveles. Los niveles están asociados a su vez con distintas frecuencias, correspondiendo niveles más altos a frecuencias mayores.

5.5.2 Aplicaciones de la transformada wavelet

Algunas características de las wavelets son:

- pueden representar funciones,
- pueden representar singularidades,
- permiten realizar compresión de datos mediante el truncado del vector de coeficientes [41], y
- mantienen la información en la escala tiempo.

Por ello, en los últimos años se ha producido un considerable aumento en su aplicación a numerosos campos de la ciencia. Las wavelets son empleadas para solucionar ecuaciones en

derivadas parciales, procesamiento de señales geofísicas y sísmicas, análisis de señales médicas, comunicaciones, fractales, etc.

5.6 Ejemplo

A continuación, se han simulado dos circuitos simples y muy ilustrativos para la visualización de las características del análisis con wavelets [44]. En uno de ellos, se realiza la conexión de una rama que contiene condensador, (figura 5.15), y en otro, se simula un cortocircuito (figura 5.18).

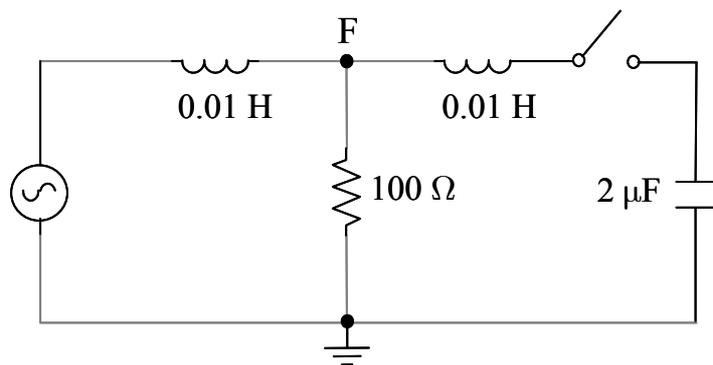


Fig. 5.15 Esquema eléctrico del circuito empleado.

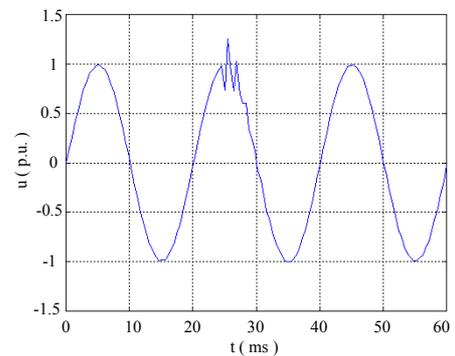


Fig. 5.16 Señal de tensión en el nudo F.

En la figura 5.16 se representa la evolución de la tensión en nudo F. En el instante $t = 25$ ms se conecta el condensador. La figura 5.17 muestra la correspondiente transformada wavelet.

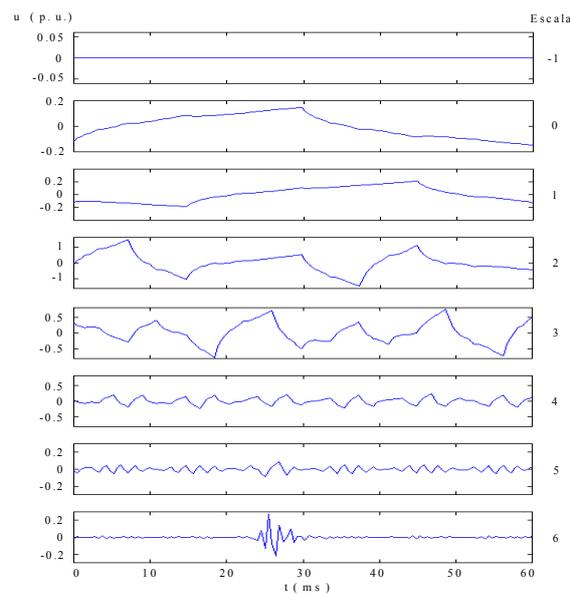


Fig. 5.17. DWT de la señal de tensión en el nudo F con una "Daubechies 4".

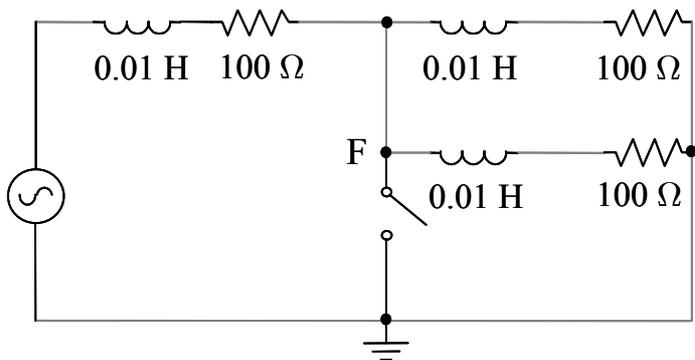


Fig. 5.18 Esquema eléctrico del circuito empleado.

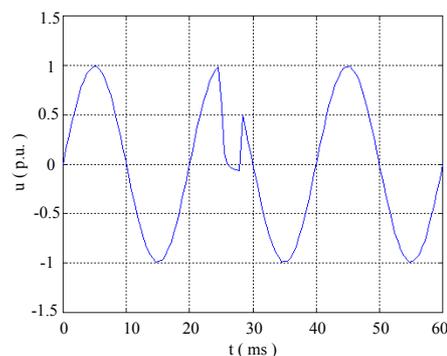


Fig. 5.19 Señal de tensión en el nudo F.

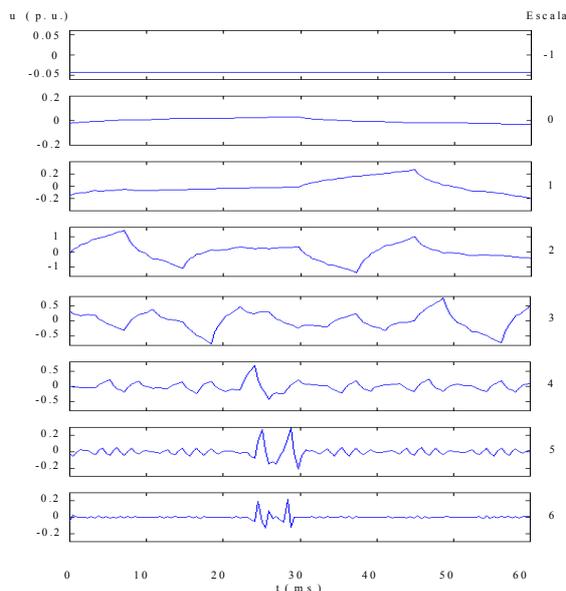


Fig. 5.20 DWT de la señal de tensión en el nudo F con una Daubechies 4.

En el caso del transitorio de conexión del condensador, por tratarse de un fenómeno de alta frecuencia, no influye en el nivel -1 , (él de más baja frecuencia, similar al nivel de continua), y se ve reflejado con más importancia en el nivel más elevado (nivel 6), donde también presenta una forma oscilatoria amortiguada.

En cambio, para el caso del cortocircuito, se constata que aparece una cierta componente de muy baja frecuencia (continua), y que asimismo, todos los niveles en mayor o menor medida se ven afectados por el fenómeno. Así, los niveles 2, 5 y 6 presentan picos importantes que reflejan las variaciones en la señal de la tensión original.

5.7 Parámetros básicos en la transformada wavelet

La teoría de la transformada wavelet está ampliamente desarrollada en la bibliografía con todo rigor matemático [89-90]. El principio básico de éste análisis de señales es que una wavelet se genera a partir de una función de escalado definida como:

$$\phi(x) = c_0\phi(2x) + c_1\phi(2x-1) + c_2\phi(2x-2) + \dots + c_N\phi(2x-N) \quad (5-5)$$

donde N es el número de coeficientes. La wavelet empleada para el análisis se crea a partir de la función de escalado con la siguiente ecuación:

$$W(x) = \sum_{k=-1}^{N-2} (-1)^k c_{k+1} \phi(2x+k) \quad (5-6)$$

y la expansión de una señal mediante la transformada wavelet se expresa como:

$$f(x) = a_0 + a_1 \cdot W(x) + \dots + a_{2^j+k} W(2^j x - k) \quad (5-7)$$

donde:

$$a_0 = \int f(x)\phi(x)dx \quad (5-8)$$

$$a_{2^j+k} = 2^j \int f(x)W(2^j x - k) \quad (5-9)$$

Aplicando la formulación anterior a una señal determinada, ésta se descompone en diferentes escalas, cada una de las cuales representa una banda de frecuencia centrada en f_c , donde

$$f_c = \frac{f_s}{2^n} \cdot 2^l \quad l = 0, 1, \dots, n-1 \quad (5-10)$$

y l es el número de la escala o nivel, y f_s la frecuencia de muestreo. La efectividad de tal descomposición depende de tres parámetros básicos:

- familia wavelet,
- frecuencia de muestreo, y
- número de puntos muestreados.

5.8 Estudios previos

Existen muchos tipos de familias wavelet con diferentes aplicaciones. Escoger la correcta juega un papel importante para detectar y localizar varios tipos de perturbaciones que se presentan en los sistemas eléctricos de potencia. En la bibliografía consultada referente a la aplicación de la transformada wavelet a sistemas eléctricos de potencia, no hay un consenso general entre los investigadores sobre qué familias seleccionar para cada fenómeno a estudiar. En general se suele aceptar que para el estudio de transitorios rápidos son apropiadas wavelets

más localizadas en el tiempo como las Daubechies de 4 coeficientes, llamadas D4, y que para transitorios lentos las D8 y D10 son mejores. Sin embargo en [43] se usan indistintamente D4 y D8 para la detección de faltas. En [91] se analiza con una D20 la corriente del secundario de un horno de arco.

Robertson, Camps y otros, [40] sugieren que las wavelet Feaveau de orden elevado presentan buenas características para analizar perturbaciones en sistemas eléctricos de potencia. En [47] se propone la wavelet Morlet para el análisis de faltas con alta impedancia.

Se puede observar la misma falta de coherencia en los autores en lo relativo a la frecuencia de muestreo y al número de puntos. En la tabla 5.1 se han resumido algunos de los valores encontrados en las referencias indicadas.

Tabla 5.1 Resumen de características.

Referencia	Familia	(fs) kHz	(N)
42	D4,D10	2.56	128
91	D20	10.24	2048
40	Feaveau	10	256
45	D4	8.192	4096
92	D20	2.4	512
47	Morlet	4.096	512

5.9 Influencia de los parámetros de la transformada wavelet

Para comprobar la influencia de los distintos parámetros de la transformada wavelet en el análisis de señales eléctricas que se pretende realizar en esta tesis, se lleva a cabo un estudio donde se han elegido una serie de combinaciones de a fin de comprobar las características obtenidas en cada tipo caso. Como familia wavelet se adoptan las Daubechies de 4, 8, 12, 16 y 20 coeficientes. Estas wavelets ortogonales son apropiadas para la aplicación del algoritmo de multirresolución de Mallat (MRA) [86,90]. Las combinaciones de frecuencias y número de puntos se muestran en la tabla 5.2.

Tabla 5.2 Combinaciones seleccionadas para el estudio.

	D4	D8	D12	D16	D20
N = 128	1.6 kHz				
N = 128	2.5 kHz				
N = 128	3.2 kHz				
N = 128	6.4 kHz				
N = 256	12.8 kHz				

5.10 Ejemplo

Se ha empleado varios sistemas eléctricos para llevar a cabo las simulaciones necesarios para el presente estudio, mediante el programa EMTDC/PSCAD. En la figura 5.21 se presenta esquemáticamente uno de ellos. Las simulaciones incluyen diferentes tipo de cargas, faltas y condiciones de funcionamiento del sistema de potencia

- faltas simples a tierra,
- faltas en diferentes posiciones de la línea de transmisión,
- se han empleado diferentes tipos de cargas: resistiva (R), inductiva (L), capacitiva (C) y combinaciones,
- un rectificador trifásico totalmente controlado (armónicos de orden $6 \cdot k \pm 1$) como fuente de ruido,
- ocho puntos diferentes de inicio de la falta en la onda senoidal,

Todas las condiciones anteriores se han repetido para fallos con arco.

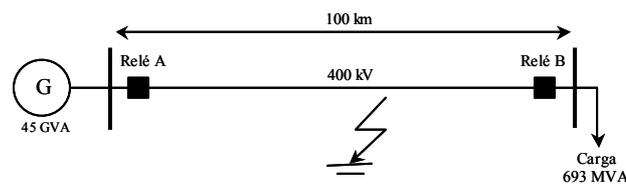


Fig. 5.21 Diagrama unifilar de un circuito empleado en la simulación con EMTDC/PSCAD.

Se pretende comprobar si con distintos valores de frecuencia, número de puntos y coeficientes, se obtienen mejores resultados desde los dos puntos de vista siguientes:

- mayor claridad en la detección, y
- detección de características especiales dependiendo del tipo de falta y las condiciones con las que se ha analizado.

Puesto que sería imposible representar todos los resultados estudiados, sólo se han dibujado una serie de ejemplos, representándose la tensión en la fase A y su espectro de frecuencias. La líneas verticales de trazos que aparecen en las figuras marcan el instante en que se produce la falta.

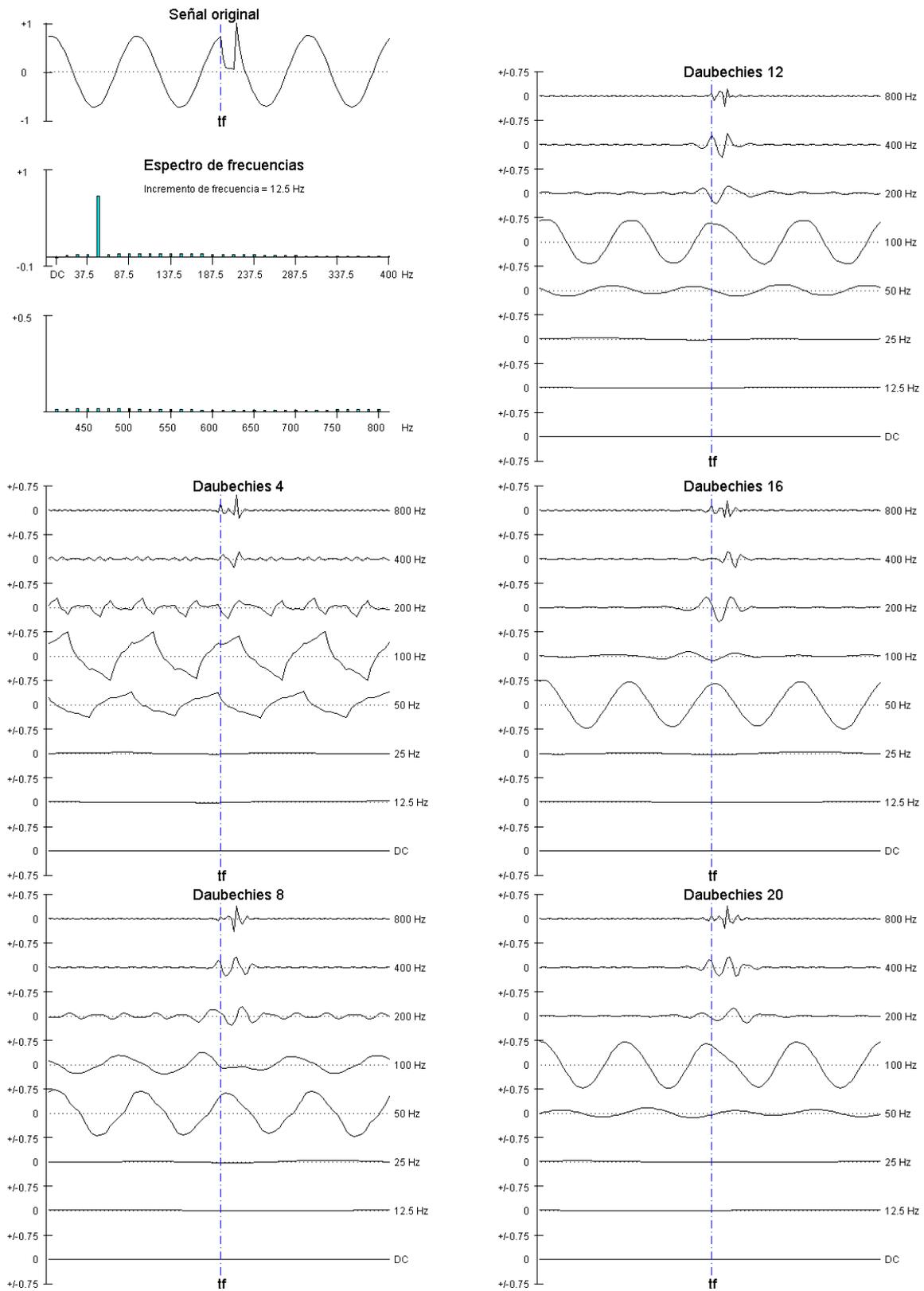


Fig. 5.22 *Análisis de un cortocircuito, $f_s=1.6$ kHz, $N=128$ puntos. Se representan la señal original, el espectro de frecuencias y la transformada wavelet con Daubechies D4 a D20.*

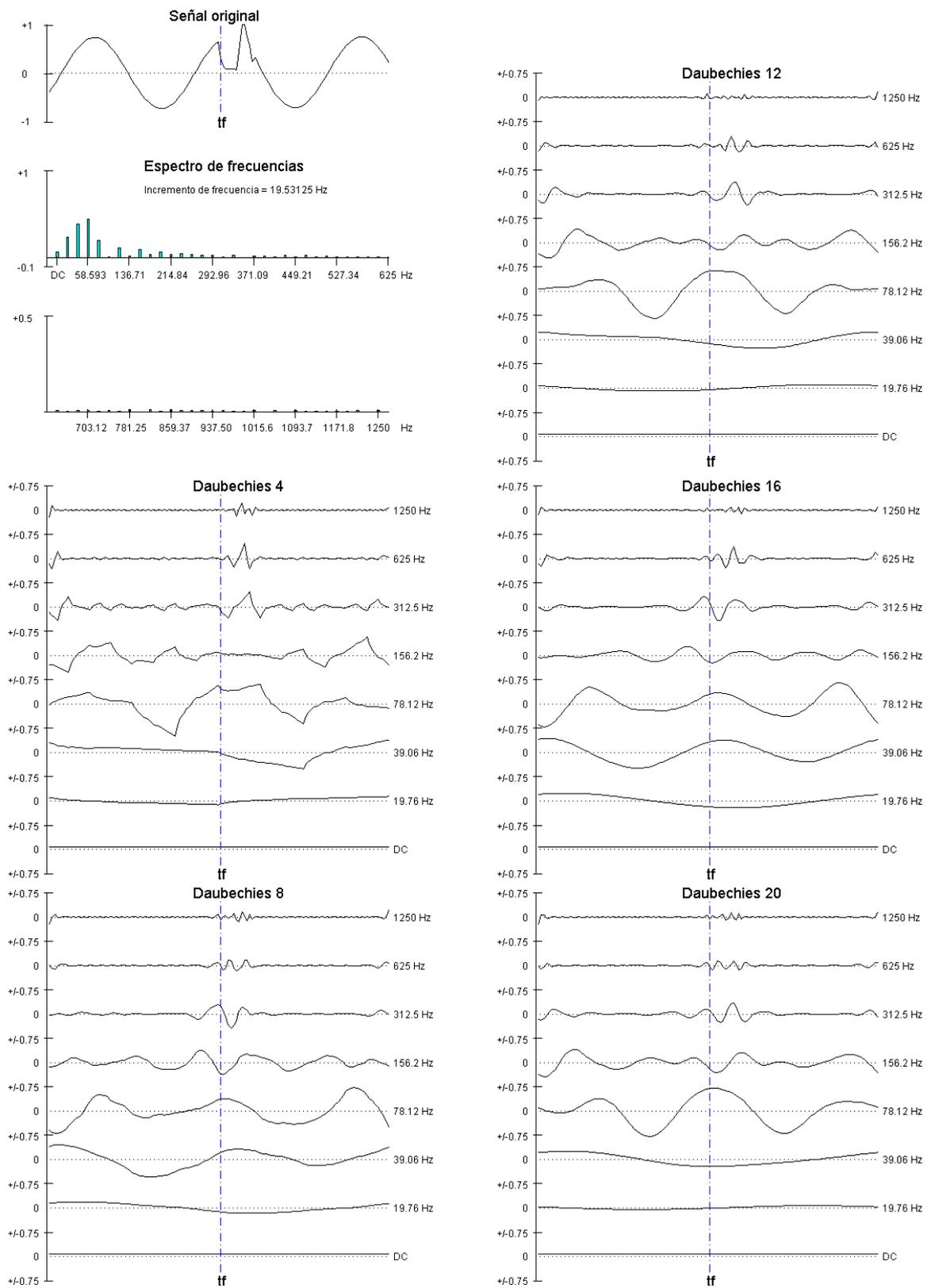


Fig. 5.23 Análisis de un cortocircuito, $f_s=2.5$ kHz, $N=128$ puntos. Se representan la señal original, el espectro de frecuencias y la transformada wavelet con Daubechies D4 a D20.

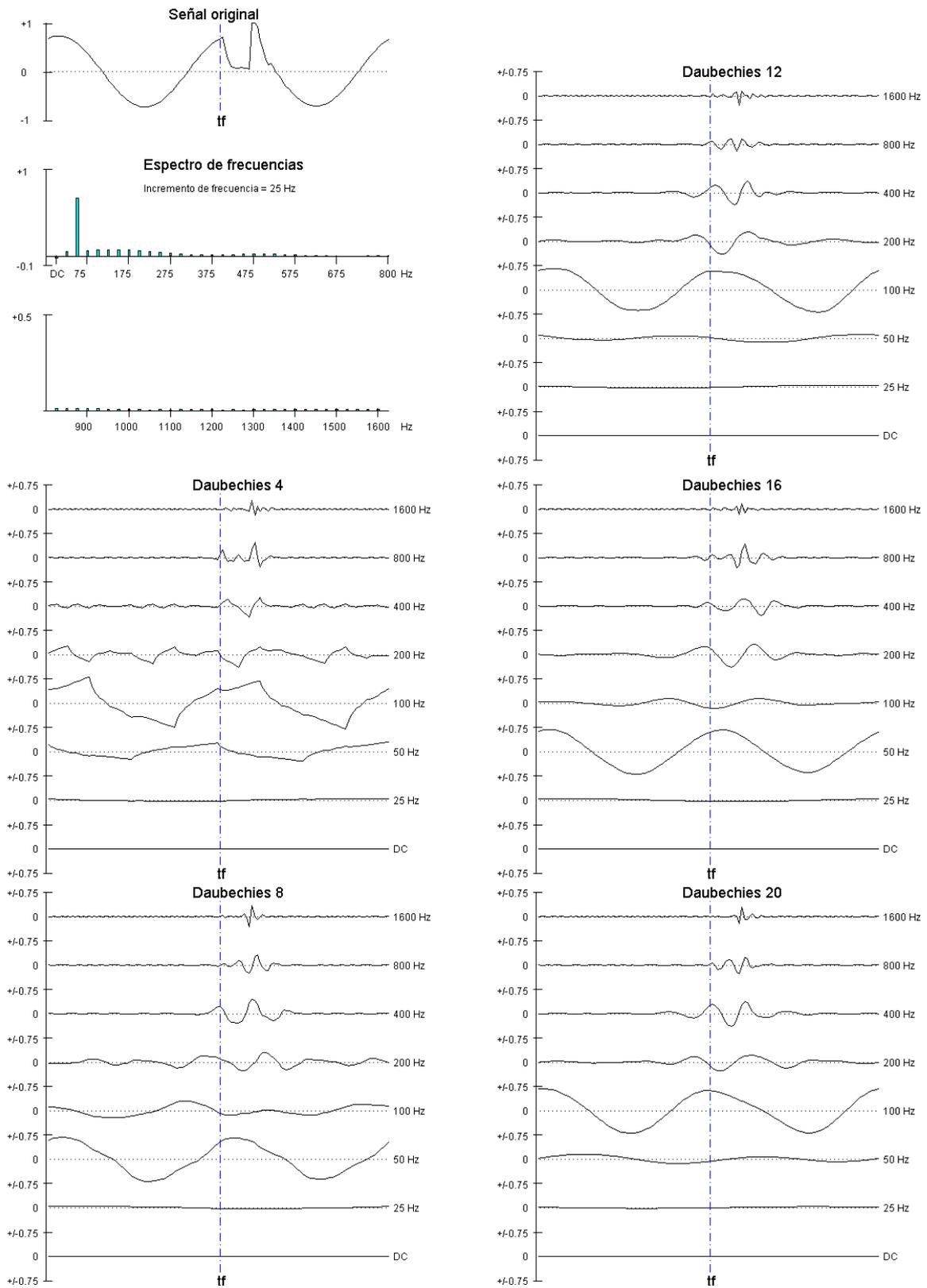


Fig. 5.24 Análisis de un cortocircuito, $f_s=3.2$ kHz, $N=128$ puntos. Se representan la señal original, el espectro de frecuencias y la transformada wavelet con Daubechies D4 a D20.

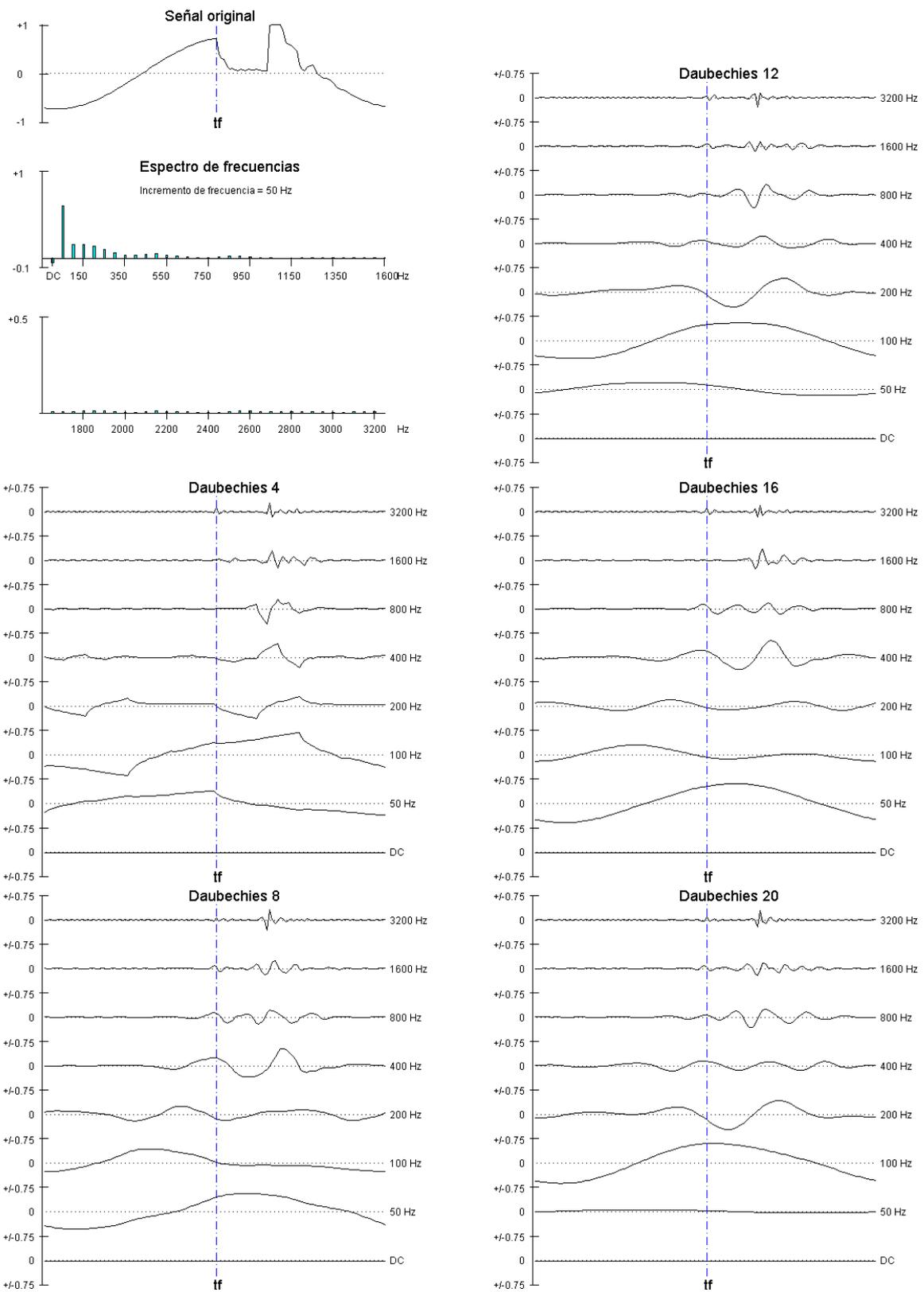


Fig. 5.25 Análisis de un cortocircuito, $f_s=6.4$ kHz, $N=128$ puntos. Se representan la señal original, el espectro de frecuencias y la transformada wavelet con Daubechies D4 a D20.

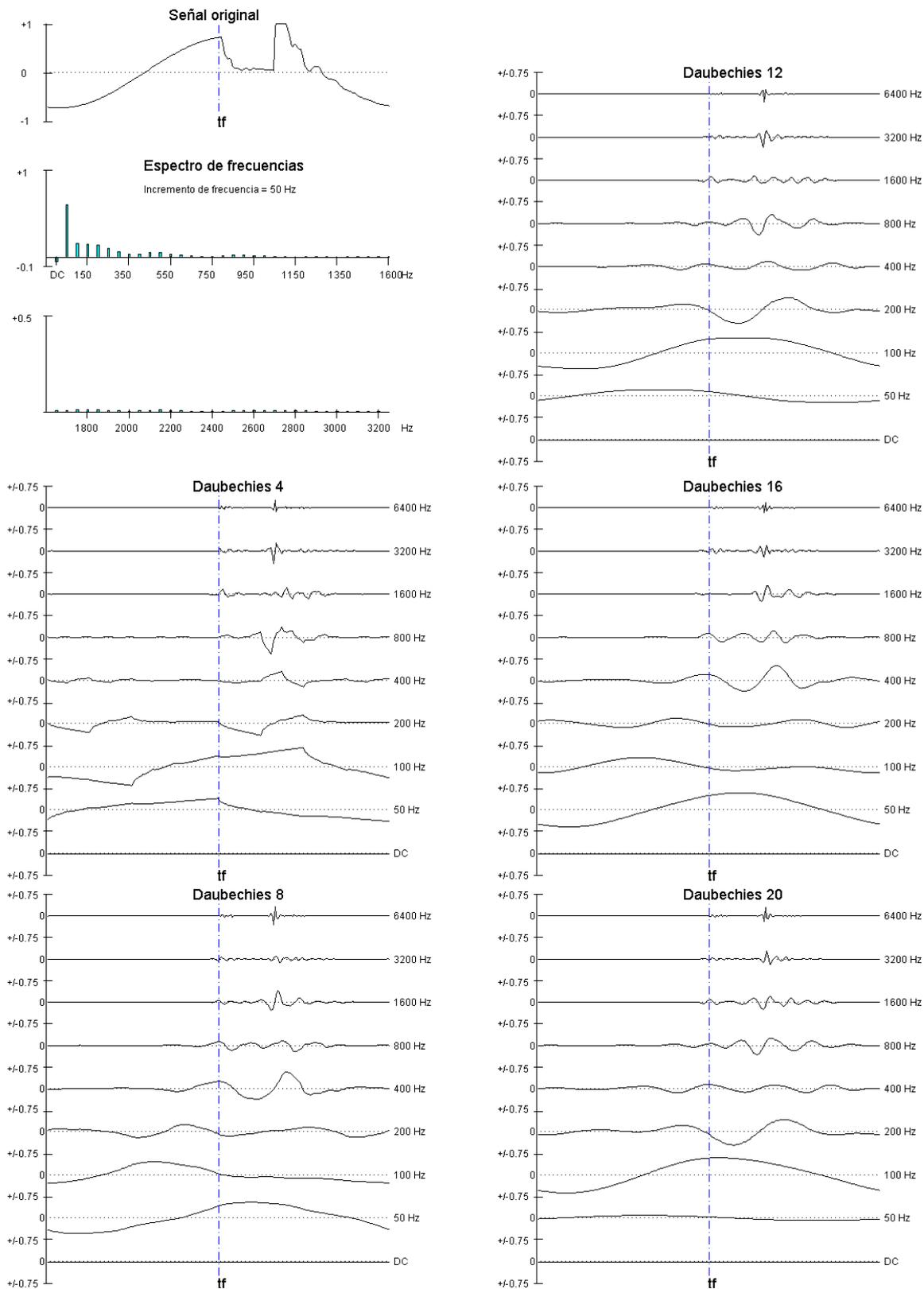


Fig. 5.26 *Análisis de un cortocircuito, $f_s=12.8$ kHz, $N=256$ puntos. Se representan la señal original, el espectro de frecuencias y la tranformada wavelet con Daubechies D4 a D20.*

Se puede distinguir las siguientes características en las figuras 5.22 a 5.24:

- analizando con $f_s = 1.6$ kHz y 3.2 kHz, se consigue una resolución en la cual las frecuencias de los distintos niveles son múltiplos de la fundamental. Debido a esto, la transformada wavelet muestra una mejor reconstrucción de la señal en el nivel de los 50 Hz. Esto también ocurre a medida que incrementamos los coeficientes, siendo las D16 y D20 las familias que mejor representan la señal,
- a diferencia del caso anterior, cuando la señal se analiza empleando $f_s = 2.5$ kHz, es mucho más difícil conseguir una buena reconstrucción de la señal. Esto es debido al hecho de que la frecuencia del sistema es 50 Hz, mientras que la resolución de los niveles más próximos son 39 y 78 Hz,
- la mayor parte de la energía se concentra en los dos niveles más bajos, 39-78 Hz y 50-100 Hz, respectivamente,
- en ambas situaciones, con diferente frecuencia de muestreo, se detecta claramente el instante de la falta es detectado claramente, independientemente de los coeficientes usados, y se presenta más rotundamente en los niveles más altos de frecuencia. Las frecuencias más altas aportan una basta contribución al instante de detección del fallo.

La figura 5.25 representa el mismo análisis, pero con un incremento de la frecuencia de muestreo. La figura 5.26 representa además un aumento del número de puntos que permite una mejor resolución en la señal original.

- al igual que en el caso anterior, los niveles de 50 y 100 Hz contienen la mayor parte de la energía,
- los niveles de frecuencias más elevadas identifican con mayor exactitud los fenómenos transitorios, mientras que en las bajas frecuencias quedan enmascarados.

5.11 Valoración de los resultados

Los casos analizados muestran las propiedades que presentan las wavelets Daubechies en función del número de coeficientes, la frecuencia de muestreo y el número de puntos. Se ha observado que a pesar del aumento de la resolución en el análisis, no se han obtenido mejoras substanciales. Los resultados anteriores corresponden a cargas resistivas. Las simulaciones con cargas inductivas, fallos con arco, e incluso con una fuente de perturbaciones (rectificador) dan resultados muy similares.

En este capítulo se ha discutido sobre la capacidad de las wavelets Daubechies en la detección de faltas en las líneas eléctricas. La elección de esta familia se debe a que son susceptibles de aplicar el algoritmo de Mallat, que conlleva una descomposición rápida y simple. La elección de la frecuencia de muestreo se ha basado en trabajos previos relacionados con la detección de faltas, donde no suele ser superior a 3 kHz [36,37,38].

Se puede decir que independientemente del número de coeficientes usados, las faltas fueron detectadas y no se han observado características distintivas de cada tipo de fallo. El instante de fallo es detectado incluso en condiciones de fallos con arco o con presencia de ruido. Por otro lado, una mayor frecuencia de muestreo y número de puntos no llevan necesariamente a mejores resultados, sino que conllevan un mayor tiempo de cálculo y requerimientos de memoria.

5.12 Transformada wavelet “off line”

Hasta ahora se ha realizado la transformada wavelet de una determinada señal de una manera “estática”. Es decir, una señal grabada es comparada con la wavelet “madre” la cual es trasladada y escalada en el tiempo. Se calcula así la similitud entre ambas señales, lo cual permite descomponer la señal original en los respectivos niveles wavelets. En la figura 5.27, se ilustra este proceso.

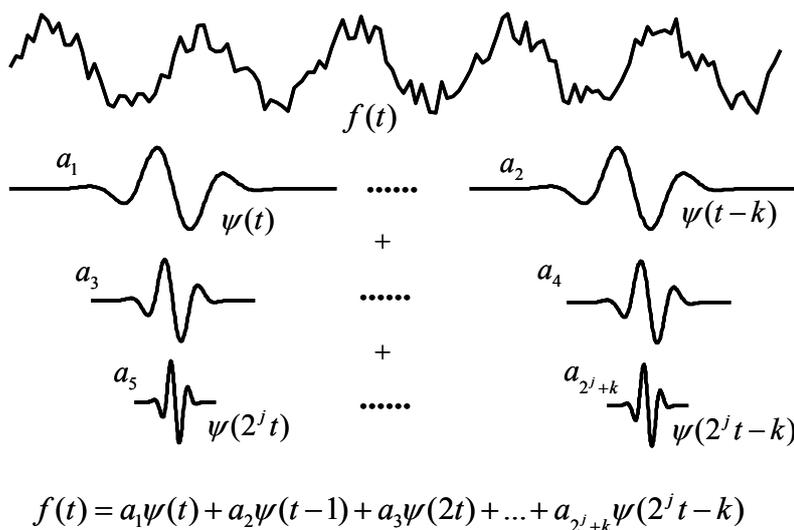


Fig. 5.27 *Análisis “off-line” mediante transformada wavelet.*

5.13 Transformada wavelet “on line”

La señal es ahora procesada a medida que es muestreada. La descomposición que resulta para la misma señal es diferente, puesto que la influencia en los extremos de los valores muestreados provoca la distorsión de la descomposición.

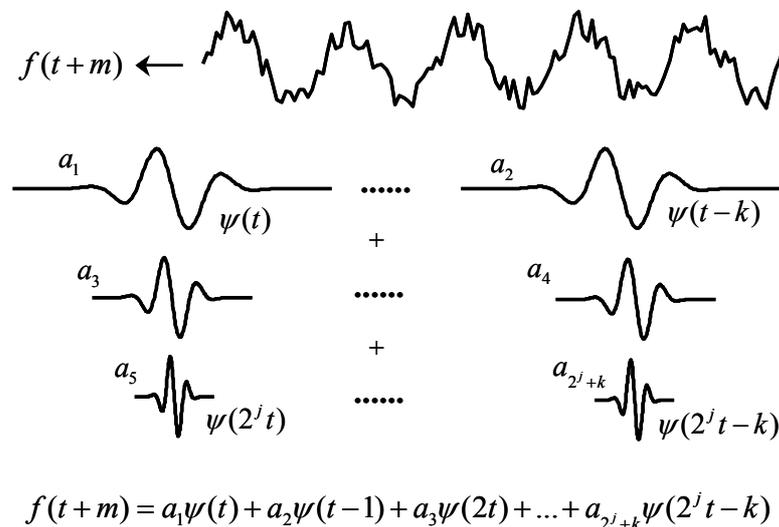


Fig. 5.28 Análisis “on-line” mediante la transformada wavelet.

5.14 Ejemplo

A continuación se presenta la descomposición de una señal mediante la transformada wavelet, donde pueden apreciarse estas características. En las figuras 5.22 a 5.26 la distorsión que se analizaba se encontraba “centrada”, mientras que cuando se trabaja “on-line”, figura 5.28, la distorsión en la señal es muestreada a medida que ocurre, con lo que no se tienen los mismos valores en todo el conjunto de la señal que es procesada. Como consecuencia se tienen dos resultados distintos. Las figuras 5.29 y 5.30 muestran estas diferencias. La frecuencia de muestro es de 1.6 kHz y la señal consta de 32 puntos. Se ha realizado el análisis empleando la familias Daubechies de 4 y 16 coeficientes. Se representa sólo la frecuencia más elevada y la de la frecuencia fundamental, a fin de apreciar el diferente comportamiento de cada una de ellas. Al igual que antes, el nivel de mayor frecuencia representa más claramente la detección del transitorio en ambas familias. El hecho de aumentar el número de coeficientes tampoco conlleva una mayor claridad en el reconocimiento de la perturbación.

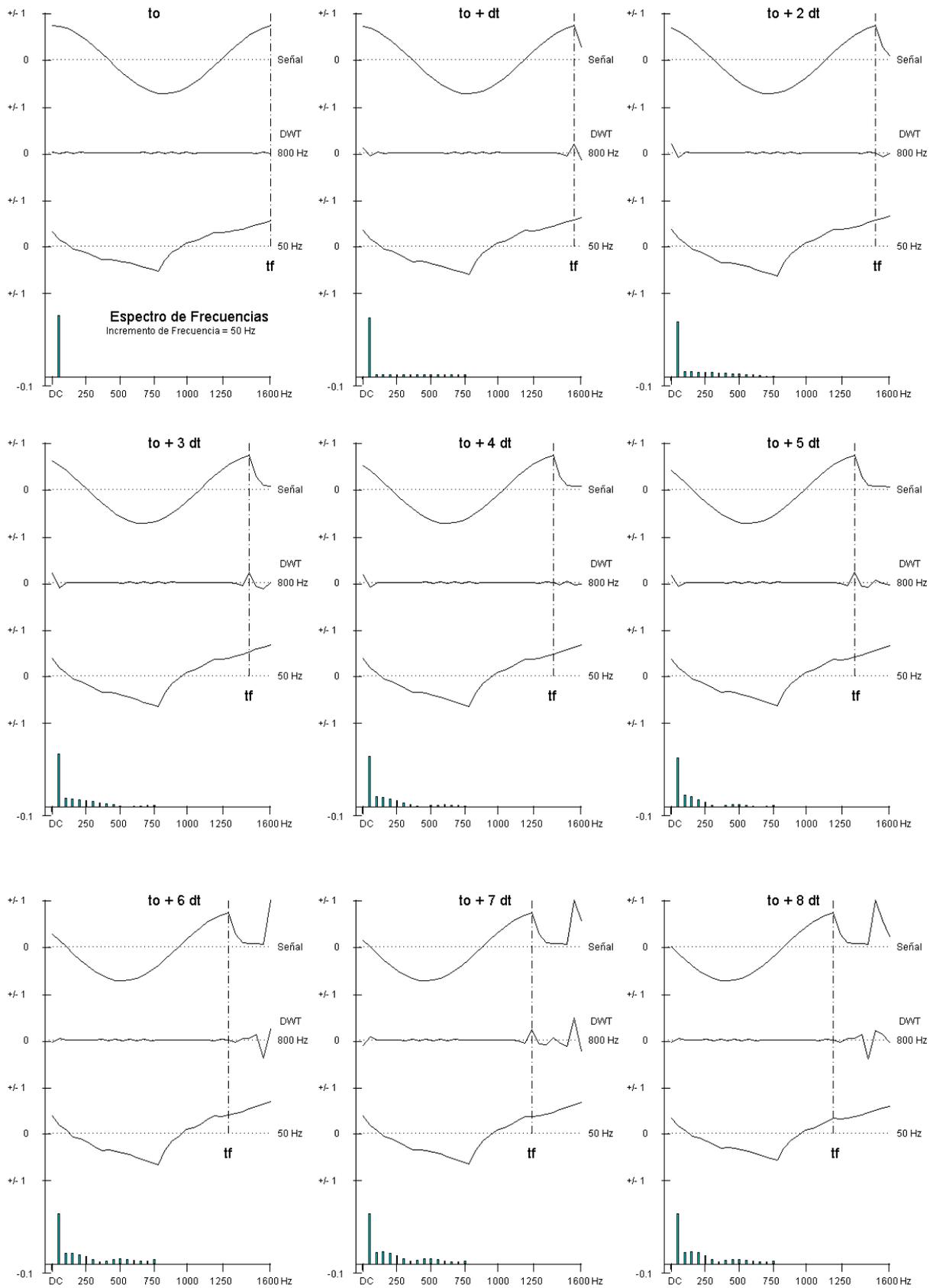


Fig. 5.29 *Análisis de una señal mediante la transformada wavelet Daubechies D4, para instantes de tiempo consecutivos ($f_s=1.6$ kHz, $N=32$ puntos).*

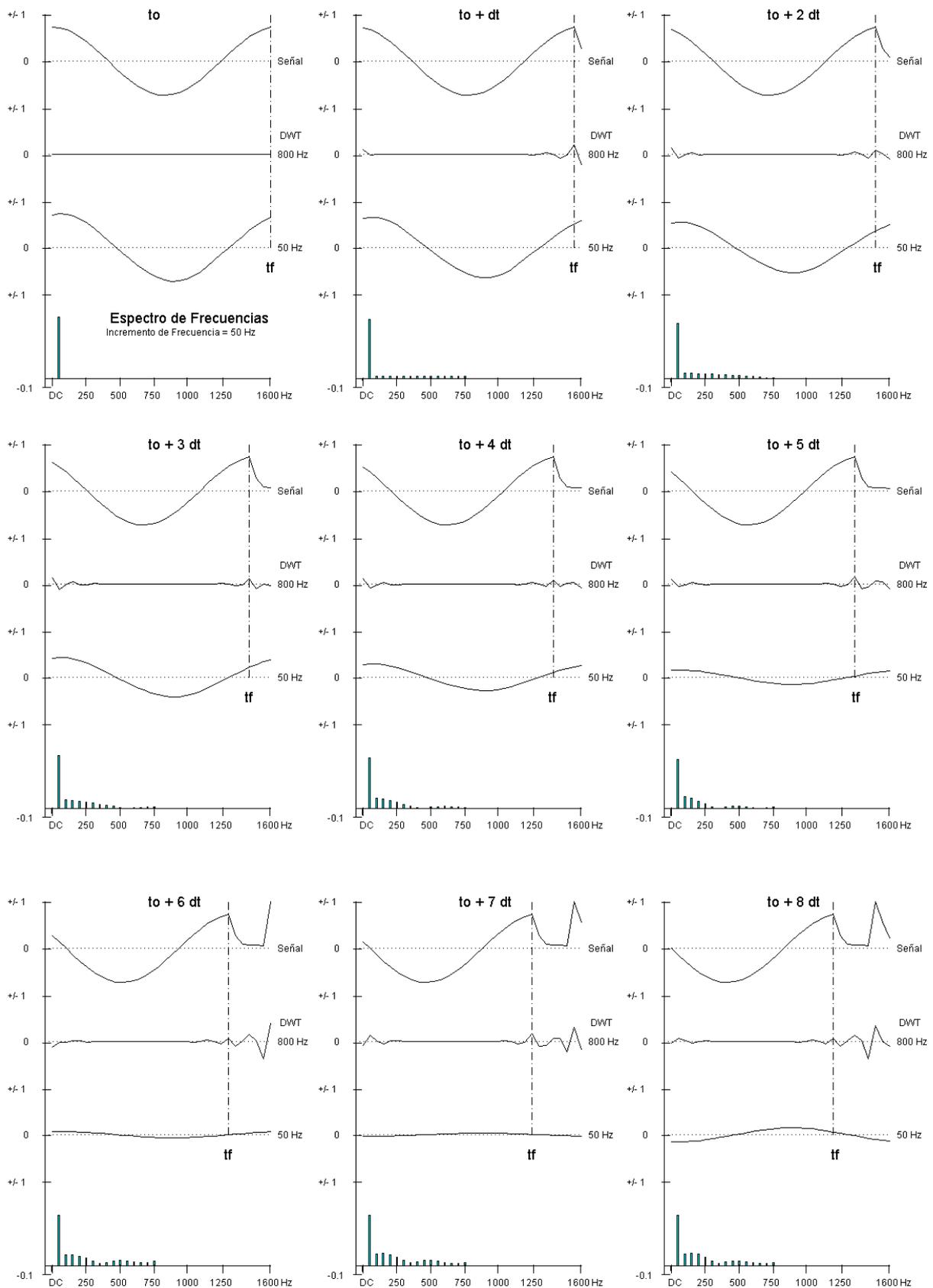


Fig. 5.30 Análisis de una señal mediante la transformada wavelet Daubechies D16, para instantes de tiempo consecutivos ($f_s=1.6$ kHz, $N=32$ puntos).

5.15 Conclusiones

En este capítulo hemos propuesto el tema de la transformada wavelet, sus características básicas y algunas aplicaciones. También se ha presentado una serie de análisis conducentes a la selección de la mejor combinación de lo que hemos denominado “parámetros wavelets”, desde los puntos de vista en su momento comentados. A continuación se hace una breve reflexión y se justifica la elección de los valores que se emplearán en el desarrollo de la tesis.

Una wavelet es una función que define un conjunto de filtros obtenidos mediante escalado de esa función. Escogiendo una determinada wavelet madre, podemos usarla comprimiéndola y expandiéndola en el tiempo para describir una serie temporal de una manera significativa y sencilla al mismo tiempo. Hay un número infinito de funciones filtro wavelet. Lo importante es que la relación entre filtros es geométrica: para pasar de un filtro a otro multiplicamos la frecuencia central por una constante. De esta manera, se persigue cumplir la regla “el ancho del filtro es proporcional a su frecuencia central”.

En el fondo, las wavelets resultan de la unión de un filtro en fase y otro en cuadratura, “quadrature-mirror” (QM), [88]. Estos filtros pueden ser usados como excelentes detectores (hay que recordar que un filtro en cuadratura presenta el máximo en su salida cuando los valores de entrada cambian más rápidamente).

En cualquier caso, se busca que el método de procesado de señal cumpla las condiciones:

- capturar la máxima información posible,
- la salida del filtro ha de tener una relación simple y directa con el proceso subyacente. Un suceso debe ser evidente y significativo a la salida del mismo,
- el número de salidas ha de ser el menor posible, a fin de que el modelo de predicción no se vea saturado a posteriori por una ingente cantidad de valores que dificulte su tarea.

Desafortunadamente debemos escoger entre estas situaciones, puesto que normalmente no es posible conseguir las tres simultáneamente, lo que obliga a adquirir unos compromisos. Así, la familia Daubechies son las mejores wavelet cuando se trata de capturar el máximo de información posible, pero violan el segundo principio antes comentado, ya que unos mismos eventos pueden aparecer de tal guisa que puede ser imposible reconocerlos por el modelo de aprendizaje o predicción. Tienen la ventaja de ser ortogonales y apropiadas para la aplicación

del algoritmo de multirresolución de Mallat. En cambio, las wavelets Morlet son más apropiadas para modelos de predicción, aunque generan un mayor número de datos de entrada.

Una vez hechas estas aclaraciones, cabe mencionar que el objetivo de incorporar el procesado de señal es obtener una información que nos describa claramente determinados eventos de una señal temporal que ha de ser analizada posteriormente por una red neuronal, de tal forma que ayuden a esta última en su cometido de detección de cualquier perturbación que se presente, en este caso aplicado al reconocimiento de fallos en señales eléctricas de sistemas de potencia.

De los estudios realizados, se concluye que un incremento en la frecuencia de muestreo y en el número de coeficientes del filtro no conlleva a unos mejores resultados en cuanto a una mayor claridad en la detección, así como a descubrir características especiales que dependen del tipo de falta.

Por todos estos motivos, la familia wavelet empleada ha sido la Daubechies de cuatro coeficientes, para una frecuencia de muestreo de 1.6 kHz y con 32 puntos por periodo. Esta familia es suficiente para los requisitos que necesitamos. Asimismo, de los diferentes niveles de resolución se emplea el de mayor frecuencia.

Capítulo 6 La transformada wavelet mediante redes neuronales

6.1 Introducción

Tal como se apuntó en el capítulo cuarto, dedicado a las redes neuronales artificiales, la unidad básica de una red neuronal es la neurona, la cual realiza la suma ponderada de unos valores de entrada, como se muestra en la figura 6.1.

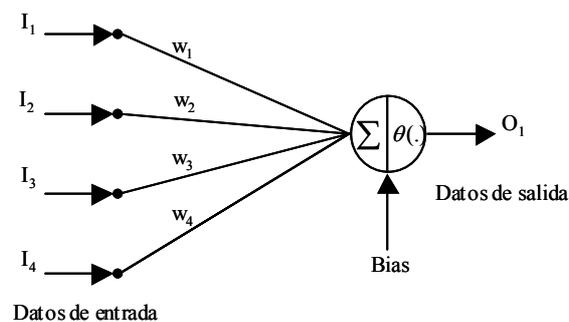


Fig. 6.1 Modelo de una neurona.

Asimismo, una red multicapa, figura 6.2, puede ser considerada como un operador algebraico con sumas y multiplicaciones, en la que es posible reconstruir una amplia gama de algoritmos.

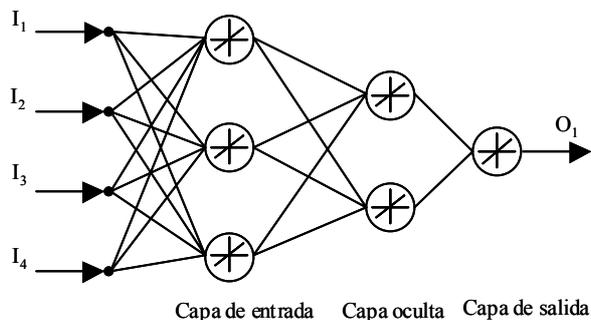


Fig. 6.2 Red multicapa (“MultilayerFeedforward NeuralNetwork”, MLFNN).

6.2 La red neuronal como elemento de cálculo

La “Toolbox de Wavelets” del Matlab se usó para obtener la descomposición de la señal con la familia Daubechies de 4 coeficientes, como se muestra en la figura 6.3. Se representa sólo el primer nivel de descomposición, con la señal de aproximación y la de detalle, d_1 que corresponde al nivel de 1.6 kHz.

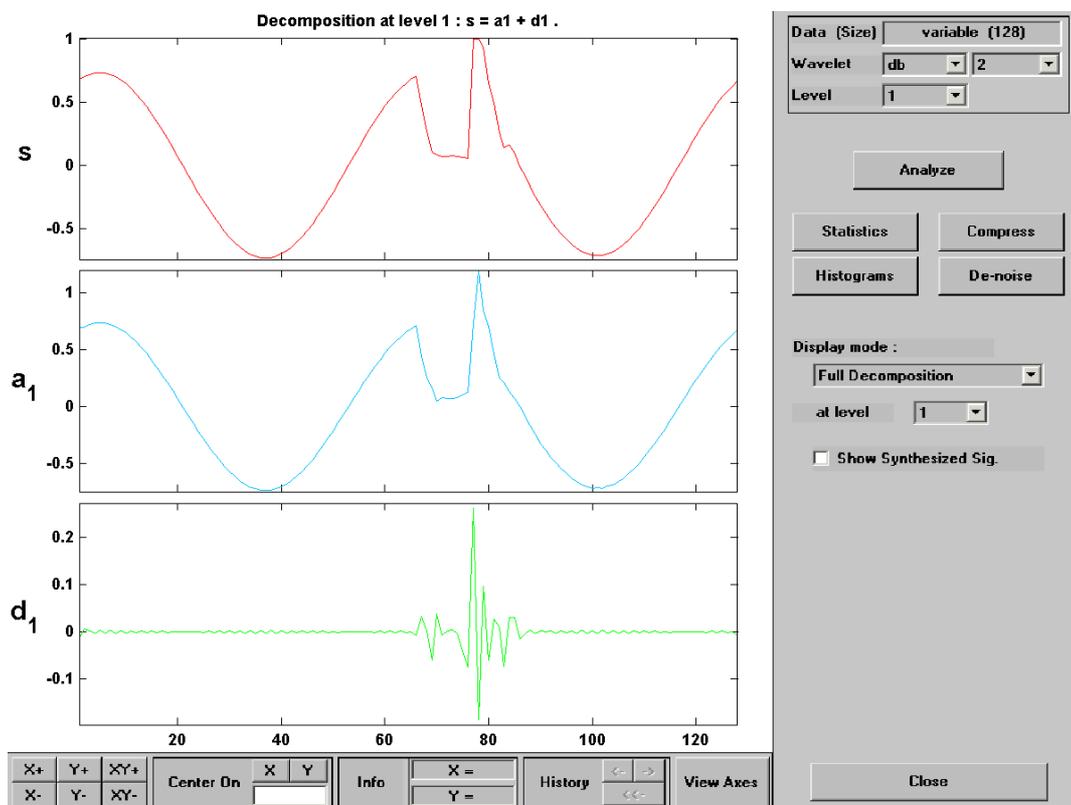


Fig. 6.3 Señal original y descomposición con Daubechies D4. Frecuencia de muestreo 3.2 kHz. 128 puntos, obtenida con la “ToolBox de Wavelets del Matlab”

Se ha empleado el SNNS [93] para diseñar la red neuronal que realiza la transformada wavelet. Una parte de la red neuronal se muestra en la figura 6.4. La red calcula el nivel de frecuencia más elevada de la señal. La figura 6.5 muestra la descomposición en el nivel de 1.6 kHz al aplicar la transformada wavelet.

Se comprueba fácilmente que es posible realizar la transformada wavelet empleando una estructura de red neuronal de una forma muy sencilla. Este hecho nos permite integrar dentro de la red neuronal general de reconocimiento de patrones, una subred encargada de llevar a cabo el procesado de señal.

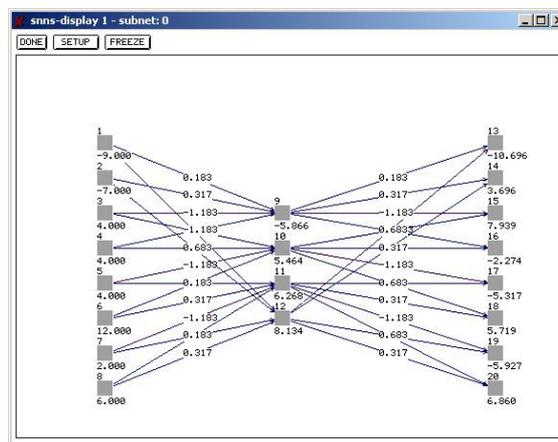


Fig. 6.4 Red neuronal para realizar la transformada wavelet para una Daubechies 4.

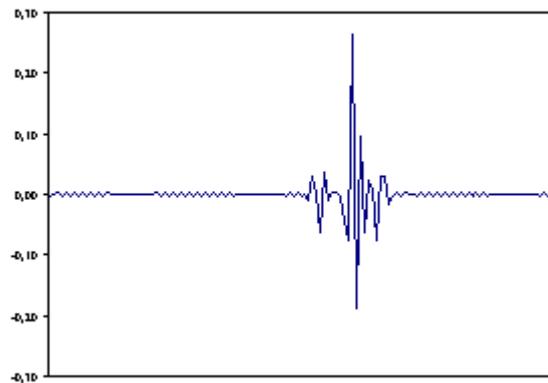


Fig. 6.5 Transformada wavelet obtenida con la red neuronal.

La descomposición mediante transformada wavelet se puede realizar con una red neuronal multicapa. Las ventajas que presenta son las siguientes:

- la descomposición se obtiene con funciones lineales, que son fácilmente programables,
- el algoritmo usa una red “feedforward” simple,
- se usan pesos fijos, y no es necesario entrenar la red,
- esta configuración permite integrar el preprocesado de la señal como una parte más de la red neuronal y no son necesarios dispositivos electrónicos ni un programa específico para calcularla, con lo que se reducen tiempo de cálculo y costes, y
- la red se puede extender fácilmente a wavelets de más coeficientes incrementando el número de neuronas.

Capítulo 7 Metodología, diseño y análisis de los relés de protección propuestos

7.1 Introducción

En los capítulos anteriores se discutieron los conceptos básicos sobre la simulación de sistemas eléctricos de potencia, redes neuronales artificiales y procesamiento de señal con la transformada wavelet. En este capítulo se tratará el objeto principal de esta investigación: la protección de distancia de líneas de transmisión.

Los trabajos previos con las redes neuronales [20,25,32-38] han mostrado su buen comportamiento en la detección de fallos, estimación de la dirección del fallo, predicción de la dirección de la corriente antes y después del fallo, la protección diferencial de transformadores de potencia y frente a los datos perdidos y erróneos.

En este trabajo se presentará una familia de relés de protección basados en redes neuronales. Estos relés analizarán los fallos que, bajo diferentes condiciones de operación de la red se produzcan en la misma y que se muestra en la figura 7.2. El objetivo principal de esta investigación es diseñar un relé tan general como sea posible, es decir, que actúe ante fallos originados por el contacto de un conductor a tierra o con otros conductores a tensión diferente. Además, su actuación deberá ser independiente de la ubicación del relé, de la potencia de cortocircuito y de los parámetros de la línea.

Este relé general nos va indicar:

- las fases afectadas por el fallo,
- la dirección del fallo vista desde el relé y
- la zona o distancia a la que ha ocurrido el fallo.

Cuando se aborda este tema de forma general nos encontramos con que es prácticamente imposible resolverlo con un solo relé, por que estas tareas se implementan mediante un conjunto de redes neuronales, cada uno de las cuales realizará una función específica, figura 7.1.

Es posible diseñar unos relés para la detección y determinación de la dirección del fallo que cumplen con los requisitos de generalidad antes expuestos, pero resulta inviable incluir en una misma red neuronal las características de generalidad asociadas a la protección de distancia, dado que la zona o distancia que ve un relé depende de la ubicación del mismo, de la potencia de cortocircuito y de los parámetros de la línea a proteger, que pueden modificar la impedancia aparente vista por el relé, provocando un problema de sobrealcance o subalcance en función del caso en particular. Por este motivo nos hemos visto obligados a diseñar un relé específico para detectar la zona del fallo que se ajusta a unas condiciones específicas.

El esquema general de protección propuesto combina la protección de distancia y la protección con comunicación mediante:

a) Relés MLF-DWT (MultiLayer Feedforward-Discrete Wavelet Transform)

El relé consta de varios módulos que realizan las funciones de detección y selección de la fase fallada, sentido del flujo de potencia en ausencia de fallo, y estimación de la dirección del fallo. Se entrena usando patrones de los diferentes puntos de ubicación y con todas las posibles condiciones de operación y de fallo. Por tanto, puede ser colocado en cualquier lugar del sistema para su protección después de ajustar el nivel de normalización de la corriente, que depende de los límites de carga de la línea. El funcionamiento de la red neuronal del relé de detección se complementa con la transformada wavelet para el caso de la detección, mientras que los otros dos módulos constan de una red neuronal simple.

b) Relés MLF-ZON

Se acopla con el detector de fallo un estimador de la zona de fallo que determinará la zona donde está localizado el fallo. Este estimador de distancia se entrena localmente y en dependencia con la topología de la red en el lugar de ubicación del relé. Esto significa que existen relés de distancia entrenados para discriminar dos zonas hacia adelante, en el caso de estar conectados en una barra de generación, o dos zonas hacia adelante y una hacia atrás, cuando se trata de una línea de transmisión. Por ser este último un caso más general se ha tomado como referencia para diseñar el relé de zona.

El esquema de funcionamiento del relé propuesto se presenta en la figura 7.1.

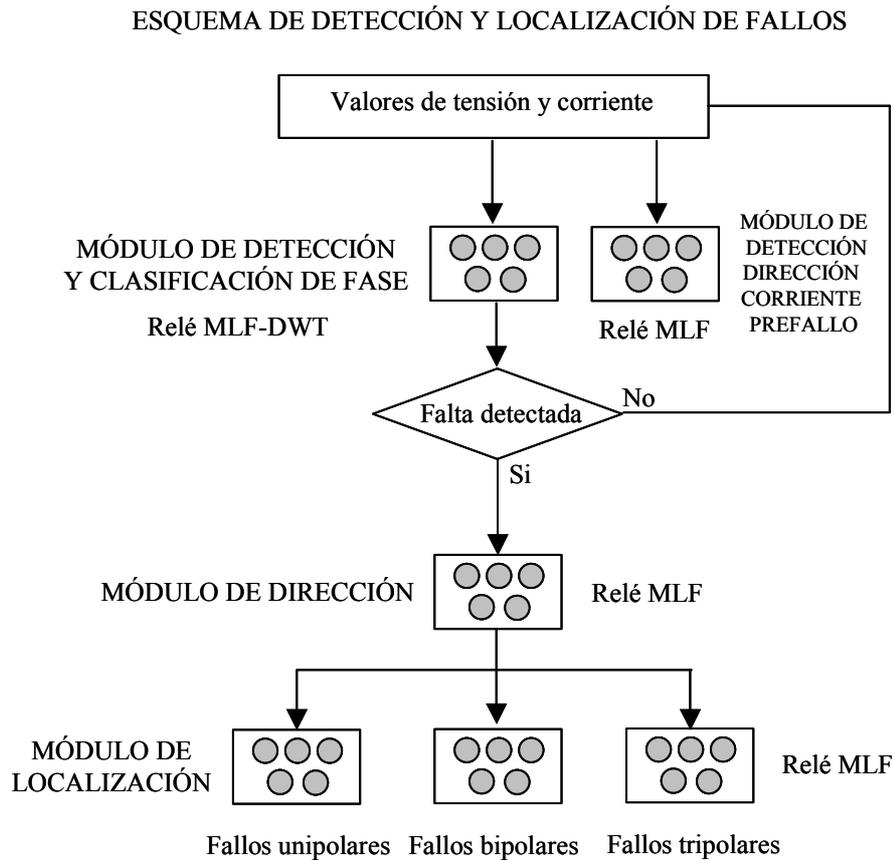


Fig. 7.1 Esquema de funcionamiento del relé de protección propuesto.

7.2 Sistema empleado en la simulación

En la simulación se ha utilizado el sistema mostrado en la figura 7.2. Para el entrenamiento de las diferentes redes neuronales se han tenido en cuenta las siguientes hipótesis:

- Todas las líneas de transmisión tienen una corriente nominal de 1 kA, excepto la TL1, que tiene una corriente nominal de 2 kA.
- Las cargas en las barras X e Y pueden variar desde cero a una carga máxima de 1 kA cada una, y el factor de potencia varía entre 0,707 en retraso y 0,707 en adelanto, incluyendo el caso de factor de potencia igual a la unidad.
- La sobrecarga se consideró como un caso normal. La barra 1 no puede tener cargas y siempre estará conectada a la red.
- Los niveles de cortocircuito de las barras de generación varían entre:
 - 15 GVA y 45 GVA para las barras 1,
 - 7,5 GVA y 22 GVA para las barras 2 y
 - 10 GVA y 30 GVA para las barras 5.

Además se considera un caso especial en el que las barras 2 y 5 tienen un nivel de cortocircuito muy bajo. En tal caso, en ausencia de fallo se comportan como barras de carga y después del fallo se comportan como barras de baja generación.

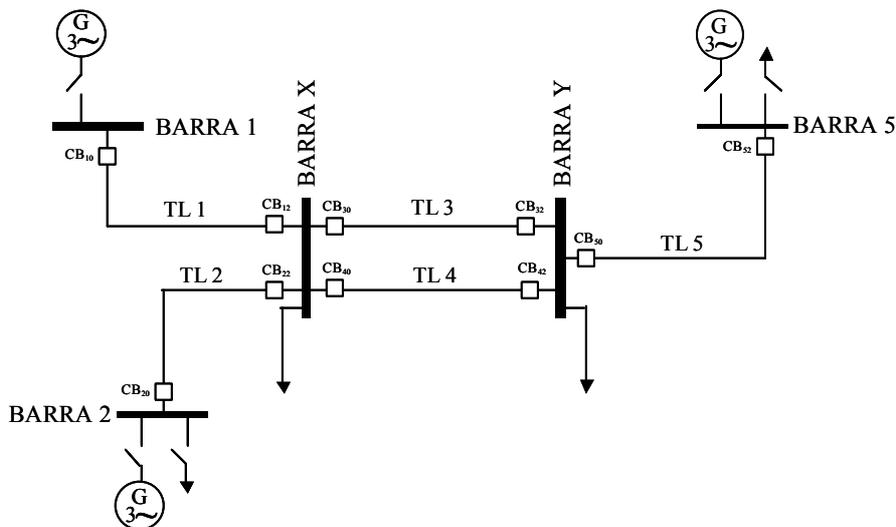


Fig. 7.2 Esquema del sistema de potencia empleado en las investigaciones.

La tabla 7.1 presenta las combinaciones que se pueden realizar para tener los diferentes estados de operación.

Tabla 7.1 Estados de operación considerados de la red de la figura 7.2.

#	Interruptores cerrados	Barras de generación	Barras de carga	Líneas de transmisión en servicio
1	CB ₁₀ ,CB ₁₂	1	X	TL 1
2	CB ₁₀ ,CB ₁₂ ,CB ₃₀ , CB ₃₂	1	X, Y	TL 1, TL 3
3	CB ₁₀ ,CB ₁₂ ,CB ₃₀ ,CB ₃₂ ,CB ₅₀ , CB ₅₂	1	X, Y, 5	TL 1, TL 3,TL 5
4	CB ₁₀ ,CB ₁₂ ,CB ₃₀ ,CB ₃₂ ,CB ₅₀ , CB ₅₂	1, 5	X, Y	TL 1, TL 3,TL 5
5	CB ₁₀ ,CB ₁₂ ,CB ₂₀ , CB ₂₂	1	X, 2	TL 1, TL 2
6	CB ₁₀ ,CB ₁₂ ,CB ₂₀ , CB ₂₂	1, 2	X	TL 1, TL 2
7	CB ₁₀ ,CB ₁₂ ,CB ₂₀ ,CB ₂₂ ,CB ₃₀ ,CB ₃₂	1	2, X, Y	TL 1, TL 2,TL 3
8	CB ₁₀ ,CB ₁₂ ,CB ₂₀ ,CB ₂₂ ,CB ₃₀ ,CB ₃₂	1, 2	X, Y	TL 1, TL 2,TL 3
9	CB ₁₀ ,CB ₁₂ ,CB ₃₀ ,CB ₃₂ ,CB ₄₀ ,CB ₄₂ ,CB ₅₀ ,CB ₅₂	1	X, Y, 5	TL 1, TL 3,TL 4, TL5
10	CB ₁₀ ,CB ₁₂ ,CB ₃₀ ,CB ₃₂ ,CB ₄₀ ,CB ₄₂ ,CB ₅₀ ,CB ₅₂	1, 5	X, Y	TL 1, TL 3,TL 4, TL5
11	CB ₁₀ ,CB ₁₂ ,CB ₂₀ ,CB ₂₂ ,CB ₃₀ ,CB ₃₂ ,CB ₄₀ ,CB ₄₂	1	2, X, Y	TL 1, TL 2,TL 3, TL 4
12	CB ₁₀ ,CB ₁₂ ,CB ₂₀ ,CB ₂₂ ,CB ₃₀ ,CB ₃₂ ,CB ₄₀ ,CB ₄₂	1, 2	X, Y	TL 1, TL 2,TL 3, TL4
13	CB ₁₀ ,CB ₁₂ ,CB ₂₀ ,CB ₂₂ ,CB ₃₀ ,CB ₃₂ ,CB ₅₀ ,CB ₅₂	1	2, X, Y, 5	TL 1, TL 2,TL 3, TL 5
14	CB ₁₀ ,CB ₁₂ ,CB ₂₀ ,CB ₂₂ ,CB ₃₀ ,CB ₃₂ ,CB ₅₀ ,CB ₅₂	1, 2	X, Y, 5	TL 1, TL 2,TL 3, TL 5
15	CB ₁₀ ,CB ₁₂ ,CB ₂₀ ,CB ₂₂ ,CB ₃₀ ,CB ₃₂ ,CB ₅₀ ,CB ₅₂	1, 5	2, X, Y	TL 1, TL 2,TL 3, TL 5
16	CB ₁₀ ,CB ₁₂ ,CB ₂₀ ,CB ₂₂ ,CB ₃₀ ,CB ₃₂ ,CB ₅₀ ,CB ₅₂	1, 2, 5	X, Y	TL 1, TL 2,TL 3, TL 5
17	CB ₁₀ ,CB ₁₂ ,CB ₂₀ ,CB ₂₂ ,CB ₃₀ ,CB ₃₂ ,CB ₄₀ ,CB ₄₂ ,CB ₅₀ ,CB ₅₂	1	2, X, Y, 5	TL 1, TL 2,TL 3, TL 4,TL5
18	CB ₁₀ ,CB ₁₂ ,CB ₂₀ ,CB ₂₂ ,CB ₃₀ ,CB ₃₂ ,CB ₄₀ ,CB ₄₂ ,CB ₅₀ ,CB ₅₂	1, 2	X, Y, 5	TL 1, TL 2,TL 3, TL 4,TL5
19	CB ₁₀ ,CB ₁₂ ,CB ₂₀ ,CB ₂₂ ,CB ₃₀ ,CB ₃₂ ,CB ₄₀ ,CB ₄₂ ,CB ₅₀ ,CB ₅₂	1, 5	2, X, Y	TL 1, TL 2, TL 3, TL 4,TL5
20	CB ₁₀ ,CB ₁₂ ,CB ₂₀ ,CB ₂₂ ,CB ₃₀ ,CB ₃₂ ,CB ₄₀ ,CB ₄₂ ,CB ₅₀ ,CB ₅₂	1, 2, 5	X, Y	TL 1, TL 2, TL 3, TL 4,TL5

Los tipos de fallos simulados son los siguientes:

- 1- Fallos francos de una fase a tierra y con arco para cada fase A, B o C.
- 2- Fallos bifásicos francos en todas las combinaciones (A-B; B-C y C-A).
- 3- Fallos bifásicos francos con contacto a tierra arco en todas las combinaciones posibles (A-B-E; B-C-E y C-A-E).
- 4- Fallos trifásicos francos a tierra y con arco.

La frecuencia de muestreo usada para formar los patrones y realizar el entrenamiento de las redes neuronales de cada módulo fue de 1.6 kHz.

7.3 El relé MLF-DWT:

El relé MLF-DWT se utiliza para detectar cualquier tipo de fallo, detectar la fase que tiene el fallo, estimar la dirección del fallo y distinguir cuando el circuito se encuentra abierto para aplicar un algoritmo especial de reenganche. La figura 7.3 presenta el relé MLF-DWT. El relé se compone de una red neuronal de tipo multicapa y unos elementos de procesamiento para tratar las salidas de la red y estabilizarlas. El relé MLF-DWT tiene también la ventaja de que puede estimar la dirección del fallo cuando este se produce muy cercano al relé (tensión cero) y cuando la tensión y la corriente en el lugar del relé son nulas.

El relé MLF-DWT se compone de tres bloques básicos:

A) **Bloque #1:**

Este bloque contiene dos componentes básicos: el bloque #2 y el bloque #3.

Las entradas de este bloque son:

- las muestras de las tensiones y las corrientes de las tres fases muestreadas a 1.6 kHz

Sus salidas son:

- tres señales de disparo, una para cada fase (A, B, C). Cada una de estas señales tienen tres niveles: +1 que indica fallo en la red eléctrica y -1 que indica fase sana,
- una señal que define la dirección del fallo (DIR) con dos niveles: +1 que indica fallo hacia adelante, y -1 que indica fallo hacia atrás. La dirección hacia adelante significa que la corriente fluye de CB_{x0} hacia CB_{x2} y de -1 para flujo en sentido contrario,
- una señal (R) que se usa para un algoritmo especial de reenganche. El nivel +1 indica valor de corriente normal y el nivel -1 indica que la fase se encuentra en una situación de

subtensión/subintensidad, bien porque ha abierto o porque un fallo ha provocado la interrupción del flujo de potencia.

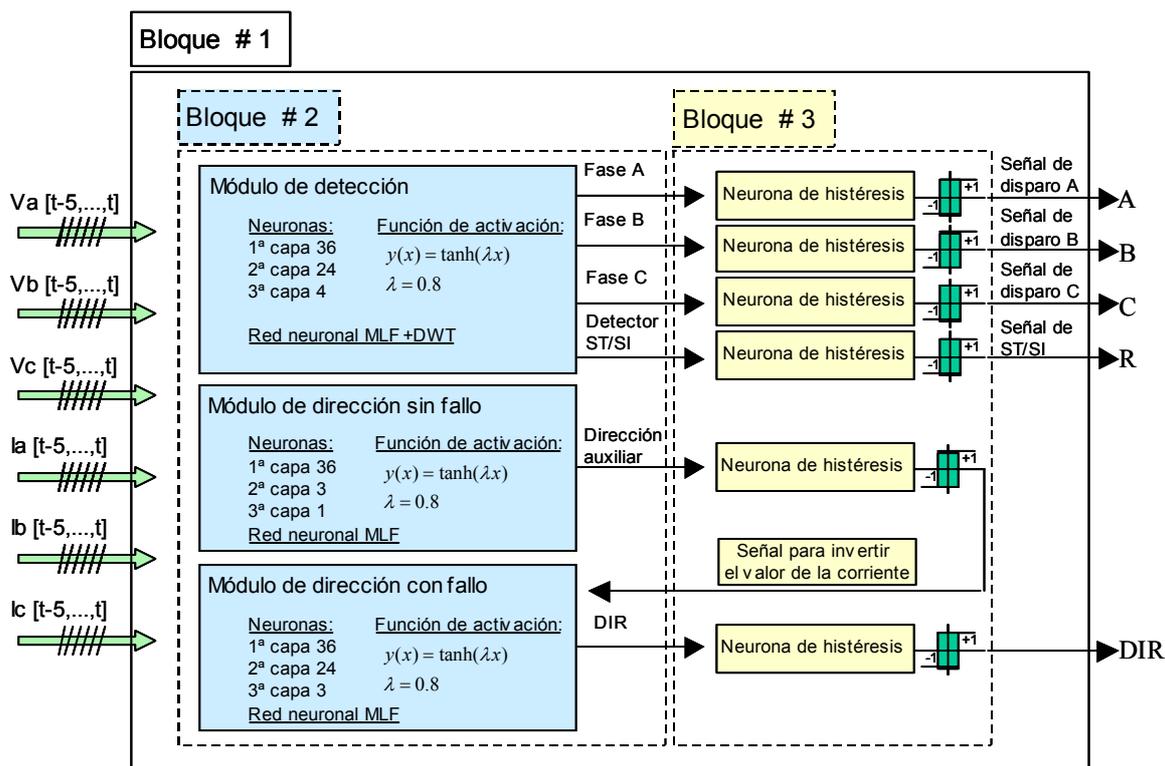


Fig. 7.3 El relé MLF-DWT.

b) Bloque #2:

Este bloque contiene el cerebro del relé propiamente dicho.

Las entradas de éste bloque son:

- los valores instantáneos de las tres tensiones de fase a tierra, muestreadas a 1.6 kHz, normalizadas por 120 V y recortadas a +1 y -1,
- los valores instantáneos de las tres corrientes de línea, muestreadas a 1.6 kHz, normalizadas por 4,5 veces el valor eficaz de la corriente nominal de la línea y recortadas a +1 y -1.

Dentro de este bloque se encuentran las redes neuronales que realizan las diferentes funciones de protección del relé. Está compuesto de tres módulos:

- Módulo de detección:

Es el encargado de detectar el fallo y determinar que fase o fases son las afectadas.

Las salidas son:

- tres señales de disparo, una para cada fase (A, B, C). Cada una de estas señales tiene dos niveles: +1 que indica fallo en la fase –1 que indica fase sana,
- una salida usada para el algoritmo de reenganche (R). Su función es determinar cuando la línea se encuentra en una situación de subtensión/subintensidad.

- Módulo de dirección sin fallo:

Es el encargado de detectar la dirección de la corriente en ausencia de fallo. Una vez que se ha producido el fallo no se tiene en cuenta hasta que este se ha disipado.

Su salida es:

- una señal con dos niveles: +1 indicando que la corriente fluye de CB_{x0} hacia CB_{x2} y de –1 para flujo en sentido contrario.

- Módulo de dirección con fallo:

Es el encargado de detectar la dirección de la corriente durante el fallo. A pesar de que la red neuronal en sí tiene tres neuronas de salida, a efectos prácticos, se considera una sola salida.

Su salida es:

- una señal con dos niveles: +1 indicando que la corriente fluye de CB_{x0} hacia CB_{x2} y de –1 para flujo en sentido contrario.

C) Bloque # 3:

Este bloque contiene:

- seis neuronas de histéresis, una para cada salida de los distintos módulos del relé que sirven para estabilizar sus salidas,

Las entradas de este bloque son las salidas del bloque #2 y sus salidas son:

- tres salidas que definen la fase que tiene el fallo (A, B, C),
- una salida para la detección de subtensión/subintensidad usada en el algoritmo de reenganche (R),
- una salida que actúa como estimador de la dirección del fallo (DIR).

7.4 Entrenamiento del relé MLF-DWT

En el proceso del entrenamiento del relé se usaron patrones de fallo de todos los relés, usando las topologías 3, 4, 5 y 6 indicadas en la tabla 7.1. Cada patrón de fallo se compone de las muestras de tensión y corriente correspondientes a sesenta y cuatro valores consecutivos. Los

patrones del entrenamiento incluyen todas las posibles contingencias e influencias, como la saturación de los transformadores de intensidad, los fallos con arco y francos, diferentes instantes de iniciación del fallo, diferentes niveles de cortocircuito y diferentes tipos de barras. Como intervalo de muestreo del entrenamiento se tomó el comprendido entre un ciclo antes del fallo y 1 ciclo durante el fallo. En figura 7.4 se presenta el intervalo temporal de los patrones del entrenamiento. El nivel de la tensión del arco estaba en 35 kV.

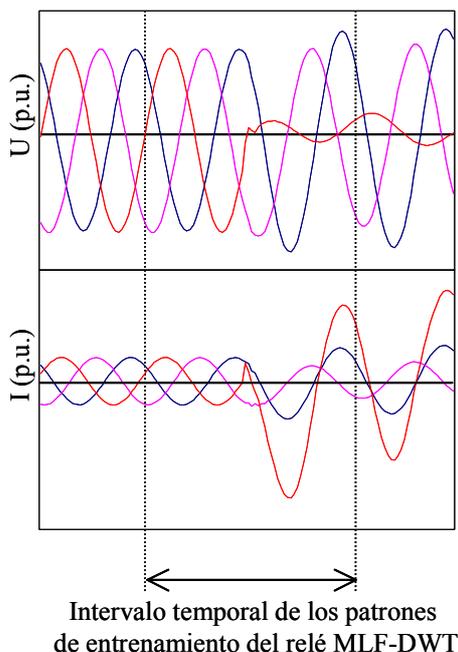


Fig. 7.4 Intervalos de tiempo usados en el entrenamiento y en el test del relé MLF-DWT.

En la tabla 7.2 se presenta el diseño de las salidas del relé durante el entrenamiento.

Tabla 7.2 El diseño de las salidas del relé MLF-DWT durante el entrenamiento.

Salida	Estado	Valor
Fallo de fase A [A]	Fallo	+1
	No fallo	-1
Fallo de fase B [B]	Fallo	+1
	No fallo	-1
Fallo de fase C [C]	Fallo	+1
	No fallo	-1
Dirección del fallo [DIR]	Flujo hacia adelante	+1
	Flujo hacia atrás	-1
Subtensión [R]	Fallo con sobreintensidad	+1
	Fallo con subtensión/subintensidad	-1

7.5 Comportamiento del relé MLF-DWT y análisis estadísticos

Los patrones de test usados son distintos de los usados en los entrenamientos. El test incluirá el comportamiento del relé en todas las líneas que forman el circuito de prueba. Esto se realizará para diferentes localizaciones de fallo, para fallos con arco y sin arco, y asumiendo la saturación de los transformadores de intensidad. También se puede ver el comportamiento del relé para fallos que se producen en otras líneas y comprobar así el alcance del mismo. En la figura 7.5 se representa el diagrama de la red eléctrica estudiada durante un fallo monofásico de la fase *A* a tierra, y en la figura 7.6 se representa la respuesta del relé MLF-DWT ubicado en el punto 10, estando la línea TL4 fuera del servicio.

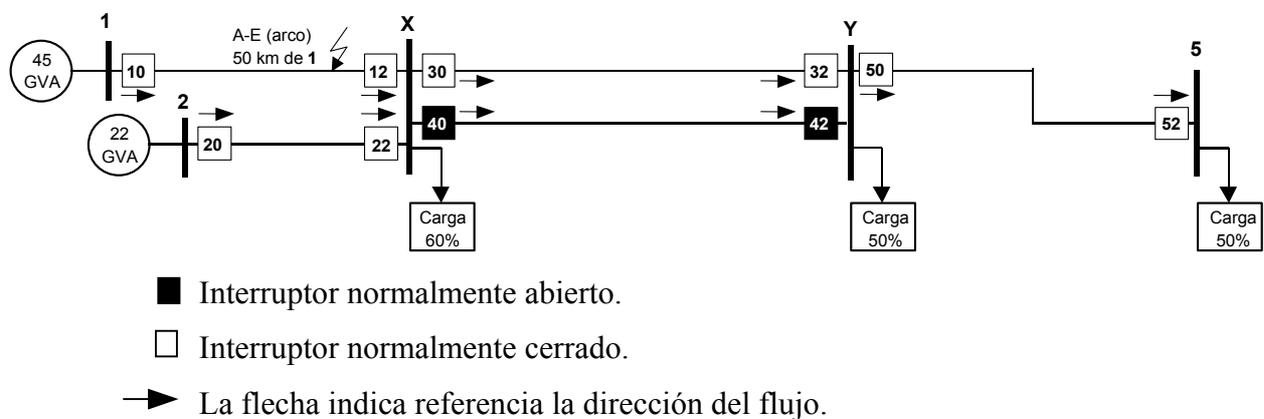


Fig. 7.5 Esquema de la red para un fallo de fase *A* y tierra con arco de 35 kV a 50 km del relé.

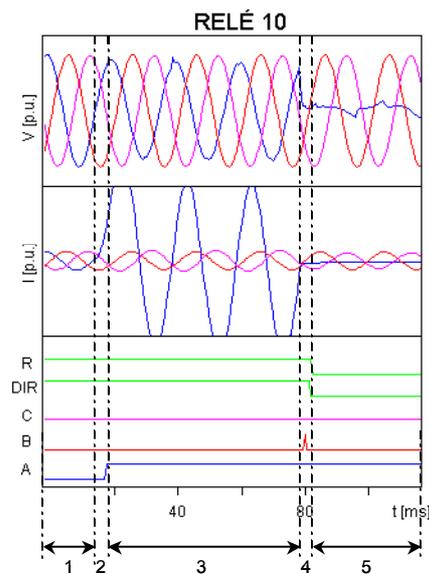


Fig. 7.6 Respuesta del relé MLF-DWT ubicado en el punto 10 para un fallo de la fase *A* y tierra con arco de 35 kV a 50 km del relé.

La respuesta del relé se puede explicar como sigue:

Intervalo 1:

En sistema eléctrico funciona correctamente en este intervalo y las salidas A , B y C están en -1 indicando que no hay fallo, la dirección del flujo DIR esta en $+1$ que significa flujo hacia adelante y la salida R es $+1$ indicando tensión y corriente nominales.

Intervalo 2:

Al comienzo del intervalo 2 se produce un fallo monofásico a tierra de fase A y al final del intervalo la salida A del relé se pone en $+1$. El resto de salidas siguen en su anterior estado.

Intervalo 3:

En el intervalo 3, que dura aproximadamente tres ciclos, las salidas son: $A = +1$ indicando fallo de la fase A , $B = -1$ y $C = -1$, $DIR = +1$ lo que indica que el fallo es hacia adelante y $R = +1$ indicando que durante el fallo no se ha cortado la alimentación.

Intervalo 4:

Al comienzo de este intervalo, se abre el interruptor 10, y después de 5 ms la salida R cambia a -1 indicando subtensión/subintensidad (en este caso tanto la corriente como la tensión de la fase A son cero) lo que indica la interrupción de la alimentación de la línea y también la salida DIR se cambia a -1 .

Intervalo 5:

En el intervalo 5, la salida A sigue en $+1$ mientras B y C siguen en -1 , DIR en -1 y R en -1 . En la figura 7.7 se representa la respuesta del relé 30 para el mismo fallo.

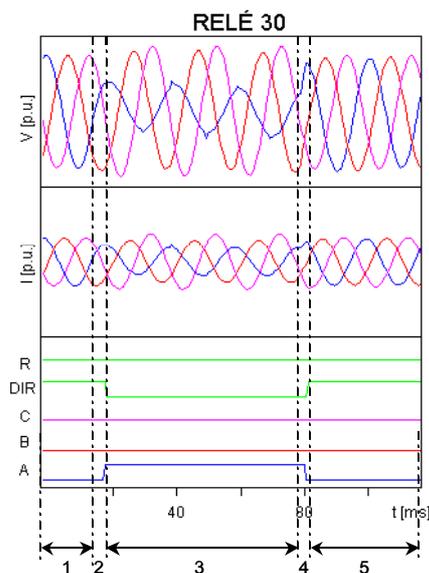


Fig. 7.7 Respuesta del relé MLF-DWT ubicado en el punto 30, para un fallo de la fase A y tierra, con arco de 35 kV a 50 km del relé.

La respuesta del relé se puede explicar como:

Intervalo 1:

En sistema eléctrico funciona correctamente en este intervalo y las salidas A , B y C están en -1 indicando que no hay fallo, la dirección del flujo DIR está en $+1$, lo que significa que el flujo es hacia adelante y la salida R está en $+1$ indicando tensión y corriente normales.

Intervalo 2:

Al comienzo del intervalo 2, se produce un fallo monofásico a tierra de fase A y al final del intervalo la salida A del relé se pone en $+1$, la salida DIR se pone en -1 indicando que el fallo es detrás del relé (aquí provoca una situación de subtensión/subintensidad) pero la salida R se mantiene en $+1$ indicando que durante el fallo se sigue manteniendo la alimentación.

Intervalo 3:

En el intervalo 3, que dura aproximadamente tres ciclos, las salidas son: $A = +1$ (lo que indica fallo en la fase A), B y $C = -1$, $DIR = -1$ (lo que indica fallo hacia atrás) y $R = +1$.

Intervalo 4:

Al comienzo de este intervalo, se abre el interruptor 10, y la salida DIR cambia a $+1$ indicando en este caso que la corriente de la fase A vuelve a tomar un valor próximo al que tenía antes del fallo alimentándose del generador de la barra 2 y también la salida R sigue a $+1$, lo que indica que el flujo de potencia se mantiene como antes.

Intervalo 5:

En el intervalo 5, el fallo se ha disipado y la salida A vuelve a -1 . Las fases, B y C siguen en -1 , DIR en $+1$ y R en $+1$.

Hay situaciones en las que a pesar de que el fallo y la dirección son detectados correctamente, durante los primeros instantes del mismo hay una oscilación en la salida de la red neuronal que retarda el tiempo de estabilización de la misma. La respuesta del relé en estos casos se mejora con la ayuda de la transformada wavelet. El algoritmo usado, figura 7.8, detecta cualquier fallo incipiente acelerando y asegurando la respuesta de la red neuronal. La figura 7.9 muestra la respuesta del relé donde sólo interviene la parte de la red neuronal MLF y en la figura 7.10 intervienen ésta última y el algoritmo de la DWT.

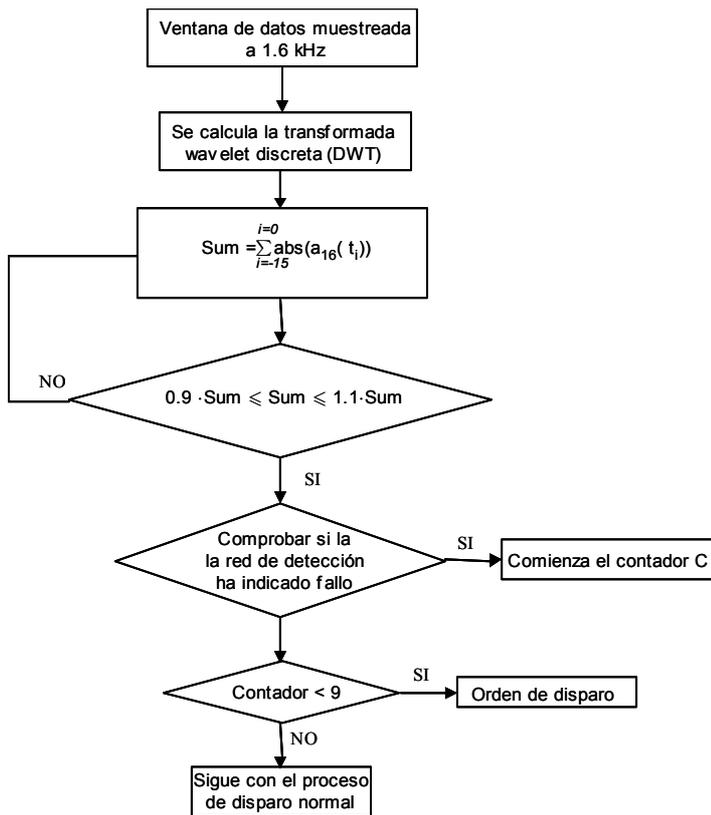


Fig. 7.8 Algoritmo para la transformada wavelet, utilizado en la aceleración de la respuesta del relé en casos de respuestas con oscilaciones.

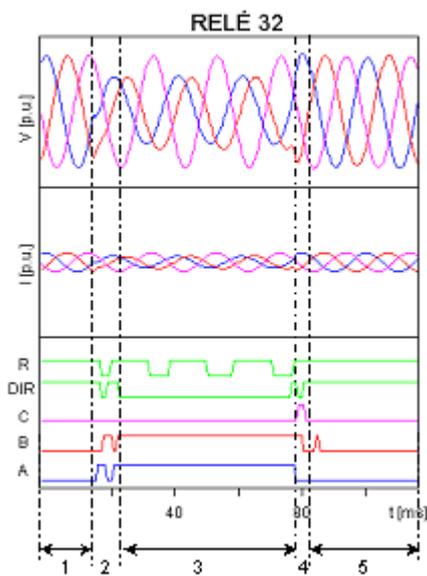


Fig. 7.9 Respuesta del relé MLF, ubicado en el punto 32, para un fallo franco entre las fases A y B.

La respuesta del relé se puede explicar como:

Intervalo 1:

En sistema eléctrico funciona correctamente en este intervalo y las salidas A , B y C están en -1 indicando que no hay fallo, la dirección del flujo DIR está en $+1$, lo que significa que el flujo es hacia adelante y la salida R está en $+1$ indicando tensión y corriente normales.

Intervalo 2:

Al comienzo del intervalo 2, se produce un fallo bifásico franco de fases A y B y al final del intervalo las salidas A y B del relé se ponen en $+1$, la salida DIR se pone en -1 indicando que el fallo es detrás del relé (aquí provoca una situación de subtensión/subintensidad) y la salida R se pone se mantiene en -1 indicando que durante el fallo ha disminuido la alimentación. Sin embargo se producen unas oscilaciones que retardan el tiempo de estabilización y de respuesta segura del relé.

Intervalo 3:

En el intervalo 3, que dura aproximadamente tres ciclos, las salidas son: A y $B = +1$ (lo que indica fallo en las fases A, B), $C = -1$, $DIR = -1$ (lo que indica fallo hacia atrás) y R oscila indicando que hay un problema con la alimentación de la línea.

Intervalo 4:

Al comienzo de este intervalo, se abre el interruptor 10, y la salida DIR cambia a $+1$ indicando en este caso que la corriente de la fase A vuelve a tomar un valor próximo al que tenía antes del fallo alimentándose del generador de la barra 2 y también la salida R sigue a $+1$, lo que indica que el flujo de potencia se mantiene como antes. El fallo comienza a desaparecer y la salida A pasa a valor -1 .

Intervalo 5:

En el intervalo 5, el fallo se ha disipado y las salidas A y B vuelven a -1 . La fase C siguen en -1 , DIR en $+1$ y R en $+1$.

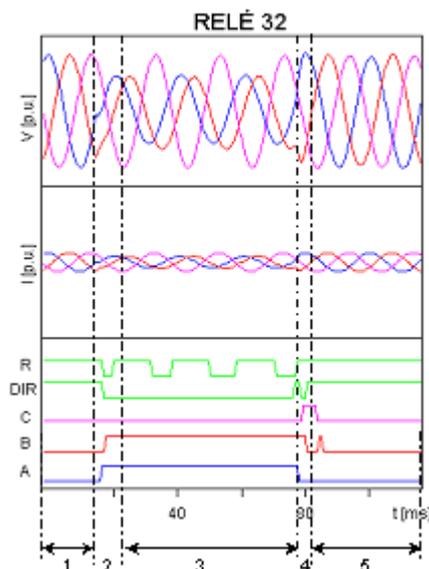


Fig. 7.10 Respuesta del relé MLF-DWT, ubicado en el punto 32, para un fallo franco entre las fases A y B.

La respuesta del relé se explica como el caso anterior. La única diferencia se presenta en el intervalo 2.

Intervalo 2:

Al comienzo del intervalo 2, se produce un fallo bifásico franco de fases A y B y las salidas A y B y DIR del relé se estabilizan en +1 y -1 respectivamente en menor tiempo que en el caso anterior. La transformada wavelet detecta la perturbación en la señal original y tras comprobar que ha habido detección previa de la red neuronal (que ahora oscila), acelera y asegura la respuesta durante los primeros instantes del fallo. Se han eliminado las oscilaciones que retardan el tiempo de estabilización y se consigue una respuesta más fiable y rápida del relé.

En las figuras 7-11 a 7-15 se presentan las respuestas del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red, para diferentes tipos de fallos, diferentes topologías y diferentes tipos de cargas. En dichas figuras hemos elegido las condiciones de fallos más difíciles para las protecciones, estando la línea TL4 desconectada. En el apéndice A se representan más casos de fallos (figura A-1 a A-60).

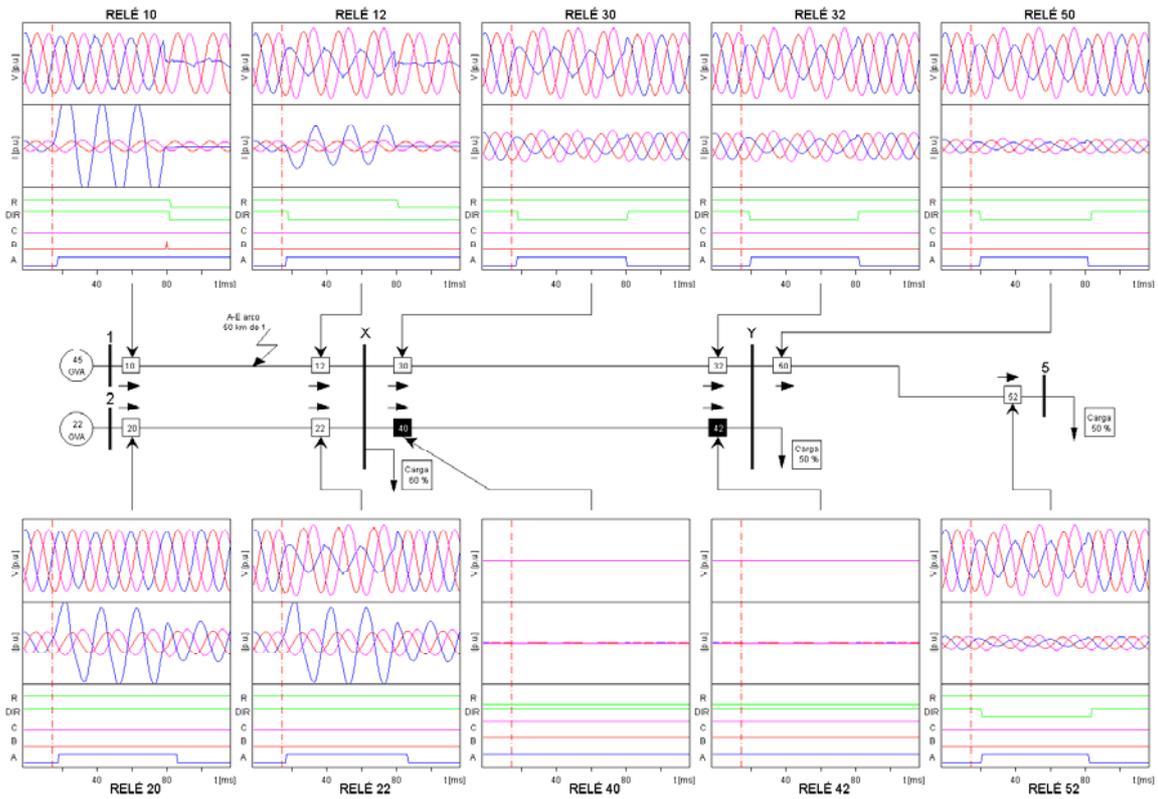


Fig. 7.11 Respuestas del relé MLF-DWT, situado en diez posiciones diferentes de la red, para un fallo de la fase A y tierra, con arco de 35 kV a 50 km de la barra 1.

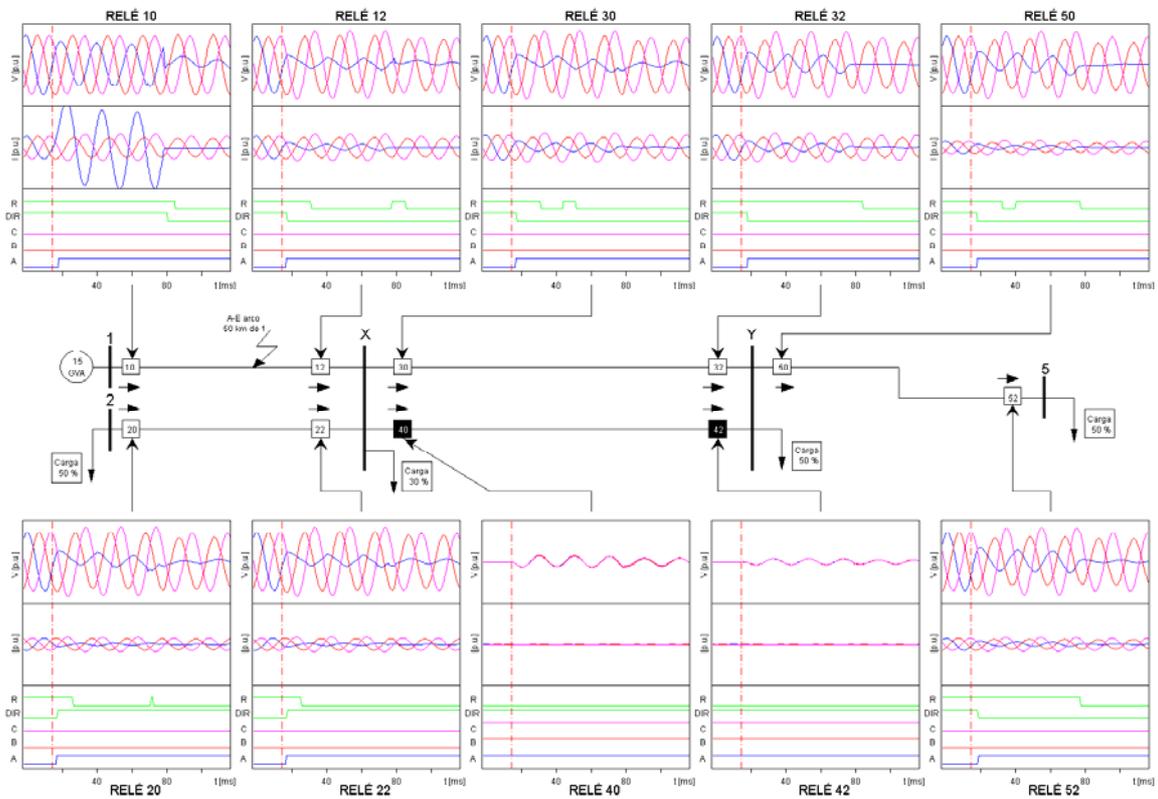


Fig. 7.12 Respuestas del relé MLF-DWT, situado en diez posiciones diferentes de la red, para un fallo de la fase A y tierra, con arco de 35 kV a 50 km de la barra 1.

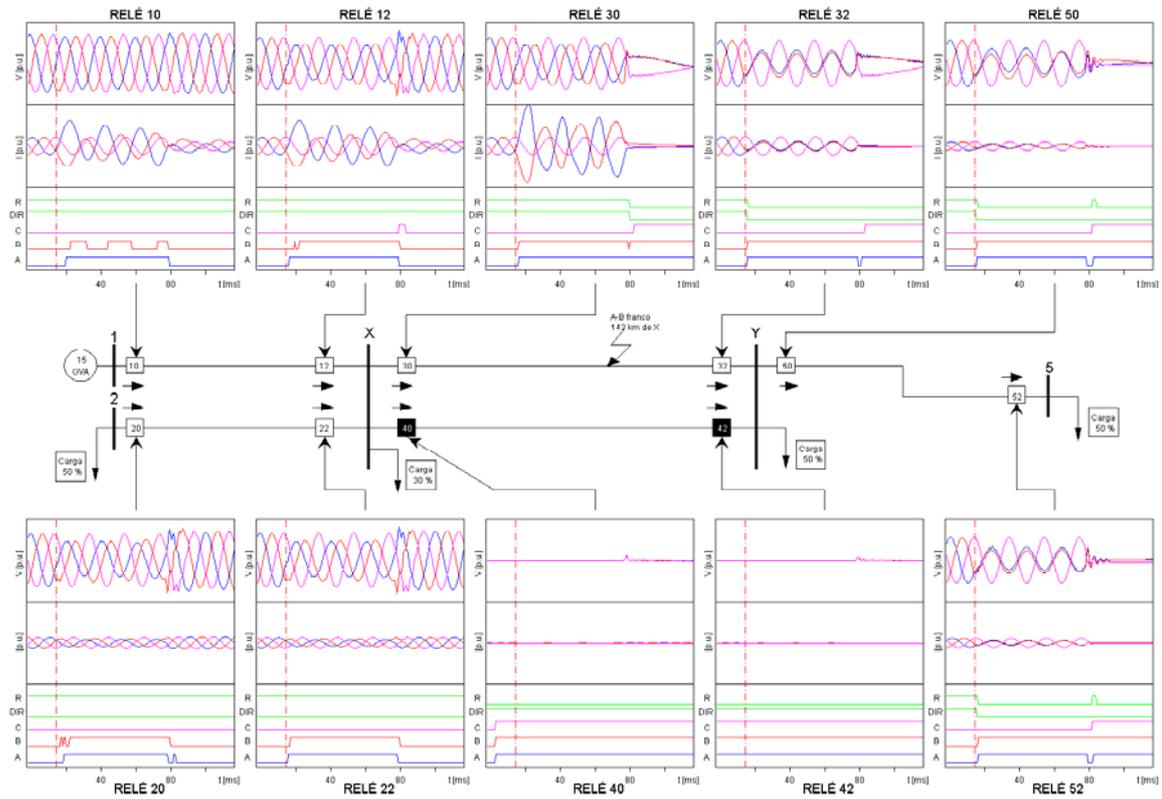


Fig. 7.13 Respuestas del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A, B y tierra a 143 km de la barra X.

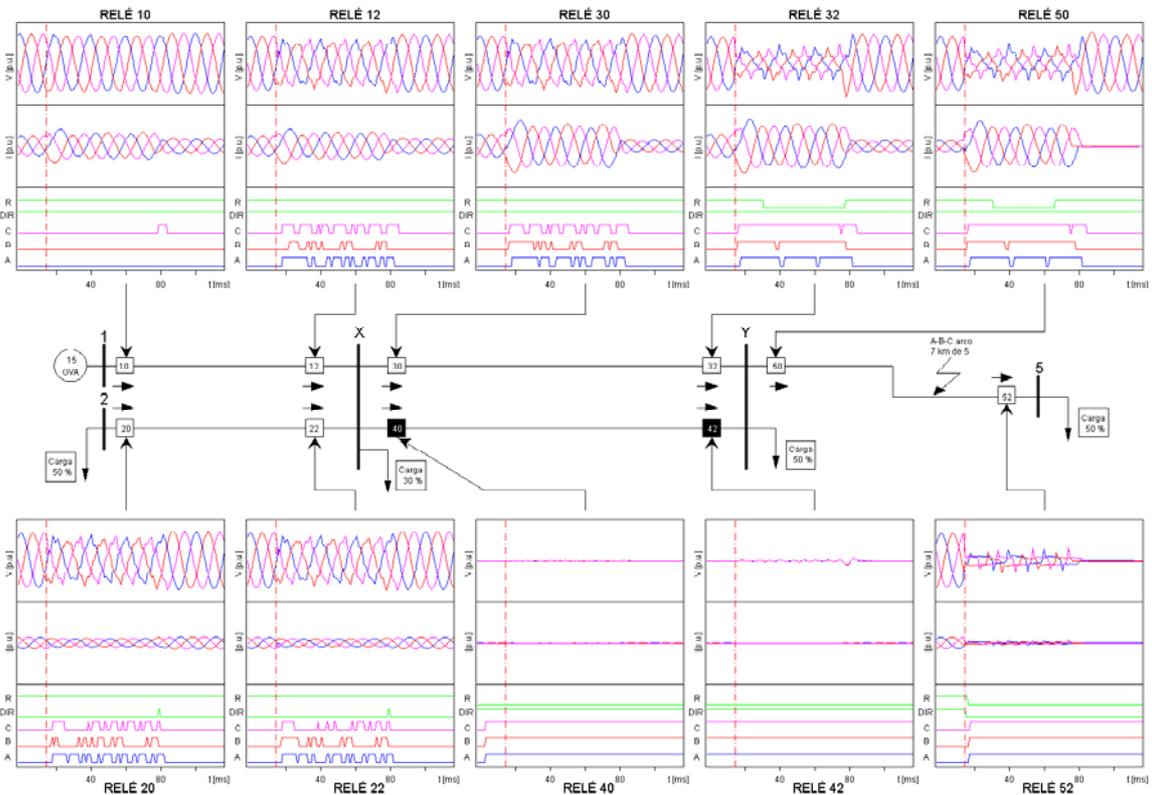


Fig. 7.14 Respuestas del relé MLF-DWT, situado en diez posiciones diferentes de la red, para un fallo trifásico a tierra, con arco de 35 kV a 7 km de la barra 5.

También, hemos incluido unos resultados para los fallos especiales en las barras cuando la tensión en las barras mismas es cero. En figura 7-15 se muestra uno de estos resultados. En el apéndice A se encuentran varios casos más del mismo tipo (figuras A-61 a A-70).

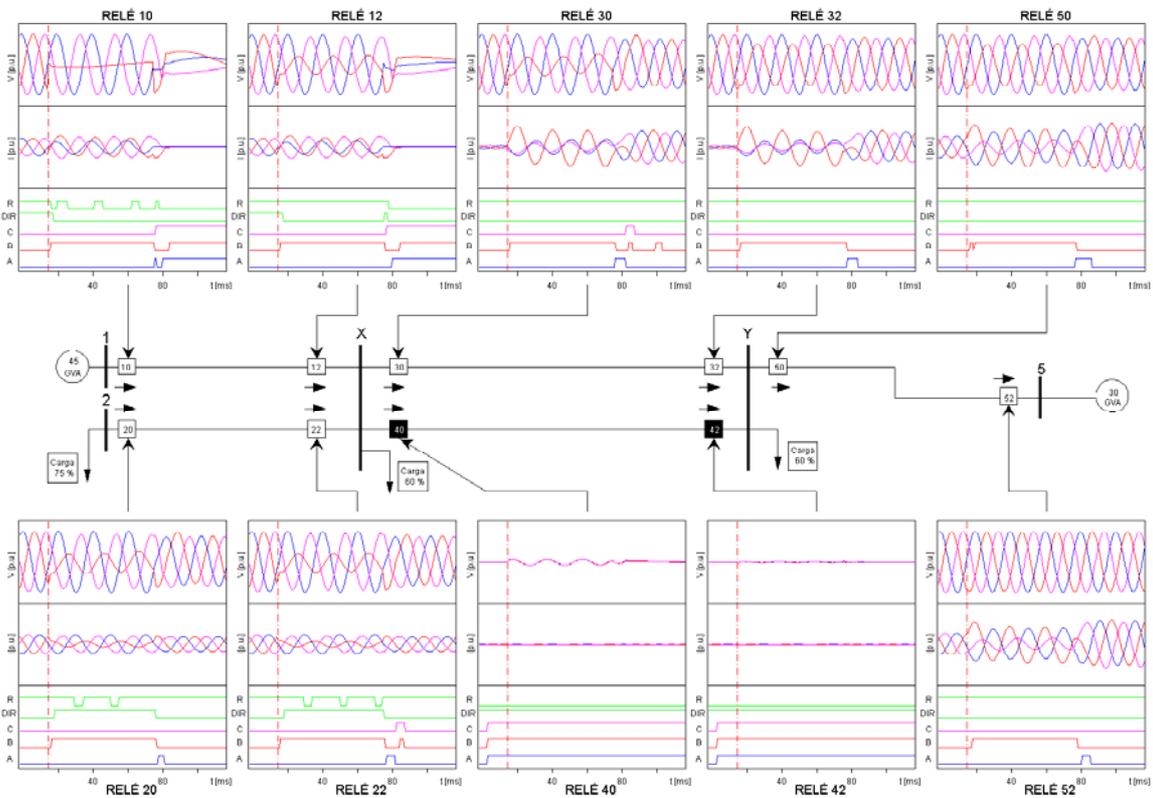
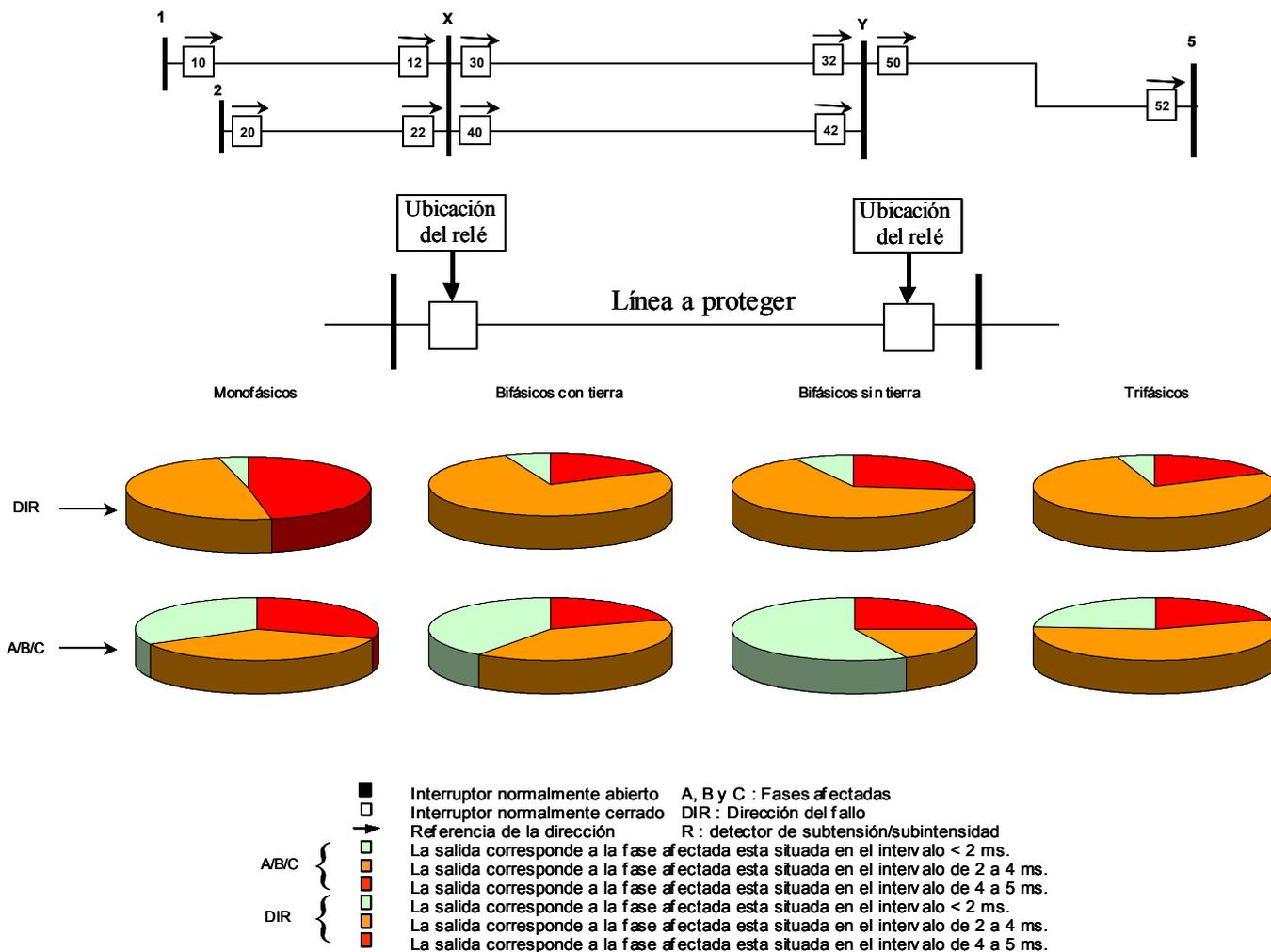


Fig.7.15 Respuestas del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red, para un fallo de la fase B a tierra, en el punto de la barra 1.

En el caso de fallos monofásicos en barras la determinación de la dirección no presenta ningún problema. En los fallos bifásicos estudiados la determinación de la dirección puede dar lugar a errores en función de la posición del relé. Cuando se trata de líneas terminales, sin más derivaciones la determinación es correcta, pero cuando se trata de una barra con varias derivaciones, ante la pérdida de tensión el relé tiende a identificar el fallo hacia atrás, puesto que lo interpreta como una pérdida de alimentación, aunque realmente el flujo de corriente continúe en el mismo sentido. Este problema se puede subsanar parcialmente aumentando el número de neuronas de la red de dirección de fallo, con una configuración 36/34/3, como se ha realizado en las figuras A.066, A.067 y A.068. En fallos trifásicos resulta difícil solucionar los casos en los que varias líneas salen de la misma barra, y uno de los relés dará una respuesta errónea, como se ve en las figuras A.069 y A.070.

La respuesta del relé MLF-DWT está representada de forma estadística en la figura 7.16, pudiendo observarse en general un buen comportamiento del mismo. Los resultados se han realizado teniendo en cuenta la respuesta del relé situado indistintamente en ambos extremos de la línea a la que ha de proteger, cuando ocurre un fallo en la misma, en las diferentes líneas del circuito en estudio y con diferentes cargas y potencias de cortocircuito. El rendimiento del relé es el mismo para fallos en las líneas paralelas TL3 y TL4. En el apéndice A se encuentran más ejemplos de circuitos con líneas paralelas (figuras A-71 a A-122).



	A/B/C				DIR			
	■	■	■	■	■	■	■	■
	<2ms	<2-4 ms	<4 ms	4-5 ms	<2ms	<2-4 ms	<4 ms	4-5 ms
Monofásicos	47	49	96	4	30	37	67	33
Bifásicos con Tierra	18	76	94	6	20	40	60	40
Bifásicos sin Tierra	27	65	92	8	25	18	43	57
Trifásicos	18	77	95	5	20	56	76	24

Fig. 7.16 Rendimiento del relé MLF-DWT en tanto por ciento teniendo en cuenta todas las posibles condiciones de fallo, las topologías de la tabla 7.1 y los posibles niveles de carga.

Como resumen del trabajo de investigación realizado en este apartado y por los resultados obtenidos podemos asegurar que el relé MLF-DWT tiene un buen comportamiento, es fiable

y el tiempo de respuesta de la red neuronal de detección está situado entre 1,8 ms y 4 ms, retardándose hasta 4,5 ms en el caso de fallo muy débiles alejados del relé. En el caso de la pérdida de datos, la relevancia de estos está en función del momento en que se producen y de la importancia de la pérdida. Así, la ausencia de datos durante el funcionamiento normal del sistema que provoque unos datos de valor cero a la entrada a la red neuronal tienden a ser identificados como un corte en la alimentación de la línea y se clasifica como fallo. En caso de que esto ocurra durante un fallo, la pérdida de datos tiende a reforzar la respuesta del relé. Se observa también que la respuesta del relé es más sensible a la pérdida de valores en las señales de tensión, figuras A.123 y A.124.

7.6 El relé MLF-ZON

El segundo paso en esta investigación es el diseño de los relés de distancia para detectar la zona del fallo. Dado que la determinación de la zona del fallo depende directamente de los parámetros de la línea y del tipo de fallo, había que diseñar una red neuronal por cada tipo de fallo y por cada relé. Es decir, una red neuronal para fallos monofásicos, otra para fallos bifásicos y una tercera para fallos trifásicos por cada relé. Por otro lado, el diseño de los relés depende de las zonas a proteger por cada relé. La tabla 7.3 muestra las zonas a proteger por cada relé en la red usada en esta investigación. Las entradas de la red neuronal son las tensiones y las corrientes de las tres fases muestreadas a 1.6 kHz. Las tensiones están normalizadas utilizando los mismos valores del relé MLF-DWT, pero a las corrientes se le han añadido nuevos patrones normalizados a 3 veces el valor nominal. Las salidas se aplican a unas neuronas de histéresis para estabilizarlas. En las figuras 7.17 se presenta la estructura del relé MLF-ZON, que discrimina entre la primera, segunda y tercera zona respectivamente. La tabla 7.4 presenta la designación de las salidas y los valores que éstas pueden tomar en relé.

Tabla 7.3 Zonas y elementos a proteger y respaldar por cada relé.

Relé	Zona hacia adelante del relé	Zona hacia atrás del relé	A proteger	A respaldar
CB ₁₀	2	-	TL 1	CB ₄₀ , CB ₃₀ , CB ₂₂
CB ₁₂	1	1	TL 1	CB ₄₀ , CB ₃₀ , CB ₂₂
CB ₂₀	2	-	TL 2	CB ₄₀ , CB ₃₀ , CB ₁₂
CB ₂₂	1	1	TL 2	CB ₄₀ , CB ₃₀ , CB ₁₂
CB ₃₀	2	1	TL 3	CB ₅₀ , CB ₁₂ , CB ₂₂
CB ₃₂	2	1	TL 3	CB ₅₀ , CB ₁₂ , CB ₂₂
CB ₄₀	2	1	TL 4	CB ₅₀ , CB ₁₂ , CB ₂₂
CB ₄₂	2	1	TL 4	CB ₅₀ , CB ₁₂ , CB ₂₂
CB ₅₀	1	1	TL 5	CB ₃₂
CB ₅₂	2	-	TL 5	CB ₃₂

La configuración de una red neuronal artificial desde el punto de vista del número de neuronas por capa, depende directamente de los casos a clasificar y de las combinaciones [71].

El relé se compone de una red neuronal de tipo multicapa y unos elementos de procesamiento para tratar las salidas de la red y estabilizarlas. El relé MLF-ZON se compone de tres bloques básicos:

A) Bloque #1:

Este bloque contiene dos componentes básicos: el bloque #2 y el bloque #3.

Las entradas de este bloque son:

- las muestras de las tensiones y las corrientes de las tres fases muestreadas a 1.6 kHz

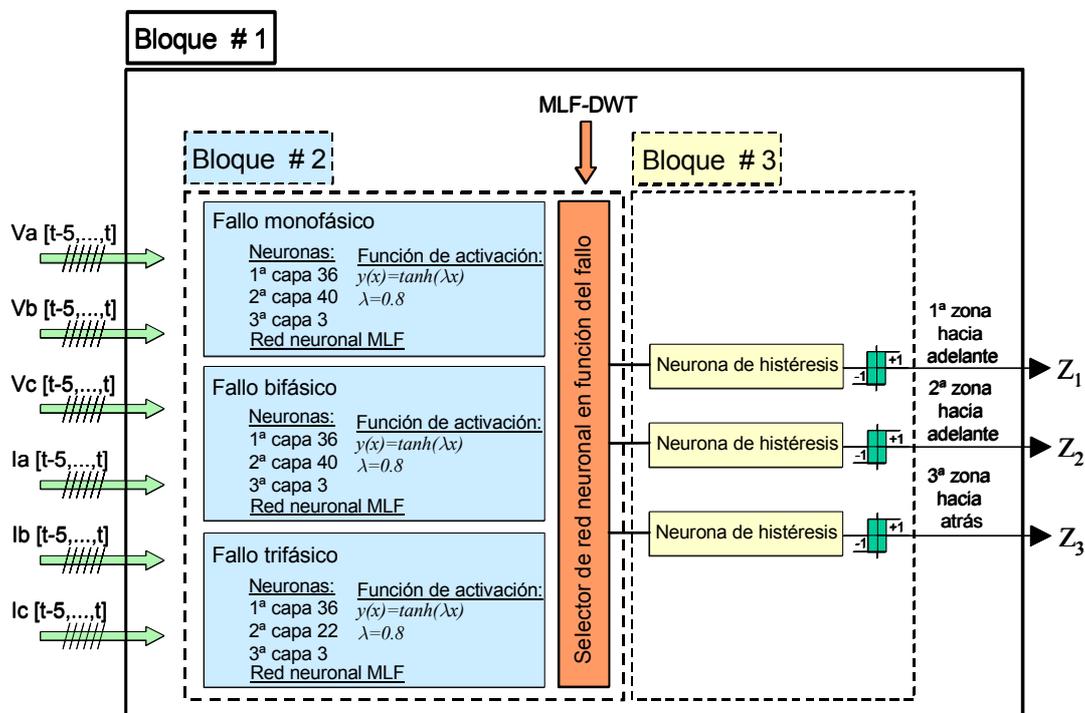


Fig. 7.17 El relé MLF-ZON.

Sus salidas son:

- tres señales de disparo, una para cada zona, Z_1 , Z_2 , y Z_3

b) Bloque #2:

Este bloque contiene el cerebro del relé que está constituido por tres redes neuronales. Cada red está entrenada para determinar la zona del fallo en cada uno de los tres posibles casos: fallo monofásico, bifásico y trifásico. La red a utilizar se selecciona en función de las salidas del relé MLF-DWT.

Las entradas de éste bloque son:

- los valores instantáneos de las tres tensiones fase a tierra, muestreadas a 1.6 kHz, normalizadas por 120 V y recortadas a +1 y -1,
- los valores instantáneos de las tres corrientes de línea, muestreadas a 1.6 kHz, normalizadas por 4,5 y también por 3 veces el valor eficaz de la corriente nominal de la línea y recortadas a +1 y -1,
- las salidas de las señales A, B y C del relé de detección, que son utilizadas para seleccionar el módulo adecuado en función del fallo,

C) Bloque # 3:

Este bloque contiene:

- tres neuronas de histéresis, una para cada salida de las distintas zonas del relé que sirven para estabilizar sus salidas,

Tabla 7.4 Designación y valores de las salidas para distintas zonas del relé MLF-ZON.

Designación de las salidas	Valores de las salidas del relé MLF-ZON		
	Primera zona	Segunda zona	Tercera zona
Z1	+1	-1	-1
Z2	-1	+1	-1
Z3	-1	-1	+1

Como se ha explicado anteriormente, se necesitan tres redes neuronales por cada relé para determinar las zonas de fallo, y cuando se produce un fallo hay que elegir una de ellas para detectar precisamente la zona del fallo. Esto se hace acoplado el relé MLF-DWT con los tres relés MLF-ZON a través un circuito lógico para elegir la red adecuada. Este circuito lógico procesa las salidas A, B y C del relé MLF-DWT para tener tres señales ANNS1, ANNS2 y ANNS3 (“ANN Select”). Dependiendo del tipo de fallo sólo una de estas tres señales será +1 y el resto 0. La figura 7.18 muestra el conjunto de los relés MLF-DWT, el circuito lógico y los relés MLF-ZON.

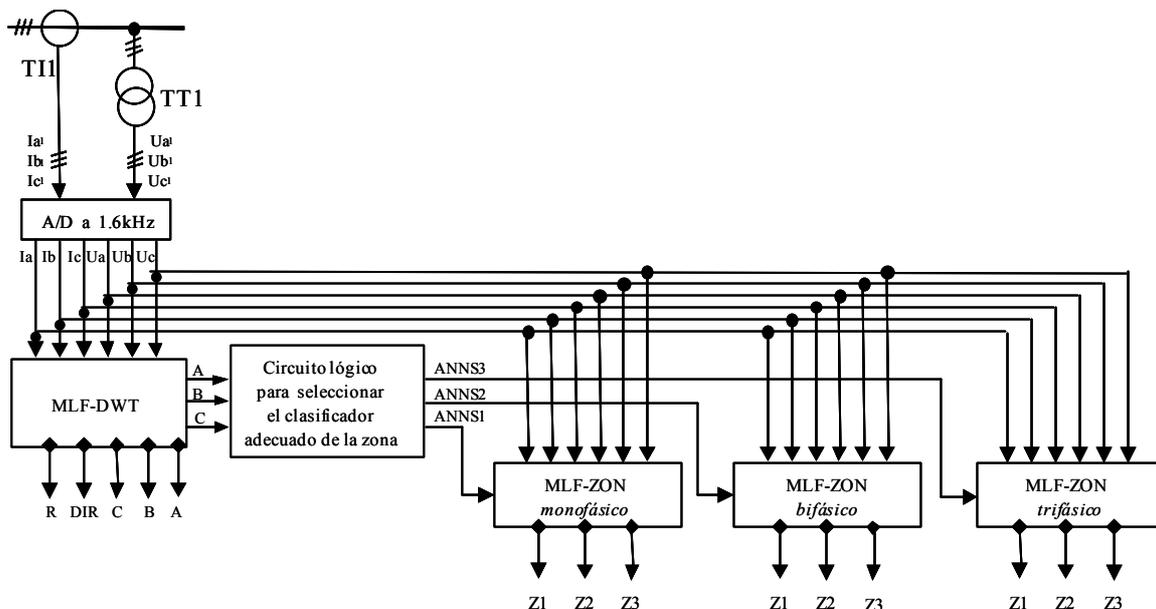


Fig. 7.18 El conjunto del relé de distancia de tres zonas (MLF-DWT+MLF-ZON).

7.7 Entrenamiento del relé MLF-ZON

En el proceso del entrenamiento, del relé MLF-ZON se incluyen sólo patrones de después del fallo. El relé MLF-ZON se ha entrenado para tener como primera zona el 100% de la línea a proteger, la segunda zona es el resto de la red mas allá de la primera zona y la tercera zona cubre toda la zona detrás del relé. En la figura 7.19 se presentan los intervalos temporales de los patrones del entrenamiento y del test.

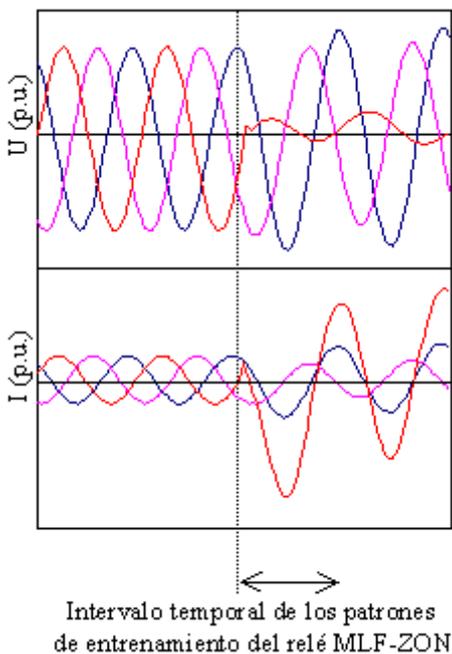


Fig. 7.19 Intervalos de tiempo usadas en el entrenamiento del relé MLF-ZON.

7.8 Comportamiento del relé MLF-ZON

Tal como en el anterior, los patrones utilizados para el ensayo son distintos de los usados en los entrenamientos. La prueba de este relé se realiza teniendo en cuenta las características que se han comentado para el relé de zona. En este caso ha sido entrenado para unas condiciones específicas de topología, potencia de cortocircuito y parámetros de la línea. El circuito elegido ha sido el que se muestra en la figura 7.22 y más concretamente la línea TL3. Aún así se ha tratado que el relé pueda aplicarse en condiciones que admitan variaciones de la potencia de cortocircuito con una buena respuesta. En el apéndice B se encuentran más ejemplos de la respuesta del relé. Cuando la potencia de cortocircuito del sistema difiere en gran medida de las condiciones nominales la respuesta del relé pierde fiabilidad.

Otro comportamiento que se analizará durante esta investigación es el efecto del proceso de reenganche sobre el rendimiento del conjunto de los relés de distancia. La figura 7.20 presenta un diagrama de flujo que describe el proceso de funcionamiento de relé y como detecta si el fallo se ha despejado o no. Hemos diseñado este proceso para obviar los problemas de estabilidad y los errores que aparecen durante un cierto tiempo como secuencia de la inestabilidad en las tensiones y las corrientes de la línea a causa de no tener este caso en el entrenamiento.

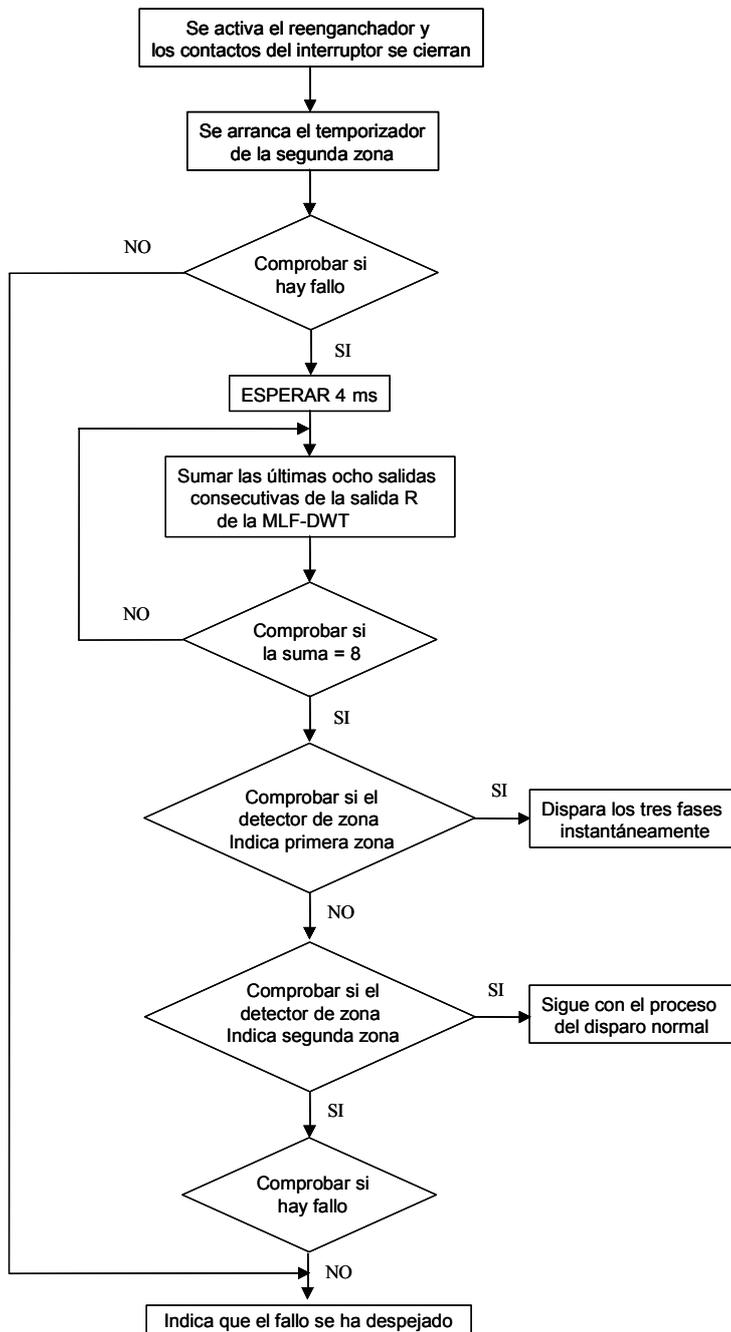


Fig. 7.20 Diagrama de flujo para detectar la situación después del cierre del reenganchador.

Además, se ha observado que siempre hay un grado de incertidumbre en función del tipo de fallo y tanto mayor cuando este ocurre está muy cerca a los límites de la primera zona lo que produce una respuesta oscilatoria del relé. Para resolver el problema, hemos fijado unos criterios para definir las zonas basados en la utilización de dos contadores, que tienen en cuenta el número de oscilaciones para definir correctamente la zona del fallo. La forma en que se aplican estos criterios está explicada en el diagrama de flujo de la figura 7.21.

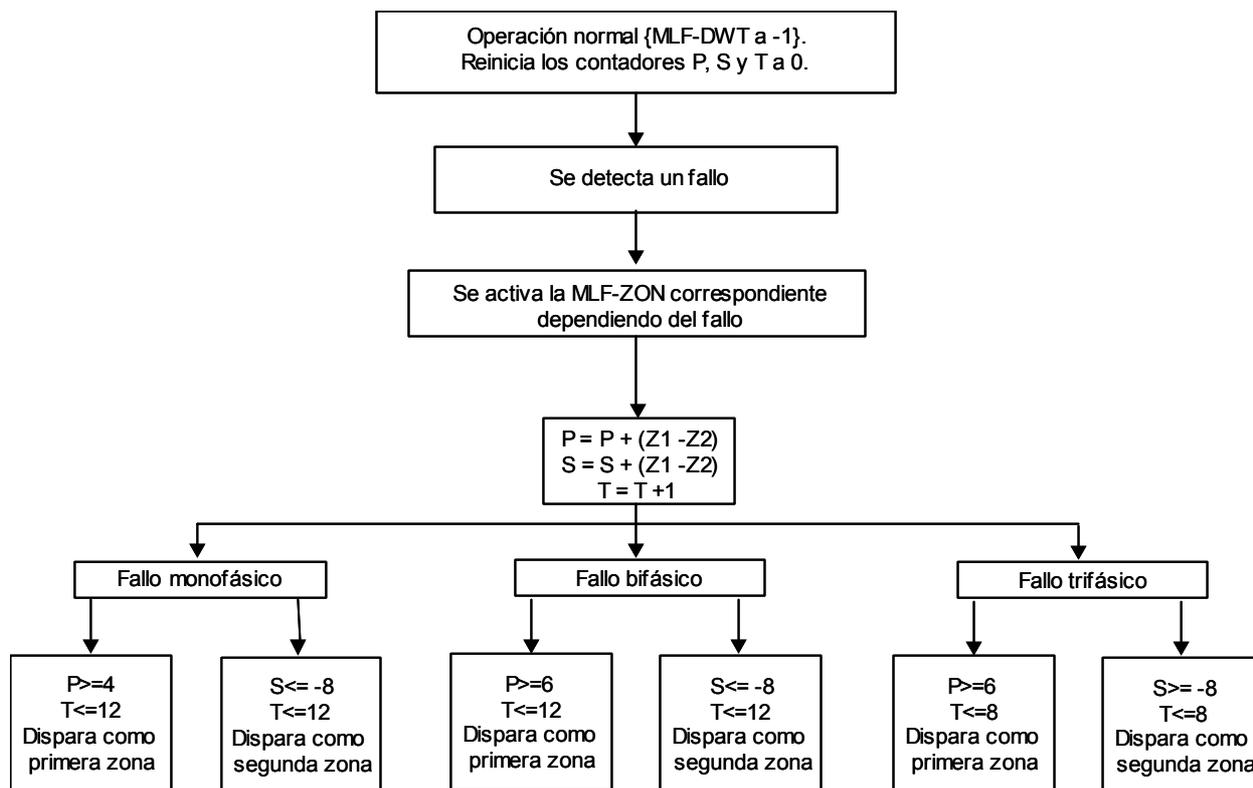


Fig. 7.21 Diagrama de flujo para definir la zona del fallo.

Para analizar el rendimiento del relé MLF-ZON se han elegido tres casos diferentes para el encargado de la protección de la línea TL3 del sistema eléctrico mostrado en la figura 7.22.

Caso 1:

Un fallo franco monofásico de la fase *A* a tierra a una distancia de 22 km hacia atrás del relé 30. El fallo se disipa tras la apertura de la fase implicada. En la figura 7.22 se han presentado el fallo y el proceso de reenganche.

Se ven las siguientes salidas del relé MLF-DWT:

- los detectores de las tres fases *A*, *B* y *C*,
- la dirección del fallo DIR
- el detector de subtensión/subintensidad para reenganche R
- también se ven las salidas Z1, Z2 y Z3 del relé MLF-ZON, que corresponden a la primera, segunda y tercera zona de fallo respectivamente.

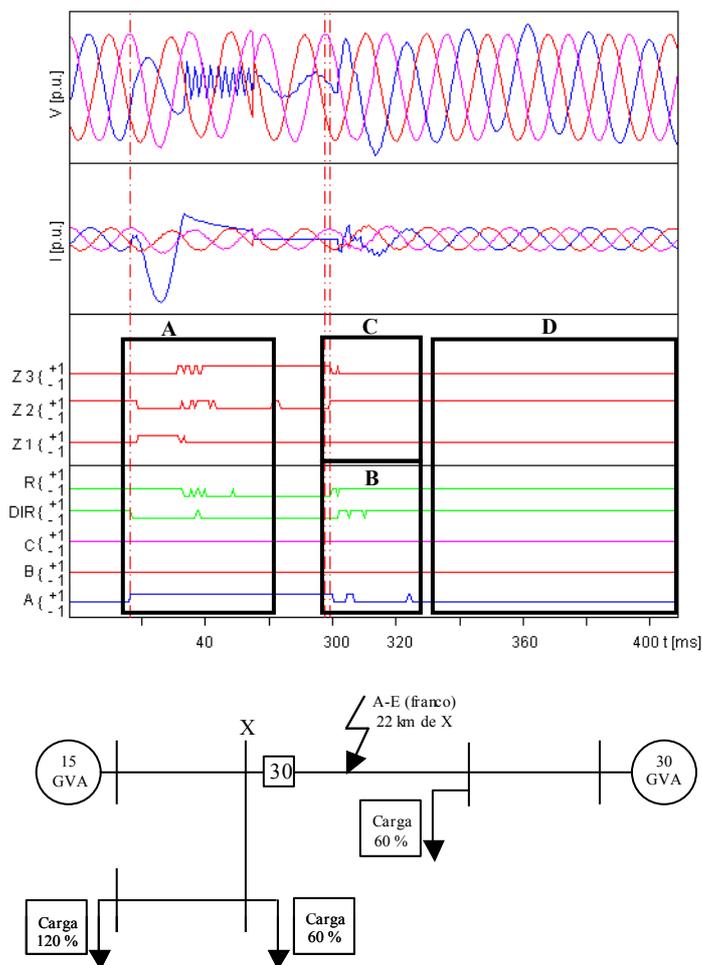


Fig. 7.22 Respuestas del relé MLF-DWT + MLF-ZON ubicado en el punto 30 para un fallo de la fase A y tierra a una distancia del relé de 22 km hacia adelante.

El comportamiento del relé se puede explicar de la siguiente manera:

- a- Las salidas *A*, *B* y *C* están a -1 , indicando ausencia de fallo. Se inicia un fallo franco de la fase *A* a tierra, y la salida *A* se pone a $+1$ indicando que hay un fallo en la fase *A* (cuadro A). La salida *DIR* se pone a -1 , indicando fallo hacia atrás. En el mismo instante, la salida *Z1* del relé MLF-ZON se pone a $+1$, indicando fallo de primera zona.
- b- Los interruptores de los dos extremos de la línea abren la fase *A* para despejar el fallo. Cuando la corriente de la fase *A* se anula y hay subtensión (fase *A* de la línea TL1 abierta por los dos extremos), las salida *R* se pone a -1 . Las salidas *B* y *C* siguen en -1 .
- c- Después de 300 ms de la iniciación del fallo, se comienza el proceso del reenganche (cuadros B y C). Se inicia el temporizador de segunda zona. Las salidas *DIR* y *R* oscilan unos instantes antes de ponerse de nuevo a $+1$, indicando el restablecimiento del flujo de potencia (cuadro B). Las salidas de zona 1 se pone a -1 , indicando que no hay ningún problema en la zona de protección (cuadro C); análogamente la salida de la fase *A* pasa a -1 , (cuadro C), indicando que el fallo se ha disipado.

d- Por último, todas las salidas del conjunto pasan a tomar respectivamente los valores que tenían antes de producirse el fallo (cuadro D).

Caso 2:

Un fallo franco monofásico de la fase *A* a tierra a una distancia de 22 km hacia atrás del relé 30. El fallo no se disipa tras la apertura de la fase implicada. En la figura 7.23 se han presentado el fallo y el proceso de reenganche.

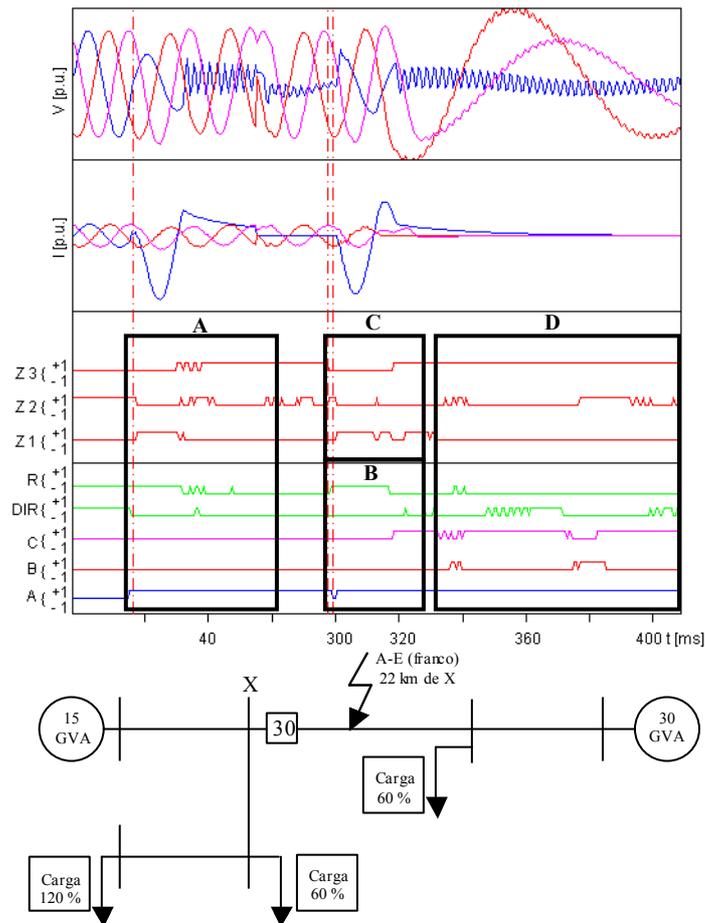


Fig. 7.23 Respuesta del relé MLF-DWT+MLF-ZON ubicado en el punto 30 para un reenganche monofásico sobre un fallo permanente monofásico.

El comportamiento del relé se puede explicar de la siguiente manera:

- a- Al comienzo las salidas *A*, *B* y *C* están a -1 , indicando ausencia de fallo. Después de 3 ms del inicio de un fallo franco de la fase *A* a tierra, la salida *A* se pone a $+1$ indicando que hay un fallo en la fase *A* (cuadro A). La salida *DIR* se pone a -1 , indicando fallo hacia atrás. En el mismo instante, la salida *Z1* del relé MLF-ZON se pone a $+1$,

indicando fallo de primera zona. El relé manda una señal de aceleración al relé 32 que está ubicado en el otro extremo de la línea.

- b- Los interruptores de los dos extremos de la línea abren la fase *A* para despejar el fallo. Cuando la corriente de la fase *A* se anula y hay subtensión (fase *A* de la línea TL1 abierta por los dos extremos), las salida R se pone a -1 . Las salidas *B* y *C* siguen en -1 .
- c- Después de 300 ms de la iniciación del fallo, se comienza el proceso del reenganche (cuadros B y C). Se inicia el temporizador de segunda zona. Las salida R oscila unos instantes antes de ponerse de nuevo a $+1$, indicando el restablecimiento del flujo de potencia, pero la salida DIR se mantiene a -1 , indicando que hay inversión de flujo, y por tanto, en este caso que se mantiene el fallo (cuadro B). Las salidas de zona 1 se pone a $+1$, indicando que hay un problema en la zona de protección (cuadro C); análogamente la salida de la fase *A* se mantiene a $+1$, (cuadro C), indicando que el fallo no se ha disipado.
- d- Se produce entonces la apertura de las tres fases. Las salidas de detección pasan a $+1$, y la salida R a -1 indicando que se ha cortado el flujo de potencia por la línea (cuadro D).

Caso 3:

Un fallo franco monofásico de la fase *A* a tierra a una distancia de 220 km hacia atrás del relé 30, intencionadamente en segunda zona y a una gran distancia. El fallo no se disipa tras la apertura de la fase implicada. En la figura 7.24 se han presentado el fallo y el proceso de reenganche.

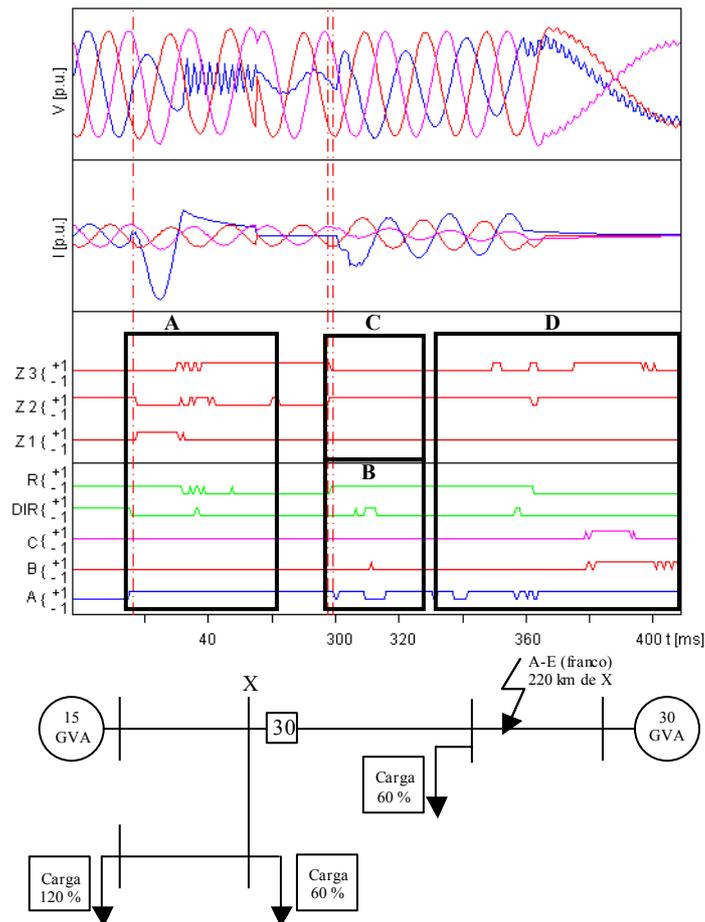


Fig. 7.24 Respuesta del relé MLF-DWT+MLF-ZON ubicado en el punto 30 para un reenganche monofásico sobre un fallo permanente monofásico en segunda zona.

El comportamiento del relé se puede explicar de la siguiente manera:

- a- Al comienzo las salidas *A*, *B* y *C* están a -1 , indicando ausencia de fallo. Después de 3 ms del inicio de un fallo franco de la fase *A* y tierra, la salida *A* se pone a $+1$ indicando que hay un fallo en la fase *A* (cuadro A). La salida *DIR* se pone a -1 , indicando fallo hacia atrás. En el mismo instante, la salida *Z1* del relé MLF-ZON se pone a $+1$, indicando fallo de primera zona. El relé manda una señal de aceleración al relé 32 que está ubicado en el otro extremo de la línea.
- b- Los interruptores de los dos extremos de la línea abren la fase *A* para despejar el fallo (discordancia). Cuando la corriente de la fase *A* se anula y hay subtensión (fase *A* de la línea TL1 abierta por los dos extremos), las salida *R* se pone a -1 . Las salidas *B* y *C* siguen en -1 y hay que vigilarlas para ver si se produce un fallo simultáneo de las fases *B* y *C*.

- c- Después de 300 ms de la iniciación del fallo, se comienza el proceso del reenganche (cuadros B y C). Se inicia el temporizador de segunda zona. La salida R oscila unos instantes antes de ponerse de nuevo a +1, indicando el restablecimiento del flujo de potencia, pero la salida DIR se mantiene a -1, indicando que hay inversión de flujo, y por tanto, en este caso que se mantiene el fallo (cuadro B). La salida de zona 1 se pone a -1, indicando que el problema no está en la zona de protección, pero sí se pone a +1 la salida de segunda zona (cuadro C); análogamente la salida de la fase A se mantiene a +1, (cuadro C), indicando que el fallo no se ha disipado.
- d- Una vez que se ha agotado el tiempo de espera para que el fallo sea disipado por los relés aguas arriba, establecido en el temporizador de segunda zona, se produce entonces la apertura de las tres fases. Las salidas de detección pasan a +1, y la salida R a -1 indicando que se ha cortado el flujo de potencia por la línea (cuadro D).

7.9 Tiempos de respuesta del relé MLF-ZON

Los tiempos de respuesta del relé MLF-ZON se presentan estadísticamente en las figuras 7.25 a 7.27. El entrenamiento del relé se ha hecho tratando de ajustar al máximo la primera zona, de tal forma que cubra el 100% de la línea a proteger. A pesar de ello, queda una pequeña zona hacia el final de la línea que es considerada ya como segunda zona. Para evitar este problema de subalcance, el relé del otro extremo de la línea verá el fallo en primera zona, y a través de la comunicación entre ellos, queda determinada sin error la zona del fallo. Además aparecen unas oscilaciones entre la primera y segunda zona hacia el final de la línea, provocando una incertidumbre en la definición de la zona en que ocurre el fallo. Para evitar el problema que suponen, se aplica el algoritmo de la figura 7.21 que asegura la zona del fallo. Debido a ello las respuestas de la primera y segunda zona tienen un tiempo de retardo que depende de la distancia al punto del fallo. En cambio, la respuesta en tercera zona es directa e inmediata desde la salida de la red neuronal.

Además se aprecia que la zona de incertidumbre entre la primera y segunda zona aumenta por la existencia del arco. El rango de esta zona se reduce cuando se disminuye el nivel de la tensión del arco, decantándose la respuesta hacia la primera zona. En el anexo B, las figuras B.1 y B.3 muestra un fallo franco y con arco para un mismo circuito, donde se aprecia este fenómeno.

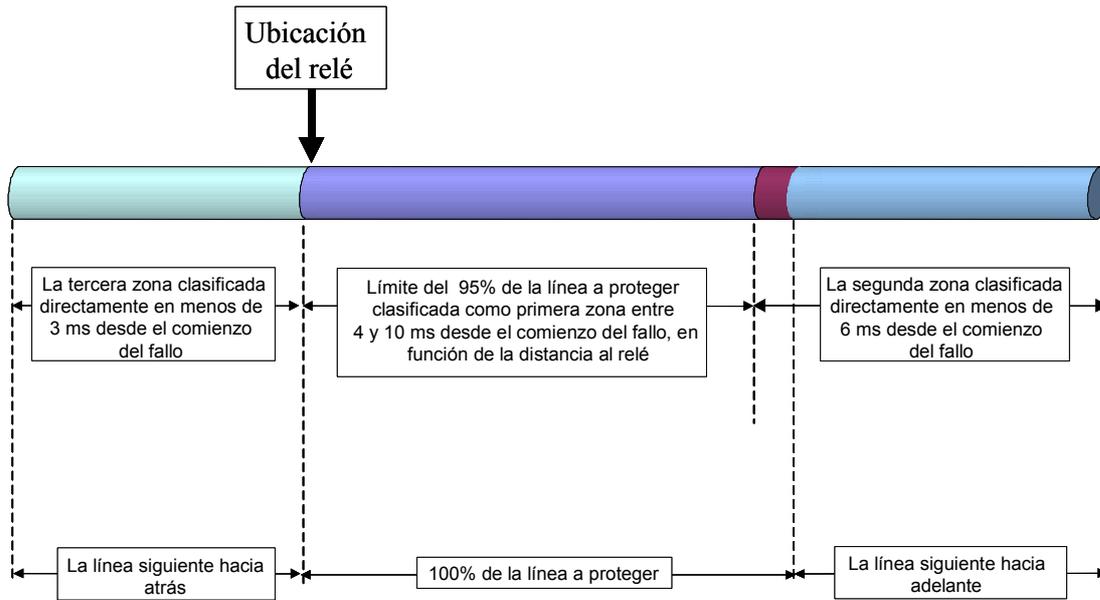


Fig. 7.25 Comportamiento del relé MLF-ZON para fallos monofásicos en sistemas radiales simples.

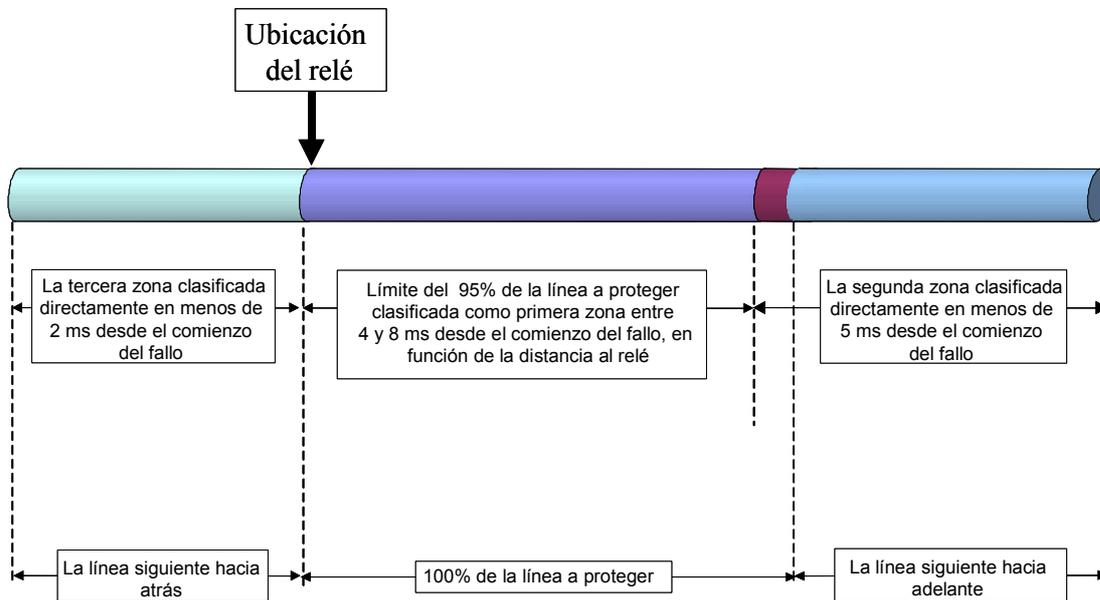


Fig. 7.26 El comportamiento del relé MLF-ZON para fallos bifásicos en sistemas radiales simples.

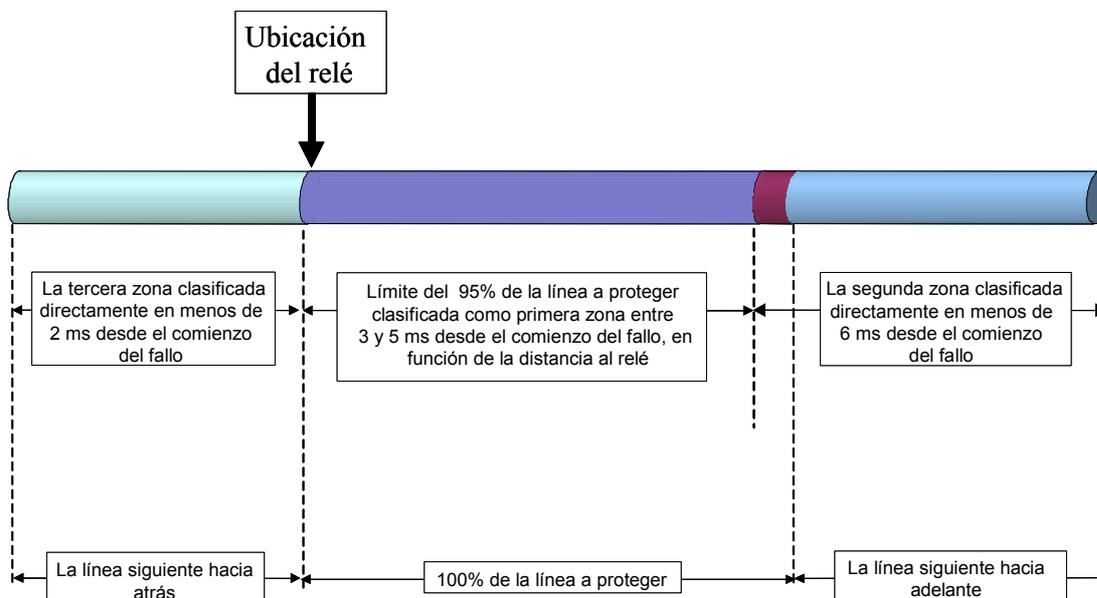


Fig.7.27 El comportamiento del relé MLF-ZON para fallos entre trifásicos en sistemas radiales simples.

7.10 Conclusiones

El ajuste del relé de zona depende de la topología del circuito, potencia de cortocircuito, etc. Por ello, cada ajuste se ha de realizar en función de los parámetros relativos a cada situación. En este caso se ha utilizado la línea TL3 del sistema de potencia utilizado en esta investigación por ser la de carácter más general, ya que incluye alimentación por ambos extremos así como líneas adyacentes a la misma. La respuesta de la red neuronal es muy buena en todos los casos, presentándose unas oscilaciones en el final de la línea a proteger que provocan una región de incertidumbre. Para resolverlo se aplica un algoritmo, figura 7.21, para obtener una salida segura cuyo empleo provoca un pequeño retardo en el tiempo de respuesta, que es mayor cuanto más alejado es el fallo respecto a la posición de relé. Otros algoritmos emplean un criterio parecido [38] con una ligera modificación para obtener una respuesta más rápida en los fallos próximos al relé. Sin embargo, tienen un mayor retardo en los fallos más alejados. Aquí se ha optado por un criterio único para toda la primera zona de protección, lo que lleva a tiempos mayores en fallos cercanos pero más cortos para los que ocurren al final de la línea donde se dan las oscilaciones en la respuesta de la red. En cualquier caso, hay que tener en cuenta que la protección está basada en la existencia de una comunicación entre ambos relés lo que asegura la respuesta de la protección y evita esa indeterminación en los finales de línea, porque lo que para un relé será el final de la línea para el otro será su parte más cercana y no habrá lugar a dudas en la posición del fallo, figura 7.27. También destacar la reubicación de la tercera zona, que se sitúa fuera de la zona de protección en la siguiente línea hacia atrás.

La determinación de esta zona por la red neuronal se hace de forma directa lo que permite una respuesta muy rápida. De hecho, con éste criterio podría realizarse la función de protección de forma segura, teniendo en cuenta que cuando el fallo se produce fuera de la línea a proteger lo harán en la tercera zona de uno de los relés. Sin embargo obliga a que cada relé, ubicados en el inicio y el final de la línea se han de entrenar específicamente para saber discriminarla correctamente, lo que puede dar lugar a un comportamiento y un ajuste un poco diferente. Esto se ha de estudiar para cada caso en particular.

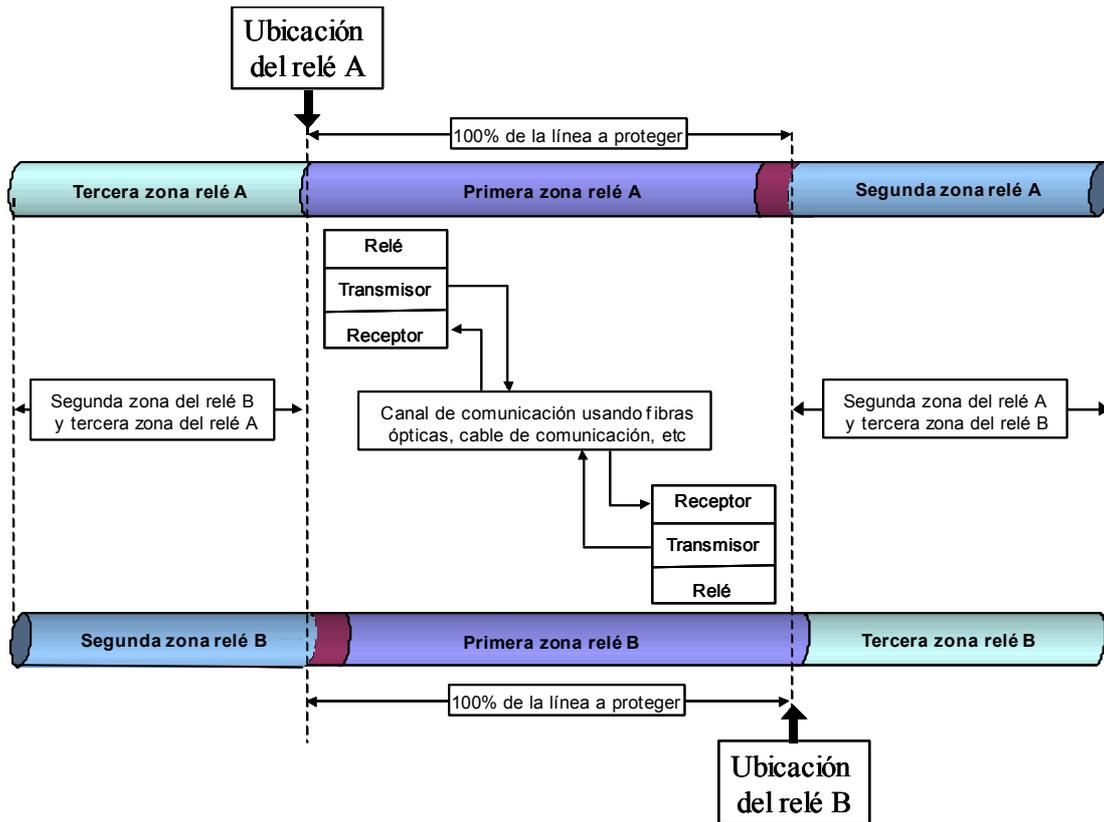


Fig. 7.28 Coordinación entre relés para completar la tarea de protección.

Las figuras del apéndice B muestran más resultados de la respuesta de la red neuronal correspondiente a la protección de zonas, donde se aprecian los comentarios realizados.

Capítulo 8 Implementación y test de laboratorio del relé

8.1 Introducción

En los capítulos anteriores se ha expuesto la metodología y diseño del relé de protección basado en redes neuronales. Sus principales características y comportamiento mediante simulación. Sin embargo, uno de los objetivos de este trabajo era realizar la implementación práctica del diseño realizado en un sistema electrónico que permitiera comprobar la eficacia del mismo.

Las redes neuronales durante la operación normal de propagación hacia adelante usan sólo dos operaciones matemáticas, la suma y la multiplicación, y las funciones sigmoideas. Cada neurona puede tener sus propios parámetros de la función sigmoidea. En este trabajo, las redes neuronales se entrenaron teniendo en cuenta que las neuronas en cada capa deben tener los mismos parámetros para facilitar la implementación de la misma. La implementación de las redes neuronales se hace de diferentes maneras:

- a) Mediante una tarjeta DSP (“Digital Signal Processing”) [50] grabando la función sigmoidea en una EPROM. Este tipo tiene como aspecto negativo el elevado tiempo de respuesta de la red, especialmente si se trata de una red grande. Para solucionar este problema, se puede implementar la red neuronal usando una tarjeta DSP por cada capa, especialmente cuando cada capa tiene su propia función de activación.
- b) Usando tarjetas de redes neuronales que usan neuroprocesadores como la SAND y la SIOP [51,52]. En la tarjeta SAND una capa oculta puede tener hasta 512 neuronas y la función de activación hay que almacenarla en una EPROM y tiene que ser la misma para toda la red. La tarjeta SAND está diseñada para implementar las redes neuronales MFANN, RBF y Kohonen. En la tarjeta SIOP su capacidad esta limitada y la función

sigmoidea esta implementada en la misma tarjeta y es la misma para toda la red. La tarjeta SIOP tiene un tiempo total de propagación de 2,52 μ s y con ella se pueden implementar las redes MFANN y las redes recurrentes.

c) Usando matrices de microprocesadores. En este caso, el tiempo de propagación se puede disminuir mucho poniendo un microprocesador por cada neurona y poniendo una EPROM por cada micro que contenga la tabla de la función sigmoidea por cada micro y otra para las matrices de los pesos. Esta configuración tiene la ventaja de ser de respuesta muy rápida y de cumplirse la idea básica de las redes neuronales, el procesamiento en paralelo de la señal. Otra configuración de este tipo de implementación es poner una matriz de una sola columna de microprocesadores cuyo número sea igual al mayor número de neuronas en cualquier capa y en cada paso del proceso de propagación, esta columna emula una capa concreta de la red neuronal u otras configuraciones implementadas en tarjetas de altas prestaciones[96].

En la literatura se encuentran algunos trabajos previos donde se ha llevado a cabo la implementación mediante DSP de redes neuronales [53] o con un diseño electrónico específico [97]. La primera de las opciones es la más asequible económicamente y es la que se ha elegido. Asimismo, para llevar a cabo el montaje experimental se necesitaba un sistema que permitiera simular los sistemas eléctricos similares a los empleados en el proceso de diseño y entrenamiento del relé.

El Departamento de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Bath cuenta con el equipo RTDS, que constituye el complemento del sistema de simulación PSCAD, con el que es posible llevar a cabo la simulación y ensayo de prototipos de equipos eléctricos. Bajo la dirección del Prof. Aggarwall se llevó a cabo las pruebas de laboratorio del relé neuronal.

8.2 Sistema empleado en la simulación. RTDS

El RTDS[®] (Real Time Digital Simulators) es un simulador que de transitorios electromagnéticos en tiempo real que utiliza el algoritmo de Dommel. El RTDS es usado para:

- llevar a cabo simulaciones analíticas de sistemas de potencia
- realizar test en relés de protección
- realizar test en sistemas de control
- educación y entrenamiento

El sistema opera en tiempo real y ha sido creado específicamente para simular en tiempo real sistemas eléctricos de potencia, utilizando avanzadas tecnologías de hardware y software. Así es posible evaluar y adecuadamente nuevos modelos. Para hacer esta tarea, el corazón del equipo son las tarjetas electrónicas con tres procesadores, (Triple Processor Card) figura 8.1, que se emplean para realizar los cálculos necesarios en el modelo del sistema eléctrico. Cada tarjeta es idéntica y ninguna de ellas es usada especialmente para modelar un componente en concreto del sistema en estudio.

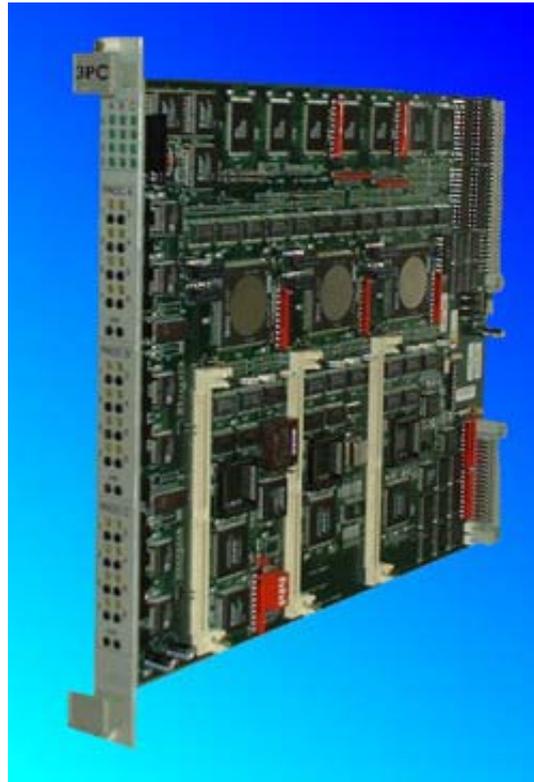


Fig. 8.1 Tarjeta que emplea el RTDS para calcular las simulaciones.

Cada una de estas tarjetas dispone de:

- Cada tarjeta tiene tres procesadores digitales ADSP21062 (SHARC)
- 24 canales de salida analógicos, +/- 10 V pico
- 2 entradas digitales de 16 bits, 5 V
- 2 salidas digitales de 16 bits, 5 V

El equipo cuenta también con unos amplificadores que pueden ser conectados a través de los canales de 16 bits para suministrar voltajes y corrientes trifásicos, de hasta 300 V y 35 A rms.

El diseño de los circuitos del usuario y la comunicación con el equipo de hardware se realiza mediante un programa en UNIX, en el que mediante un “Draft” o pantalla gráfica se dibuja el circuito (figura 8.2).

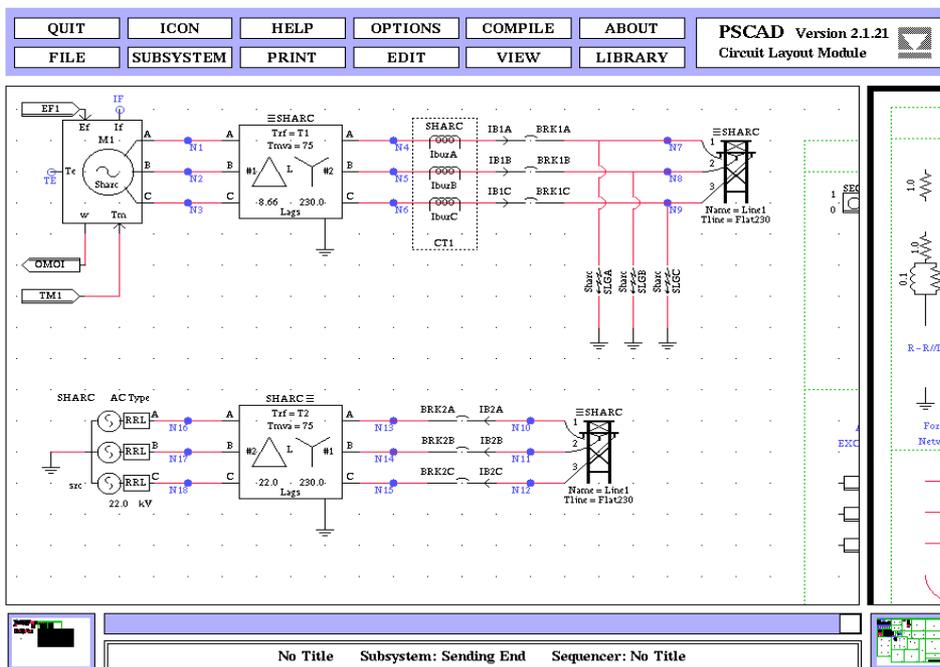


Fig. 8.2 Ventana del software de simulación del RTDS.

Una vez realizado el diseño se transfiere y ejecuta mediante el “Runtime”, figura 8.3.

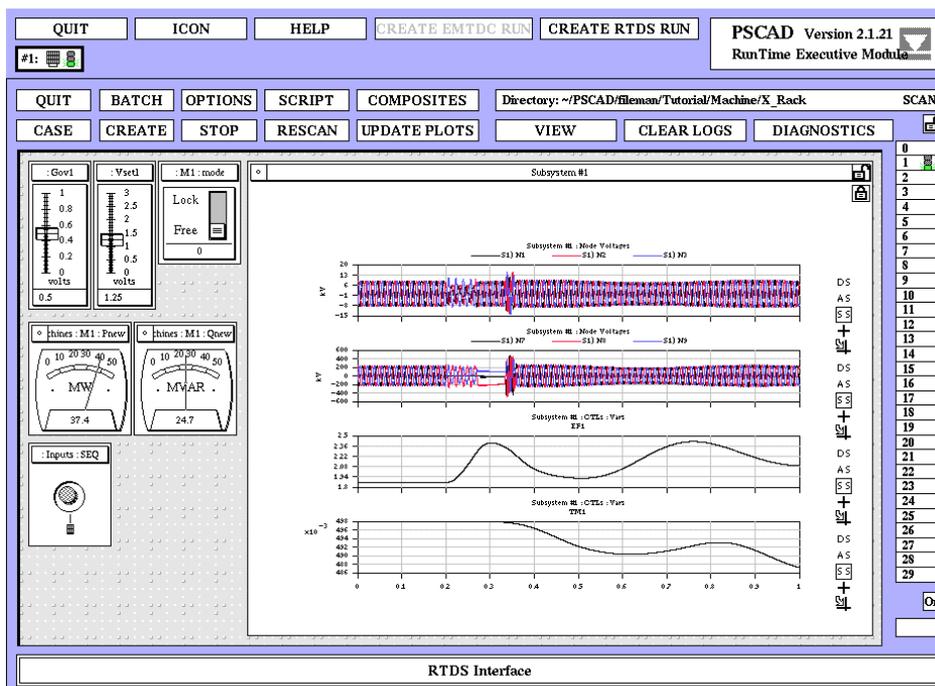


Fig.8.3 Ventana del software de comunicación con el RTDS.

8.3 DSP empleada

El desarrollo de la red neuronal y sus algoritmos se realizó en una tarjeta de procesamiento digital de señales (DSP). La tarjeta contiene un chip TMS320C32 de Texas Instruments instalada en un PC con el correspondiente software de diseño.

Con la tarjeta instalada en el PC, y con el software necesario para la misma y para el PC, se cargaban los programas correspondientes en ambos para ejecutar los algoritmos. Para una frecuencia de muestreo fue de 1.6 kHz, el intervalo de tiempo entre cada nuevo conjunto de valores muestreados es de 0.625 ms, en el cual era resuelto el algoritmo de protección mediante las redes neuronales.

8.4 Resultados experimentales

En los estudios llevados a cabo, se empleó la configuración del relé neuronal expuesta en el capítulo 7, pero con una versión en la que no se incluía la DWT ni la salida “R” para el algoritmo de reenganche, que fueron incorporados más tarde. Debido a ello las redes neuronales tenían una estructura de 36/15/3 neuronas para detección y 36/22/3 neuronas en dirección y 36/30/3 para zona. Aún así, los resultados son muy similares, ya que en las últimas mejoras no afectan a los requisitos básicos con los que había sido entrenado el relé.

Se ha observado en cambio que en algunos casos aparecen oscilaciones que en la simulación no se presentaban. Pueden ser debidas a la resolución del equipo RTDS que emplea salidas digitales de 16 bits mientras que en la simulación por ordenador se trabajó con una representación de los números en coma flotante de 32 bits. Este hecho se puede agravar por el hecho de que las salidas del RTDS se filtran antes de ser muestreadas por la tarjeta y que los pesos de las distintas redes neuronales se transfirieron a la DSP con una precisión de 4 dígitos decimales.

Asimismo la tarjeta tiene una resolución de 32 bits para valores de ± 10 V, lo que conlleva a incrementos de resolución mayores que los valores de simulación (máximos de ± 1 V). Este fenómeno afecta principalmente a la detección de la dirección de la corriente antes del fallo para valores muy pequeños de la misma. Hay que tener en cuenta que en los circuitos de simulación se usaron valores muy pequeños próximos a cero, (del orden de 0.01 A), para com-

probar el buen comportamiento de la red, lo que casi equivale a la resolución de los instrumentos de medida.

Otro efecto que pueden influir es que las redes neuronales correspondientes a la detección y dirección en ausencia de fallo se ejecutan en la propia tarjeta mientras que las redes de dirección y localización se implementan en el PC, que recibe las señales desde la tarjeta.

En las figuras 8.4 a 8.9 se representan los resultados de las medidas experimentales.

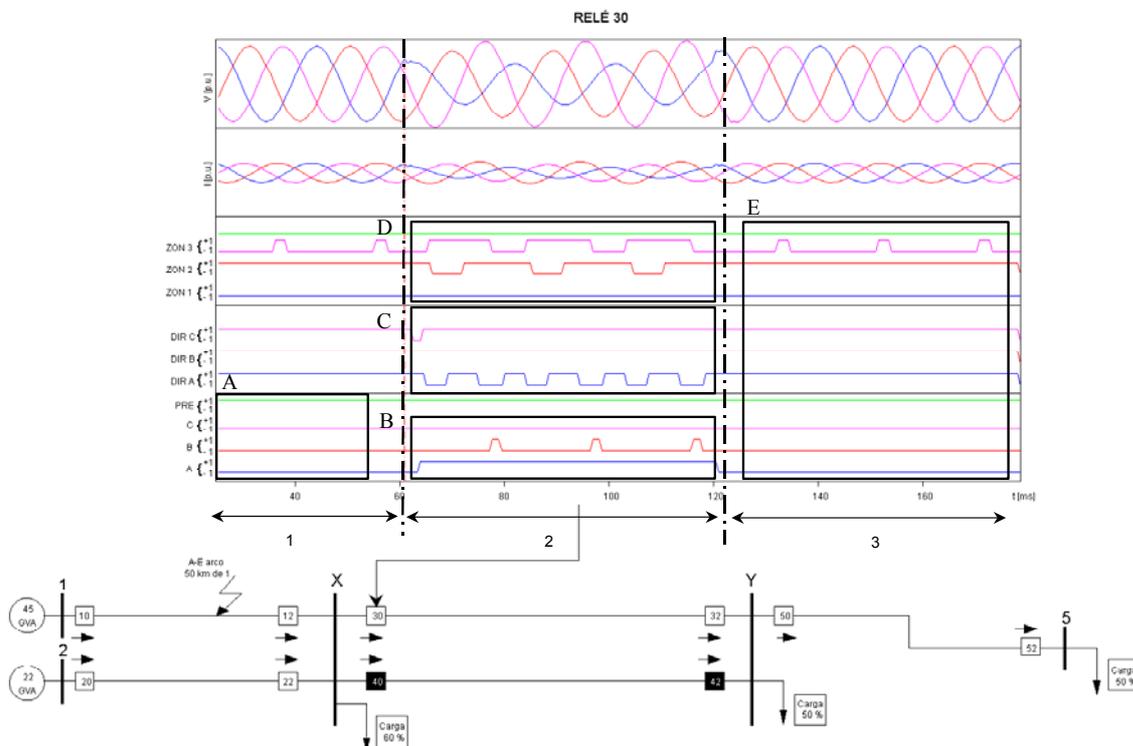


Fig. 8.4 Respuestas del relé MLF-DWT para un fallo de la fase A y tierra y a 50 km de la barra 1.

La figura 8.4 muestra las salidas que se obtenían de la tarjeta. Tres salidas del relé de detección de fallo (A, B y C). Una salida para determinar la dirección del flujo durante la ausencia de fallo, PRE. Tres salidas de dirección del flujo durante el fallo, una por cada fase, DIR A, DIR B y DIR C.

Finalmente tres salidas para la localización del fallo: ZON 1 para definir si el fallo es en primera zona (valor -1 en ausencia de fallo), ZON 2 para fallos en segunda zona (valor 1 en ausencia de fallo) y ZON 3 para fallos en tercera zona (valor -1 en ausencia de fallo). La respuesta del relé se puede explicar como:

Intervalo 1:

En este intervalo, cuadro A, no hay fallo y las salidas del relé de detección *A*, *B* y *C* están -1 indicando que no hay fallo, la dirección del flujo PRE está en $+1$, lo que significa que el flujo es hacia adelante y la las salidas de dirección en $+1$ en cada fase indican flujo hacia adelante. Las salidas para primera zona indican -1 , segunda zona $+1$ y tercera zona -1 (con algunas oscilaciones), que son las salidas en ausencia de fallo.

Intervalo 2:

Al comienzo del intervalo 2, se produce un fallo monofásico a tierra de fase *A* y al final del intervalo la salida *A* del relé se pone en $+1$, (cuadro B). (La salida PRE se mantiene en $+1$ indicando que no hay cambio en la dirección de flujo a pesar de que una vez ocurrido el fallo no se tiene en cuenta).

Debido a que el fallo es detrás del relé, nos encontramos con una situación de subten-sión/subintensidad y la salida DIR A se pone se mantiene en -1 con oscilaciones, (cuadro C). En el cuadro D la salida de fallo en tercera zona ZON 3 cambia correctamente a valor $+1$ puesto que el fallo ocurre en la tercera zona, mientras que la salida que indica fallo en primera zona no es afectada y la segunda zona pasa a -1 , como era de esperar. Tal como se ha comentado aparecen unas oscilaciones a pesar del comportamiento correcto del relé.

Intervalo 3:

En el intervalo 3, el fallo se disipa, (cuadro E). Las salidas del relé de detección vuelven a valor -1 . La salida de dirección sin fallo indica $+1$ y las salidas de dirección durante el fallo, a pesar de que ahora no se tienen en cuenta, indican también que el sentido del flujo es el mismo que antes del fallo. Las salidas del relé de zona vuelven a sus valores antes del fallo.

Las figuras 8.5 a 8.7 se pueden explicar como en el caso anterior.

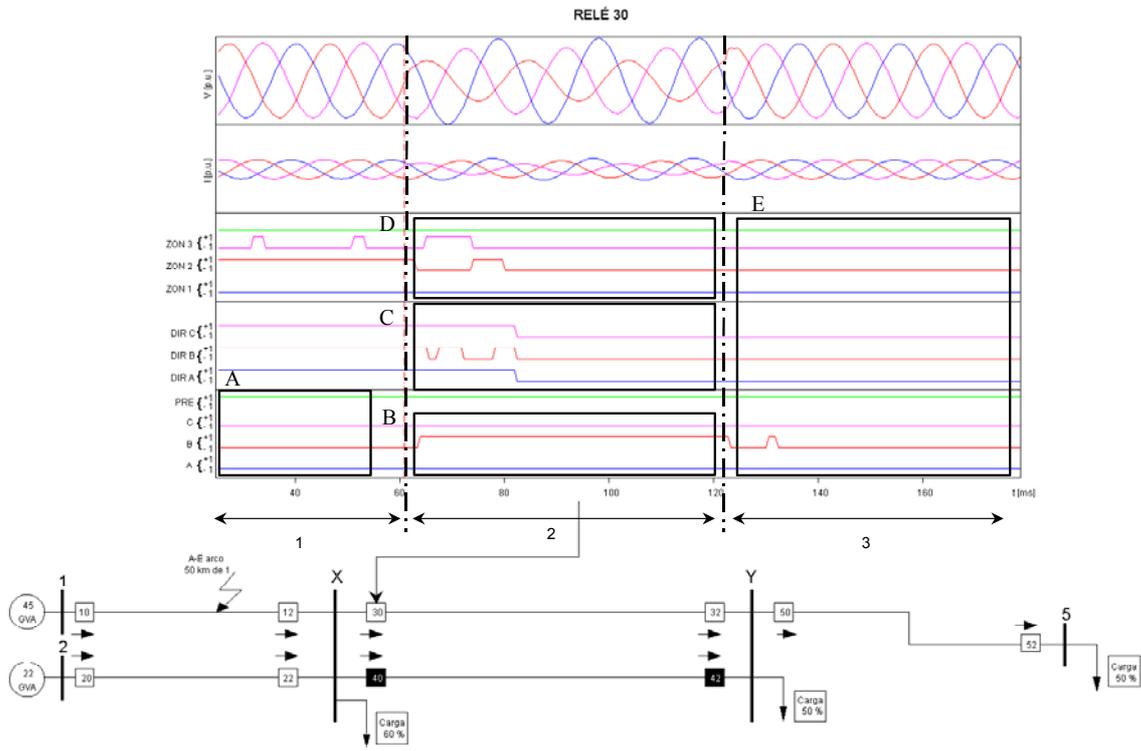


Fig. 8.5 Respuesta del relé MLF-DWT para un fallo de la fase B a tierra y a 50 km de la barra 1.

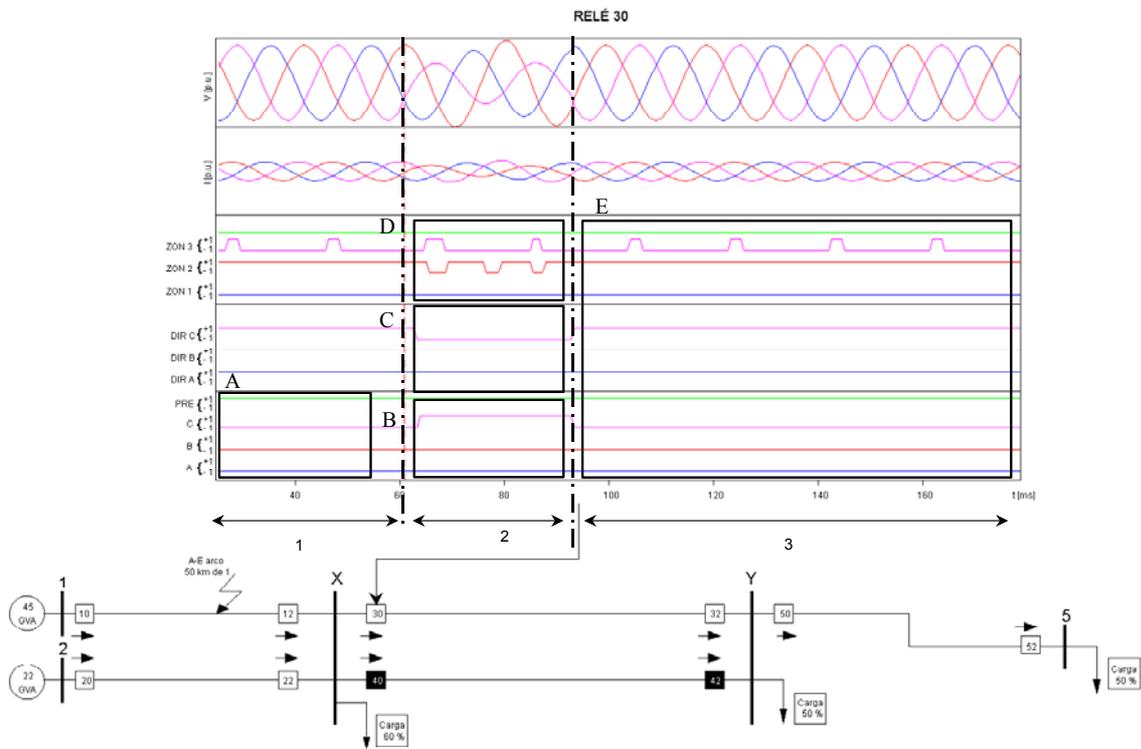


Fig. 8.6 Respuesta del relé MLF-DWT para un fallo de la fase C a tierra y a 50 km de la barra 1

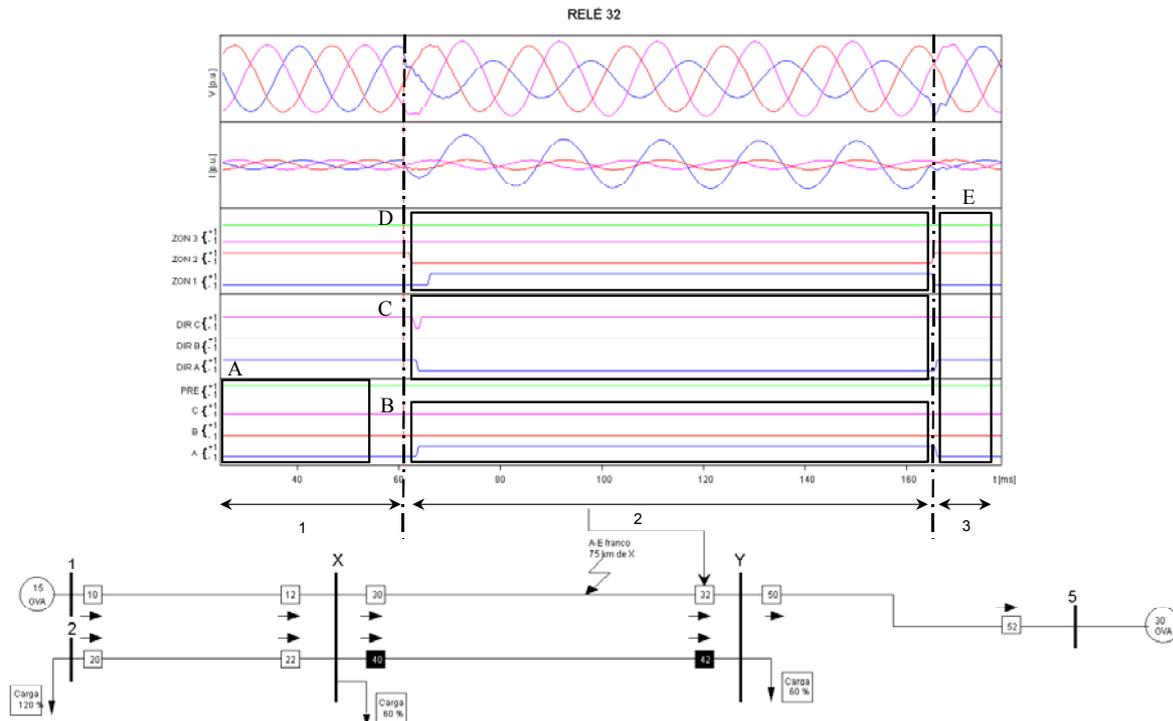


Fig. 8.7 Respuesta del relé MLF-DWT para un fallo monofásico a tierra franco y a 75 km de la barra X.

Las figuras 8.8 a 8.10 muestran más casos de medidas hechas en el laboratorio. Se trata de cortocircuitos bifásicos. En ellos se puede comprobar que la detección es bastante correcta, sin embargo hay oscilaciones en las salidas de la red de dirección en el fallo y la red de localización. Estas oscilaciones tan acusadas no se presentan en las simulaciones por ordenador, y ya se han apuntado anteriormente los posibles orígenes del problema.

Las salidas de dirección, no presentan un problema importante en esta situación, puesto que se pueden solventar haciendo un comparador lógico, de tal forma que la salida final sea común a todas las fases. Es más acusado el problema en las salidas del relé de zona. A continuación se hace una breve explicación de las figuras.

Intervalo 1:

En este intervalo, cuadro A, no hay fallo y las salidas del relé de detección A, B y C están -1 indicando que no hay fallo, la dirección del flujo PRE está en +1, lo que significa que el flujo es hacia adelante y la las salidas de dirección en +1 en cada fase indican flujo hacia adelante. La salida para primera zona indica -1 correctamente, segunda zona +1 y tercera zona -1 y aunque hay oscilaciones tampoco son importantes en ausencia de fallo.

Intervalo 2:

Al comienzo del intervalo 2, se produce un fallo bifásico entre las fases A y B; las salidas A y B del relé se pone en +1, (cuadro B). La salida C se mantiene en -1 con alguna oscilación, aunque debido a que se trata de un fallo bifásico el disparo del relé abrirá las tres fases. Debido a que el fallo es detrás del relé, se produce una situación de inversión de corriente, detectada por las salidas de dirección (cuadro C). En el cuadro D la salida de fallo en tercera zona ZON 3 cambia momentáneamente y de forma incorrecta a valor +1 puesto que el fallo ocurre ahora en la primera zona. La salida que indica fallo en primera zona pasa correctamente a valor +1, pero oscila y no es una respuesta segura.

Intervalo 3:

En el intervalo 3, (cuadro E) el fallo se disipa. Las salidas del relé de detección vuelven a valor -1. La salida de dirección sin fallo indica +1 y las salidas de dirección durante el fallo, a pesar de que ahora no se tienen en cuenta, indican también que el sentido del flujo es el mismo que antes del fallo. Las salidas del relé de zona vuelven a los valores en ausencia de fallo.

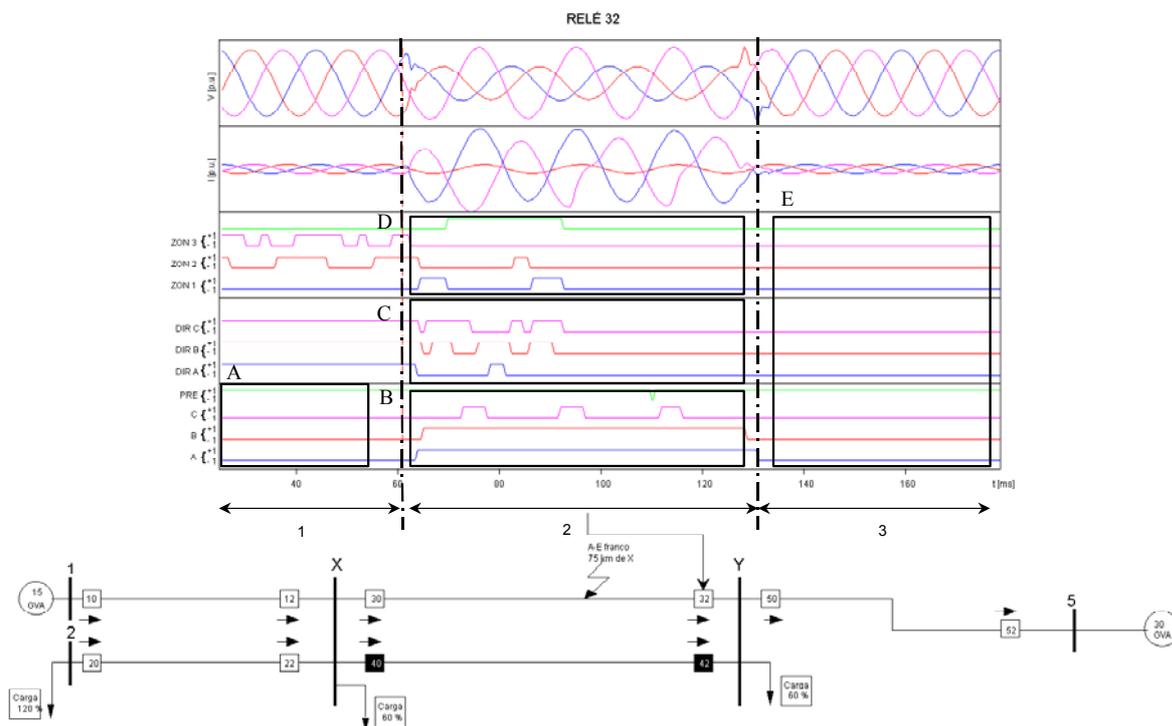


Fig. 8.8 Respuesta del relé MLF-DWT para un fallo bifásico franco en las fases A y B a 75 km de la barra X.

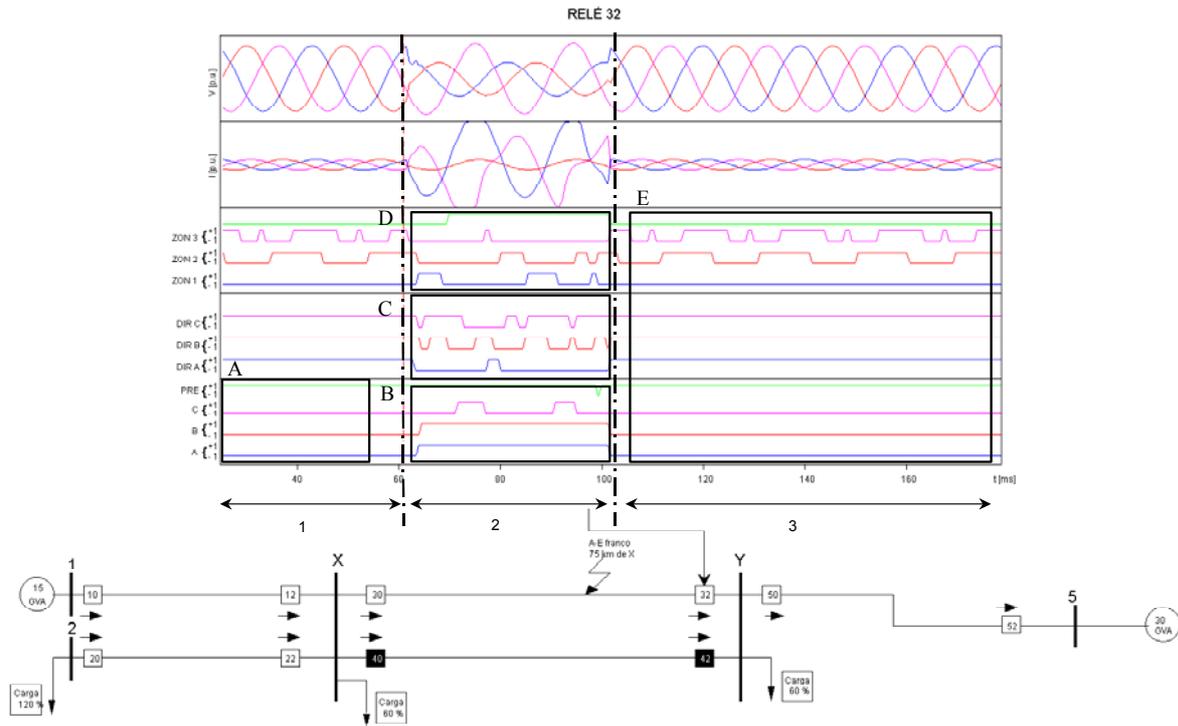


Fig. 8.9 Respuesta del relé MLF-DWT para un fallo bifásico franco en las fases A y B a 75 km de la barra X.

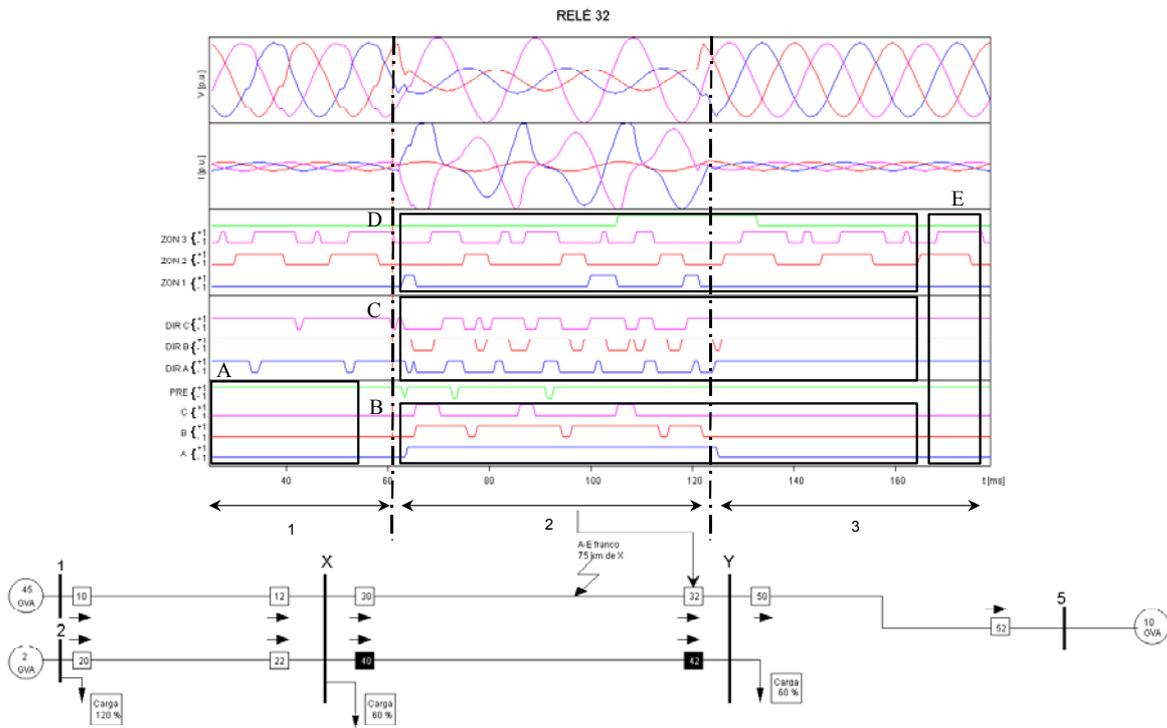


Fig. 8.10 Respuesta del relé MLF-DWT para un fallo bifásico franco en las fases A y B a 75 km de la barra X.

Capítulo 9 Conclusiones y recomendaciones

En esta investigación se ha desarrollado una nueva técnica para la protección de líneas eléctricas de alta tensión basada en redes neuronales artificiales y en la transformada wavelet.

- las redes neuronales se han implementado para realizar las funciones de detección del fallo, determinación de dirección del flujo en ausencia de fallo, estimación de la dirección de fallo y estimación de la zona de fallo para sistemas radiales. El diseño del relé propuesto se ha probado experimentalmente con unos resultados satisfactorios.

El relé MLF-DWT

- El relé MLF-DWT propuesto es un relé inteligente que se ha entrenado globalmente y puede detectar los fallos, estimar las fases afectadas y la dirección de fallo
- La dirección del fallo puede ser estimada incluso en casos de valores de tensión y corriente muy próximos a cero. Esta ventaja es muy útil cuando la línea está alimentada por un sólo extremo y para hacer una protección de respaldo para las barras. Un caso aparte, lo constituye el caso de un fallo en barras muy próximo al relé. En tal situación se tienen unos valores de tensión nulos o muy próximos a cero mientras que la corriente adquiere unos valores elevados. La respuesta del relé es perfecta en el caso de fallos monofásicos. En los casos bifásicos estudiados se presentan problemas si el fallo ocurre en una barra donde están conectadas varias líneas. Esta situación puede subsanarse parcialmente aumentando el número de neuronas del relé para determinar la dirección del fallo. Sin embargo, en caso de fallos trifásicos se observa que la dirección puede ser o no fiable dependiendo de la topología del circuito en donde se en-

cuentre situado el relé. El relé ha sido entrenado para identificar una caída de tensión tan importante como una pérdida de alimentación y por tanto como un fallo hacia atrás, lo que provoca una respuesta errónea de la dirección de aquellos relés cuyo sentido de la corriente se mantenga en la dirección del fallo. Este problema no se presenta en el caso de que el relé esté situado en el final de una línea sin otras conexiones. También hay que decir que estas pruebas se han realizado con datos simulados, lo que lleva a obtener valores de tensión que tras el fallo cambian bruscamente a valores próximos a cero, situación que tampoco es real puesto que habría que considerar la influencia que ejercen los acoplamientos en el punto del relé.

- El relé tiene un buen comportamiento contra la pérdida de datos y contra los ruidos que pueden contaminar las ondas de tensión y corriente sin que sea necesario filtrarlas. En el caso de la pérdida de datos, la relevancia de estos está en función del momento en que se producen y de la importancia de la pérdida. Así, la ausencia de datos durante el funcionamiento normal del sistema, lo que provoca que los valores de entrada sean nulos, la red neuronal tienden a ser identificados como un corte en la alimentación de la línea, dando fallo en la salida. En caso de que esto ocurra durante un fallo, la pérdida de datos tiende a reforzar la respuesta del relé. Se observa también que la respuesta del relé es más sensible a la pérdida de valores en las señales de tensión.
- La respuesta es muy rápida, estando situada en el intervalo de 1.8 a 4.5 ms independientemente de las condiciones del fallo, de la presencia de arco eléctrico y de la saturación de los transformadores de intensidad
- La respuesta en líneas en paralelo es buena. Un caso aparte son las situaciones de fallos de campos cruzados, que no se han estudiado aquí por considerar que presentan unas características conocidas y no se aportaría nada realmente nuevo dentro del estudio. Sería necesario hacer un entrenamiento particular para estos casos e incorporar los pesos obtenidos dentro de la estructura del relé. Estos casos ya han sido estudiados previamente con diferentes tipos de redes neuronales [38,94].
- Se ha incorporado un algoritmo de reenganche que permite realizar la maniobra de forma segura con el relé neuronal mediante la combinación de sus distintas funciones de detección y localización del fallo

- El comportamiento del relé en las pruebas experimentales ha sido muy bueno, respondiendo a las expectativas esperadas. Los alentadores resultados obtenidos son un estímulo para seguir trabajando en la línea de la implementación práctica de las protecciones basadas en esta tecnología, puesto que se han obtenido tiempos de respuesta muy rápidos y gran fiabilidad del equipo propuesto.
- En las pruebas realizadas con el sistema RTDS, no se pudo comprobar los resultados para fallos con arco al carecer del modelo para aplicarlo. Este modelo, puede ser implementado por el usuario, pero no estaba programado en ésta máquina.
- Hay que indicar también que no se han investigado los fallos simultáneos para sistemas de líneas dobles con campos cruzados ("cross-country").

El relé MLF-ZON

- La respuesta del relé se produce en intervalos de 4 a 10 ms desde el comienzo del fallo. Hay que tener en cuenta que la elección de la red de localización (monofásica, bifásica o trifásica) comienza a actuar tras la detección y clasificación del mismo por el módulo de detección, cuya respuesta oscila entre 2 y 4 ms, por lo que a su vez la respuesta de la localización ocurre entre 2 y 6 ms desde la detección del mismo. En realidad, el tiempo máximo de todo el proceso de detección y localización del fallo es de 10 ms
- La zona de conflicto que ocurren al final de la primera zona y el comienzo de la segunda zona se resuelve con un algoritmo especial
- La tercera zona se ha determinado como la que se sitúa a espaldas del relé y se clasifica de forma directa en menos de 3 ms en función del tipo de fallo
- La respuesta del relé es independiente de la saturación de los transformadores
- El comportamiento experimental del relé de zona ha sido satisfactorio, con las matizaciones que se explican en el capítulo 8

- Tampoco se han estudiado los casos de fallos de campos cruzados, para los que nos remitimos a las referencias [38,94]

El relé puede ser incorporado a un sistema de protección de respaldo para el caso de diferentes líneas que confluyen en una misma subestación conocido como unidad “ASIG-SUB” [38].

Bibliografía

- [1] Rockefeller, G. D.: Fault Protection with a Digital Computer. IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. Pas-88, pp.438-462, Apr. 1969.
- [2] Barry J. Mann; Morrison, I. F.: Digital Calculation of Impedance for Transmission Line Protection. IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. Pas-90, pp. 270-276, Jan./Feb. 1970.
- [3] Gilerest, G. B.; Rockefeller, G. D.; Udren, E. A.: High Speed Distance Relaying using a Digital Computer, I-System Description. IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. Pas-91, pp. 1235-1243, May/June 1972.
- [4] Rockefeller, G. D.; E. A., Udren: High Speed Distance Relaying using a Digital Computer, II- Test Results. IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. Pas-91, pp. 1244-1252, May/June 1972.
- [5] Phadke, A. G.; Ibrahim, M.; Hibka, T.: Fundamental Basis for Distance Relaying with Symmetrical Components. IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. Pas-96, pp. 635-642, Mar./Apr. 1977.
- [6] Chamia, M.; Liberman, S.: Ultra High Speed Relay for EHV/UHV Transmission Lines-Development, Design and Application. IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. Pas-97, pp. 2104-2112, Nov./Dec. 1978.
- [7] Thorp, J. S.; Phadke, A. G.; Horowitz, S. H.; Beeler, J. E.: Limits to Impedance Relaying. IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. Pas-98, no. 1, pp. 246-260, Jan./Feb. 1979.
- [8] Rockefeller, G. D.; Wagner, C. L.; Linders, J. R.: Adaptive Transmission Relaying Concepts for Improved Performance. IEEE Trans. Power Delivery, Vol.3, no.4, pp. 446-4458, Oct. 1988.
- [9] Horowitz, S. H.; Phadke, A. G.; Thorp, J. S.: Adaptive Transmission Line Relaying. IEEE Trans. Power Delivery, Vol.3, no.4, pp. 1436-1445, April 1988.
- [10] Bastard, P.; Emura, T.; Meunier, M.: The Technique of Infinite-Impulse-Response Filtering Applied to Digital Protection and Control of Medium Voltage Power System. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 2, April 1992, pp. 620-626.

- [11] Dutta, P. K.; Dutta Gupta, P. B.: Microprocessor-Based UHS Relaying for Distance Protection using Advanced Generation Signal Processing. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No. 3, July 1992, pp. 1121-1128.
- [12] Denise King, R.; El-Hawary, M. E. and Ferial el-Hawary: Optimal Environmental Dispatching of Electric Power Systems via an Improved Hopfield Neural Network Model. IEEE Trans. on Power Systems; Vol. 10, No. 3, August 1995, pp. 1559-1565.
- [13] Alireza Khotanzad; Rey.Chue Hwang; Alireza Abaye; Dominic Maratukulam: An Adaptive Modular Artificial Neural Network Hourly Load Forecaster and its Implementation at Electric Utilities. IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 10, No. 3, August 1995, pp. 1716-1722.
- [14] Guan, L.; Cheng, S.; Zhou, R.: Artificial Neural Network Power System Stabiliser Trained with an Improved BP Algorithm. IEE Proc.- Gener. Transm. Distrib., Vol. 143, No. 2, March 1996, pp. 135-141.
- [15] Hsu, Y. Y.; Huang, H. M.: Distribution System Service Restoration using the Artificial Neural Network Approach and Pattern Recognition Method. IEE Proc. –Gener. Transm. Distrib., Vol. 142, No. 3, May 1995, pp. 251-256.
- [16] Dejan J. Sobajic; Yoh-Han Pao: Artificial Neural Net Based Dynamic Security Assessment for Electric Power Systems. IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 4, No. 1, February 1989, pp. 220-228.
- [17] Osowski, S.: Neural Network for Estimation of Harmonic Components in Power System. IEE Proc. –C, Vol. 139, No. 2, March 1992, pp. 129-
- [18] Chichocki, A.; Lobos, T: Adaptive Analogue Network for Real-Time Estimation of Basic Waveforms of Voltages and Currents. IEE Proc.-C, Vol. 139, No. 4, July 1992, pp. 343-350.
- [19] Bastar, P.; Meunier, M.; Régál, M.: Neural Network-Based Algorithm for Power Transformer Differential Relays. IEE Proc.- Gener. Transm. Distrib., Vol. 142, No. 4, July 1995, pp. 386-392.
- [20] Jaime A. Valencia: Protección diferencial digital de transformadores de potencia. Nuevos algoritmos usando redes neuronales. Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Cataluña, Terrassa, Barcelona, España.
- [21] Orille, A. L.; Nabil Khalil; Jaime A. Valencia: Uso de la Red Neuronal FIR en protección Diferencial de un Transformador de Potencia. 5as Jornadas Hispano Lusas de Ingeniería Eléctrica, Salamanca, España, 1997, 3-5 de Julio 1997, paginas 755 – 762.
- [22] Orille, A. L.; Nabil Khalil; Jaime A. Valencia: A Transformer Differential Protection Based on Finite Impulse Response Artificial Neural Network. 24th international Conference on Computers and Industrial Engineering, CAIE, Brunel University, Middlesex, England, 9-11 de Septiembre 1998, paginas 367-370.
- [23] Orille, A. L., Nabil Khalil, Jaime A. Valencia: A Differential Protection for Single and Three-Phase Power Transformer using FIRANN. The International Conference on Intelligent System Application to Power Systems, ISAP'99, Rio de Janeiro, Brazil, 4-8 April, 1999, paginas 88-92.

- [24] Orille, A. L., Sowilam, G. M. A. : Application of Neural Networks for Direct Torque Control. 24th international Conference on Computers and Industrial Engineering, CAIE, Brunel University, Middlesex, England, 9-11 de Septiembre 1998, paginas 359-362.
- [25] Dalstein, T: Fault Detection using Neural Network Application. SIEMENS AG, 93p8562, Berlin, 21.09.1993, FRG.
- [26] Sultan, A.F.; Swift, G. W.; Fedirchuk, D. J.: Detection of High Impedance Arcing Faults using A Multi-Layer Perceptron. IEEE trans. on power delivary, Vol. 7, No. 4, October 1992, pp. 1871-1877
- [27] Fitton, D. S.; Dunn, R. W.; Aggarwal, R. K.; Jones, A. T.; Song, Y. H.: The Application of Neural Network Techniques to Adaptive Autoreclosure in Protection Equipment. Fifth International Conference on Developments in Power System Protection, York, UK, March 30- April 1 1993, pp. 161-164.
- [28] Hong-Tzer Yang; Wen-Yeau Chang; Ching-Lien Huang: A New Neural Networks Approach to On-Line Fault Section Estimation using Information of Protective Relays and Circuit Breakers. IEEE trans. on power delivary, Vol. 9, No. 1, January 1994, pp. 220-229.
- [29] Damir Novosel; Bernard Bachmann; David Hart; Yi Hu; Muraru Mohan Saha: Algorithms for Locating Faults on Series Compensated Lines using Neural Network and Deterministic Methods. IEEE PES 95 SM 431-7 PWRD.
- [30] Bernard Bachmann; Damir Novosel; David Hart; Yi Hu; Muraru Mohan Saha: Application of Neural Networks for Series Compensated Line Protection. The International Conference on Intelligent System Application to Power Systems, ISAP'96, Orlando, Florida, USA, January 28 – Febreuary 2, 1996, pp. 68-73.
- [31] A. G. Jongepier; L. Van del Sluis: Adaptive Distance Protection of Double-Circuit Lines using Artificial Neural Networks. IEEE PES 96 WM 023-2 PWRD
- [32] Bo, Z. Q.; Aggarwal, R. K.; Jones, A. T.; Li, H. Y.; Song, Y. H.: A New Approach to Phase Selection using Fault Generated High Frequency Noise and Neural Networks. IEEE PES 95 WM 024-0 PWRD.
- [33] Sidhu, T.S.; Singh, H.; Sachdev, M. S.: Design, Implementation and Testing of An Artificial Neural Network Based Fault Direction for Protecting Transmission Lines. IEEE PES 94 SM 433-3 PWRD.
- [34] Thomas Dalstein; Bernad Kulicke: Neural Network Approach to Fault Classification for High Speed Protective Relaying. IEEE PES 94 SM 488-7 PWRD.
- [35] Thomas Dalstein; Dejan J. Sobajic; Bernd Kulicke, Yoh-Han Pao: Neural Network Approach to Fault Direction Identification in Electric Power System.
- [36] Thomas Friedrich; Thomas Dalstein; Bernd Kulicke; Dejan J. Sobajic: Multi Neural Network Based Fault Area Estimation for High Speed Protective Relaying. IEEE PES 95 SM 431-7 PWRD.

- [37] Thomas Friedrich; Thomas Dalstein; Bernd Kulicke: A Neural Time Zone Classifier for High Speed Protective Relaying. UPEC'94, pp.220-223.
- [38] Nabil Khalil Ibrahim: Aplicación de las redes neuronales en las protecciones de distancia en redes eléctricas de alta. Tesis Doctoral, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Cataluña, Terrassa, Barcelona, España, 1999.
- [39] Paulo F. Ribeiro, Wavelet transform: an advanced tool for analyzing non-stationary harmonic distortions in power systems. in Proc. of the IEEE International Conference on Harmonics in Power Systems, Bologna, Italy, September 1994.
- [40] David C. Robertson, O. I. Camps et al: Wavelets and electromagnetics power system transients. IEEE trans. on power delivery, Vol. 11, No. 2, April 1996, pp. 1050-1058
- [41] S. Santoso, E. J. Powers, and W. M. Grady: Power quality disturbance data compression using wavelet transform methods. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 12, No 3, pp. 1250-1257, July 1997.
- [42] S. Santoso, E. J. Powers, and W. M. Grady: Electric power quality disturbance detection using wavelet transform analysis. Proc. of the IEEE-SP International Symposium Time-Frequency and Time-Scale Analysis, pp. 166-169, 1994.
- [43] S. Santoso, E. J. Powers, and P. Hofmann: Power quality assesment via wavelet transform analysis. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No 2, pp. 924-930, Apr. 1996.
- [44] O. Chaari, M. Meunier, and F. Brouaye: Wavelets: a new tool for the resonant grounded power distributing systems relaying. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 11, No 3, pp. 1301-1308, July 1996.
- [45] I. K. Yu, and Y. H. Song: Wavelet analysis of arcing fault phenomena with paticular reference to development of new protection and control techniques. UKACC International Conf. on CONTROL'98, 1-4 September 1998, Conf. Publication No. 455, pp. 1011-1016, © IEE, 1998.
- [46] M. Gómez-Morante, and D. W. Nicoletti: A wavelet-based differential transformer Protection. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No 4, pp. 1351-1356, October 1999.
- [47] S. Huang, C. Hsieh, and C. Lien Huang. Application of Morlet wavelets to supervise power system disturbances. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No 1, pp. 235-243, January 1999.
- [48] P. L Mao, R. K. Aggarwal: A novel Approach to the classification of the transient phenomena in power system transformers using combined wavelet transform and neural network. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol 16, No 4, October 2001.
- [49] Borrás, D.; Castilla, M.; Moreno, N.; Montaña, J.C.: Wavelet and neural structure: a new tool for diagnosis of power system disturbances. IEEE Trans. on Industry Applications, Vol 37, No 1, pp. 184-190, January 2001.
- [50] Sidhu, T.S.; Singh, H.; Sachdev, M. S.: Design, Implementation and Testing of An

- Artificial Neural Network Based Fault Direction for Protecting Transmission Lines. IEEE PES 94 SM 433-3 PWRD.
- [51] SAND, Powerfull Neuroprocessor for Intelligent Systems. Data sheet, IMS, Allmandring 30^a, Stuttgart, Germany
- [52] SIOP, High Performance Neurochip for Signal Processing. Data sheet, IMS, Allmandring 30^a, Stuttgart, Germany
- [53] Sanaye-Pasand, M.; O. P. Malik: Implementation & Laboratory Test Results of an El-man Network-based Transmission Line Directional Relay. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol 14, No 3, pp. 782-788, July 1999.
- [54] Sidhu, T. S.; Gurdeep Singh; M.S. Sachdev: Protection of Power System apparatus against arcing faults. IEEE 0-7803-4886-9/98/ \$10.00 pp. 436-439 © 1998 IEEE.
- [55] Stanley H. Horowitz: Protective Relaying for Power Systems Volume II. IEEE Press, New York, 1992.
- [56] Phadke, A. G.; James S. Thorp: Computer Relaying for Power Systems. Research Study Press LTD., Somerset, England, 1994.
- [57] Stanley H. Horowitz; Phadke, A. G.: Power System Relaying. Research Study Press LTD., Somerset, England, 1996.
- [58] Madhava Rao, T. S.: Power System Protection, Static Relays with Microprocessor applications. Tata McGraw Hill, New Delhi, India, 1981, 2nd ed.
- [59] Paulino Montané: Protecciones en las Instalaciones Eléctricas, Evaluación y perspectivas. Marcombo, S.A. Barcelona, España.
- [60] Jones, A. T.; Salman, S. K.: Digital Power System Protection. Peter Peregrinus Ltd., London, England, 1995.
- [61] Davis, T.: Protection of Industrial Power System. Newnes, Oxford, England, 1996.
- [62] PSCAD/EMTDC. Power System Simulation Software Manual. ©2000-2001 Manitoba HVDC Research Centre Inc.
- [63] Zocholl, S. E.; Kotheimer, W. C.; Tajadoddi, F. Y.: An Analytic Approach to the Application of Current transformers for Protective Relaying. 43rd Annual Georgia Tech Protective Relaying Conference-1989, pp. 1-21, May 3-5, 1989.
- [64] Arvind K. S. Chaudary; Kwa-Sur Tam; Phadke, A. G.: Protection Sysytem Presentation in the Electromagnetic Transient Program. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, April 1994, pp. 700-707.
- [65] Woodford D.: Secondary Arc Effects in AC/DC Hybrid Transmission. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No. 2, April 1993, pp. 704-711.
- [66] Dan Hammerstorm: Working with Neural Networks. IEEE Spectrum, July 1993; pp. 46-53.

- [67] Richard P. Lipmann: An Introduction to Computing with Neural Nets. IEEE ASSP Magazine, April 1987, pp. 4-22.
- [68] Don R. Hush; Bill G. Horne: Progress in Supervised Neural Networks, What's New Since Lipmann. IEEE Signal Processing Magazine, January 1993, pp.8-39.
- [69] Simon Haykin: Neural Networks, A Comprehensive Foundation. Macmillan College Publishing Comany, Inc., United States of America, 1994.
- [70] Robert Hecht-Nielsen: Neurocomputing. Adison Wesley corp. 1990.
- [71] Yoh-Han Pao: Adaptive Pattern Recognition and Neural Networks. Adison Wesley corp. 1989.
- [72] Andrzej Cichoki; Rolf Unbehauen: Neural Networks for Optimization and Signal Processing. John Wiley & Sons, New York, USA, 1993.
- [73] Alianna J. Maren; et. al.: Hanbook of Neural Computing Applications. Academic Press Corp., San Diego, California, USA, 1990.
- [74] Martin T. Hagan; y otros: Neural Network Design. PWS Publishing Company, Boston, MA, USA, 1996.
- [75] Edgar Sánchez-Sinencio, Clifford Lau: Artificial Neural Networks. IEEE Press, New York, NY, USA, 1992.
- [76] John A. K. Suykens; y otros: Artificial Neural Networks for Modelling and Control of Non Linear Systems. Kluwer Academic Publisher, Dordrecht, Netherlands, 1996.
- [77] Vincent W. Porto; et. al.: Alternative Neural Network Training Methods. IEEE Expert, June 1995, pp. 16-22.
- [78] Lodewyk F. K. Wessels, Etienne Barnard: Avoid False Local Minima by Proper Initialization of Connections. IEEE Trans. on Neural Networks, Vol. 3., No. 6, November 1992, pp. 899-905.
- [79] Martin T. Hagan; Mohammad B. Menhaj: Training Feedforward Networks with Marquardt Algorithm. IEEE Trans. on Neural Networks, Vol. 5., No. 6, November 1994, pp. 989-993.
- [80] Xiao-Hu Yu; y otros: Dynamic Learning rate Optimization of Backpropagation Algorithm. IEEE Trans. on Neural Networks, Vol. 6., No. 3, May 1995, 669-677.
- [81] Thomas L. Hemminger; Yoh-Han Pao: Detection and Classification of Underwater Acoustic Transients using Neural Networks. IEEE Trans. on Neural Networks, Vol. 5. September 1994, pp. 712-718.
- [82] Kumpati S. Narendra; Kannan Parthasarathy: Identification and Control of Dynamical Systems using Neural Networks. IEEE Trans. on Neural Networks, Vol. 1, No. 1, March 1990, pp. 4-26.
- [83] Ronald N Bracewell: The Fourier transform and its applications. McGrawHill,1986.

- [84] Burrus, C. Sidney: Introduction to wavelets and wavelet transforms. Prentice-Hall. New Jersey, 1998.
- [85] Bopardikar,Rao. Wavelet transform. Introduction to theory and applications. Addison-Wesley. MA., 1998.
- [86] S. Mallat: A theory for multiresolution signal decomposition: the wavelet representation, IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell., Vol. 11, pp. 674-693, July 1989.
- [87] B. Burke: The world according to wavelets, 2nd ed., A. K. Peters, Ltd, Ed. Natick, MA 01760 , 1998.
- [88] T. Masters: Neural, Novel & hybrid algorithms for time series prediction, John Wiley & Sons, Inc., 1995.
- [89] J. Goswami, and A. K. Chan: Fundamentals of wavelets, theory, algorithms and applications, John Wiley & Sons, Inc., 1999.
- [90] S. Mallat: A wavelet tour of signal processing, Academic Press, Boston, 1998.
- [91] W. A. Wilkinson, and M. D. Cox: Discrete wavelet analysis of power system transients, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 11, No 4, pp. 2038-2044, November 1996
- [92] T. B. Littler, and D. J. Morrow: Wavelets for the analysis of power system disturbances, IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No 4, pp. 358-364, Apr. 1999.
- [93] A. Zell, "SNNS, Stuttgart Neural Network Simulator," University of Stuttgart, Germany, 1990.
- [94] R. K. Aggarwall, Q. Y. Xuan, R. W. Dunn, and A. T. Johns: A Novel Fault Classification Technique for Double-circuit lines Based on a Combined Unsupervised/Supervised Neural Network. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 14, No 4, pp. 1250-1255, October 1999.
- [95] M. Oleskovicz, D. V. Coury, and R.K. Aggarwall: A complete scheme for fault detection, classification and location in transmission lines using neural networks. Developments in Power System Protection, Conference Publication No. 479, pp. 335-338 © IEE 2001.
- [96] JSC Research Center "Module", 3 Eight March 4Th Street Box: 166, Moscow, 125190 Russia.
- [97] R. Venkatesan, and B. Balamurugan: A Real-Time Hardware Fault Detector Using and Artificial Neural Network for Distance Protection. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 16, No 1, pp. 75-82, January 2001.
- [98] J. R. Lucas, P. G. McLaren, V. W. L. Keerthipala, and R. P. Jayasinghe: Improved simulation models for current and voltage transformers in relay studies. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 7, No 1, pp. 152-159, January 1992.

- [99] D. Woodford: Secondary arc effects in AC/DC hybrid transmission. IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 8, No 2, pp. 704-711, April 1993.

- [100] RTDS Technologies Inc. 200-1619 Pembina Hwy., Winnipeg, Manitoba Canada R3T 3Y6. Website: <http://www.rtds.com>

Anexo A

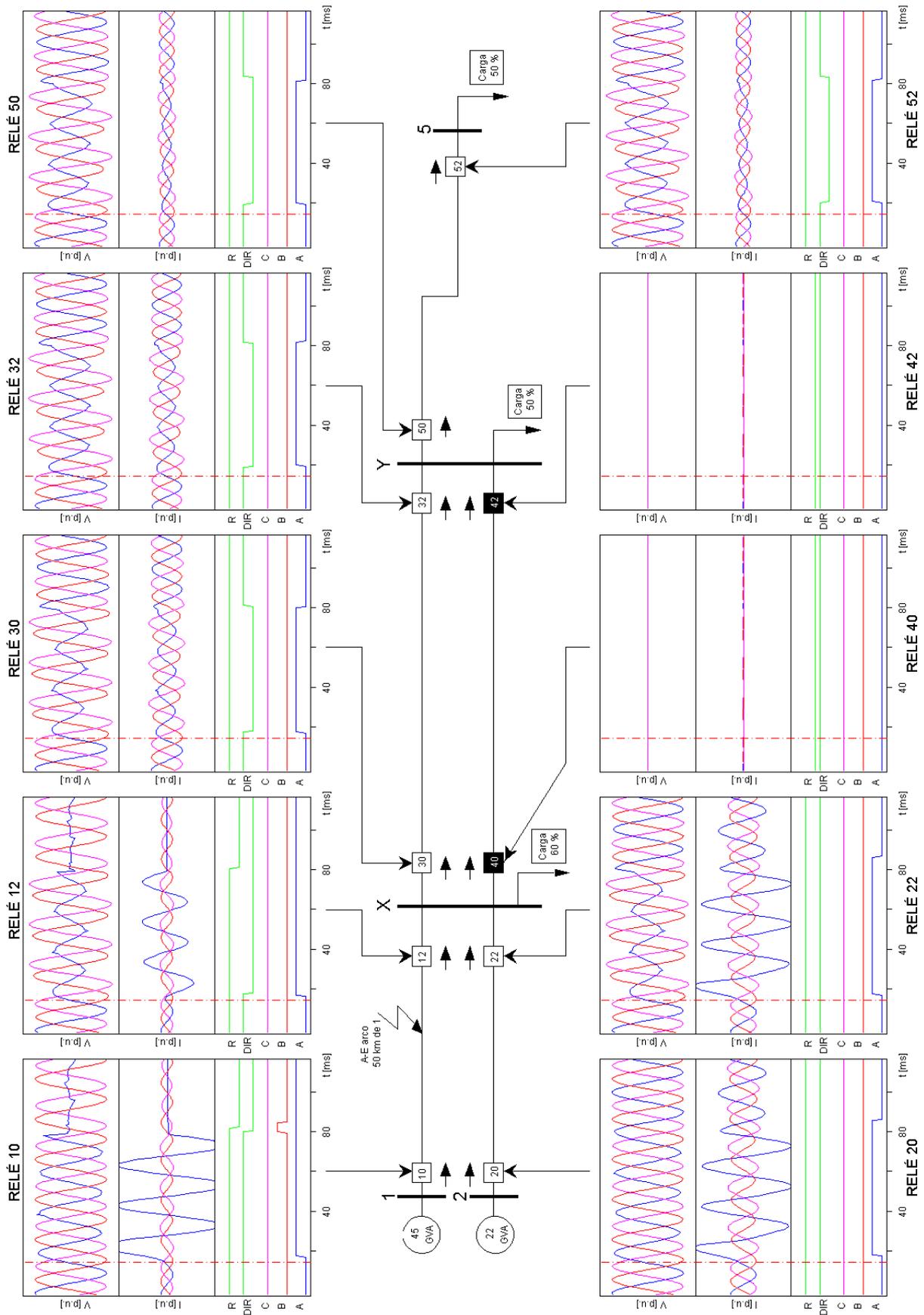


Fig. A.1 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase A a tierra con arco de 35 kV, y a 50 km de la barra 1.

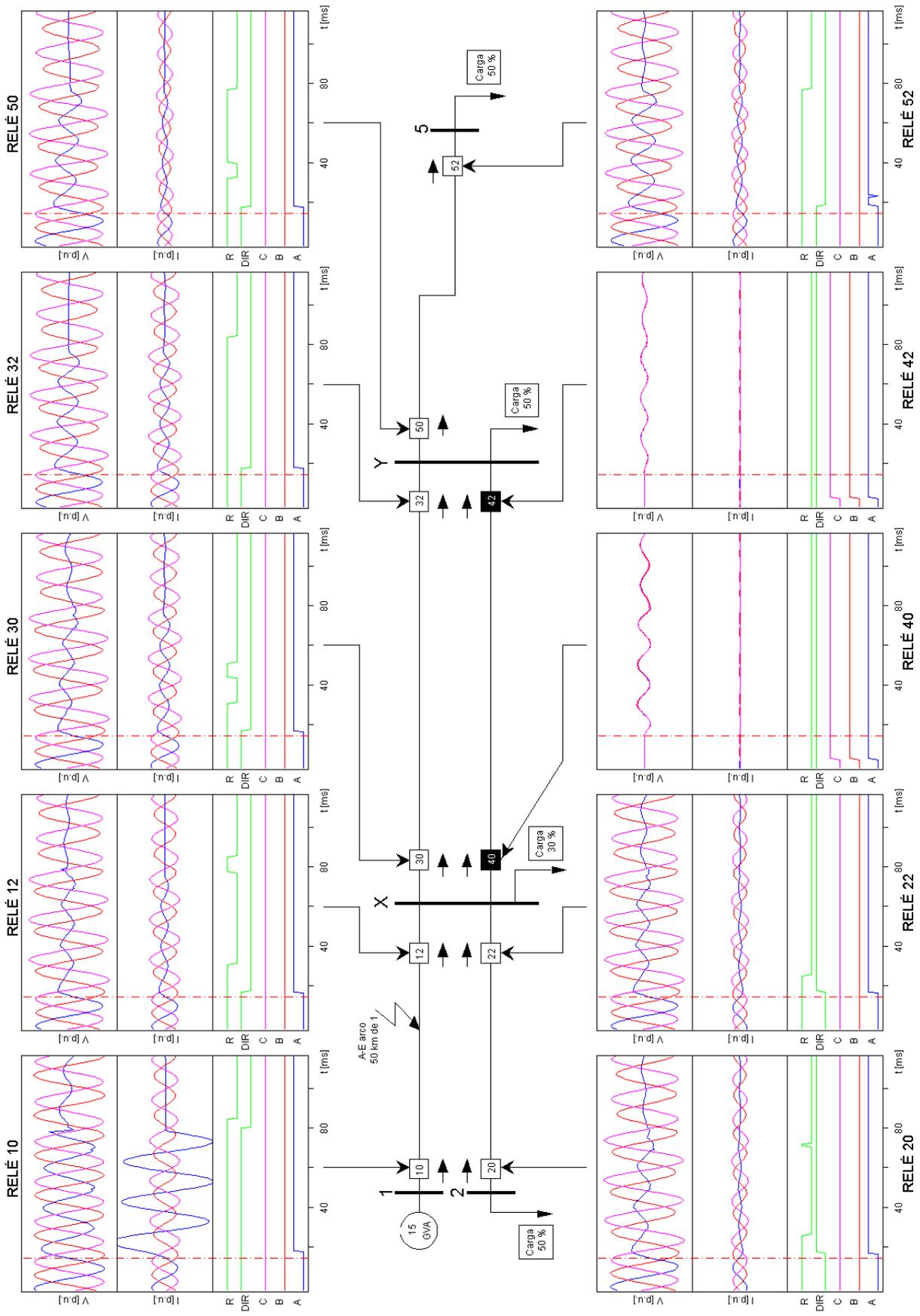


Fig. A.2 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase A a tierra con arco de 35 kV, y a 50 km de la barra 1.

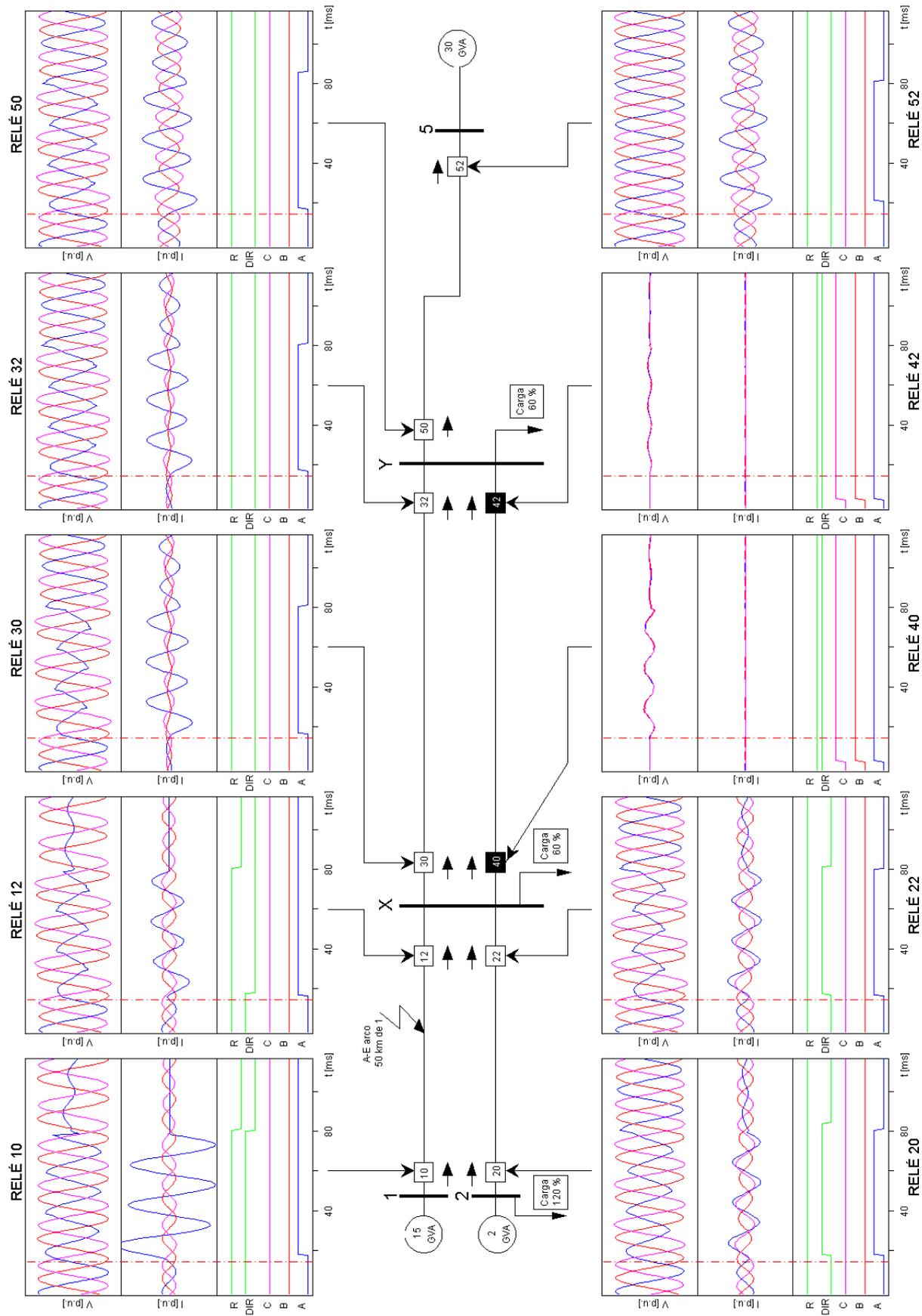


Fig. A.3 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase A a tierra con arco de 35 kV, y a 50 km de la barra 1.

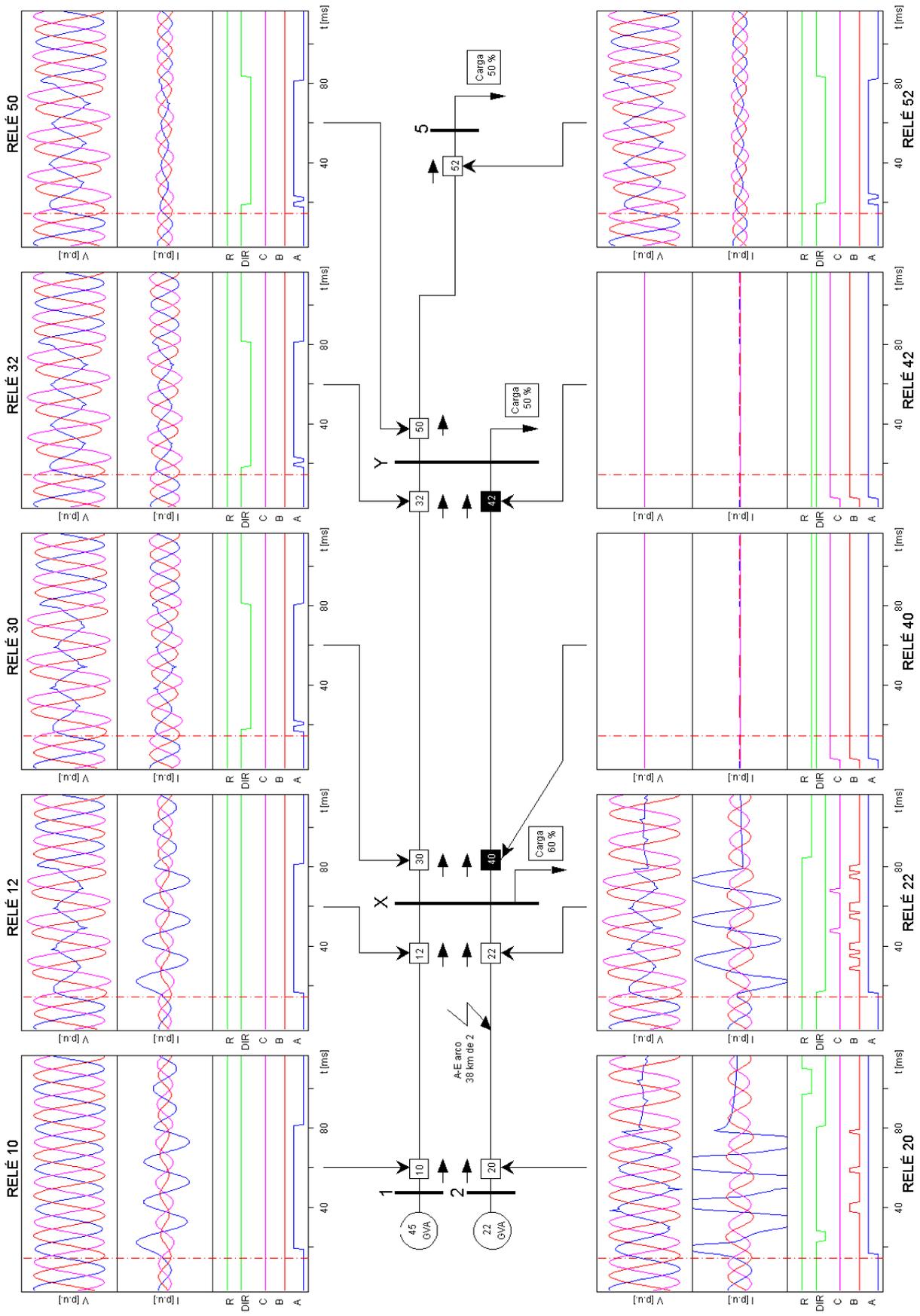


Fig. A.4 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase A a tierra con arco de 35 kV, y a 38 km de la barra 2.

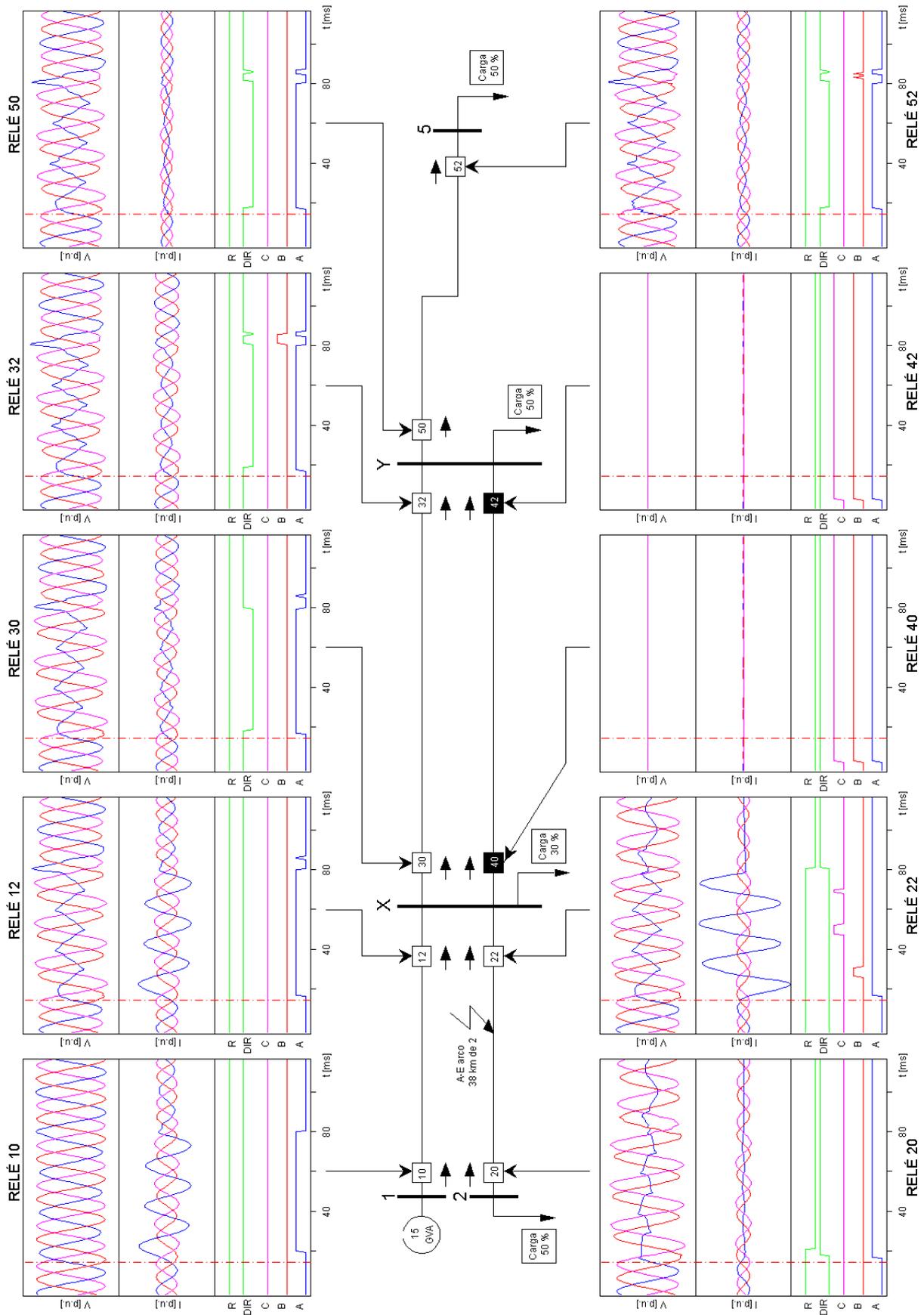


Fig. A.5 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase A a tierra con arco de 35 kV, y a 38 km de la barra 2.

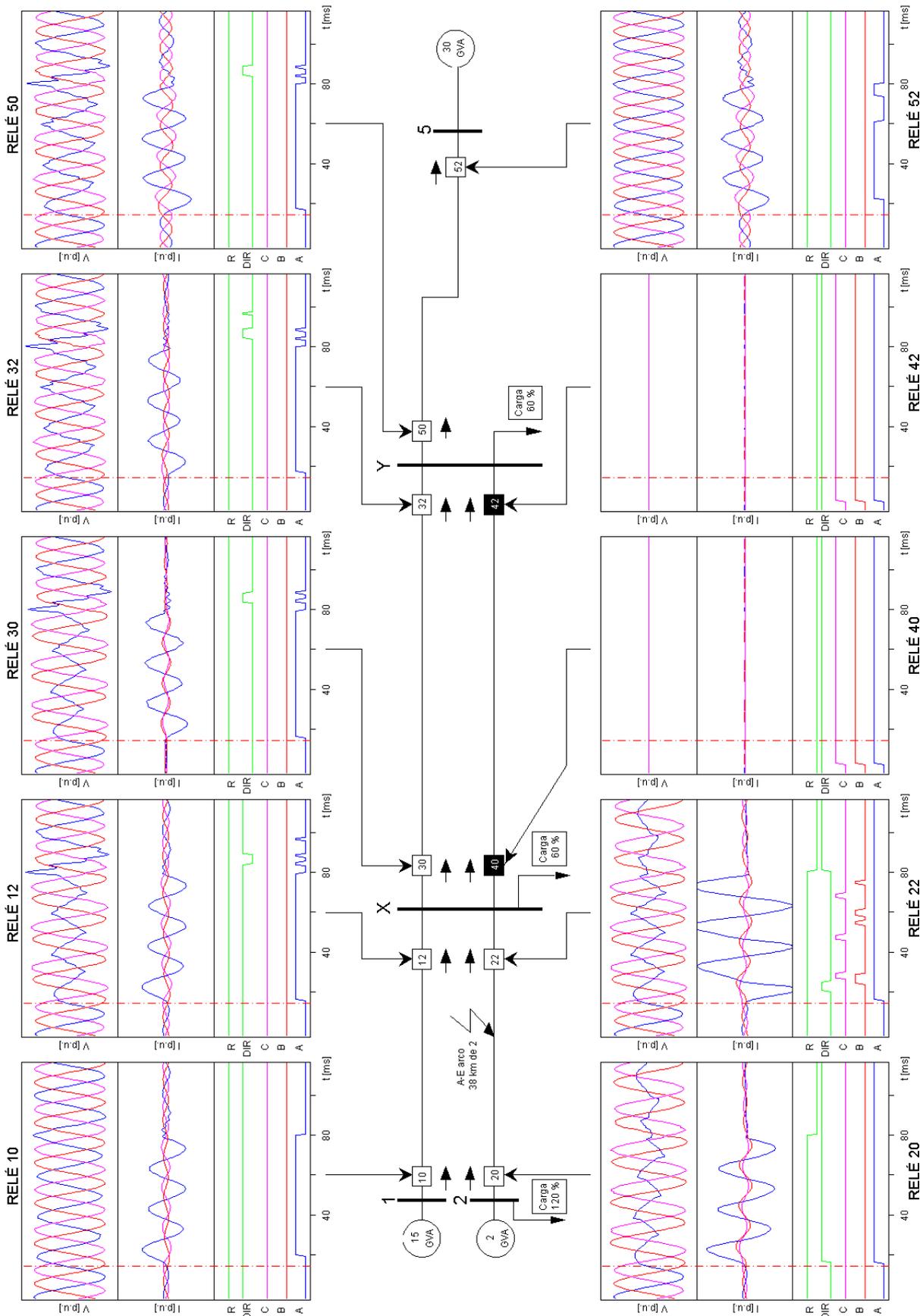


Fig. A.6 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase A a tierra con arco de 35 kV, y a 38 km de la barra 2.

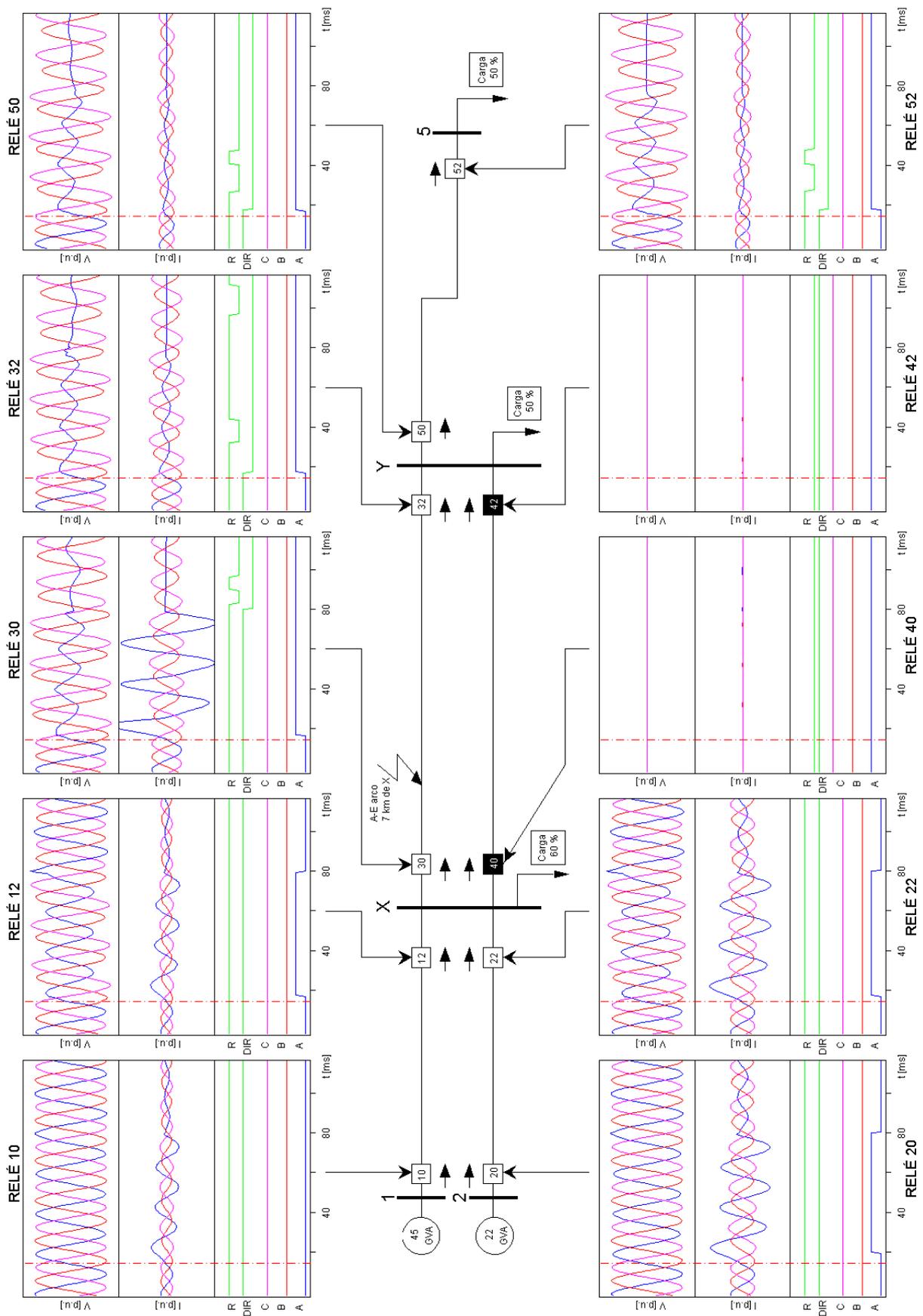


Fig. A.7 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase A a tierra con arco de 35 kV, y a 7 km de la barra X.

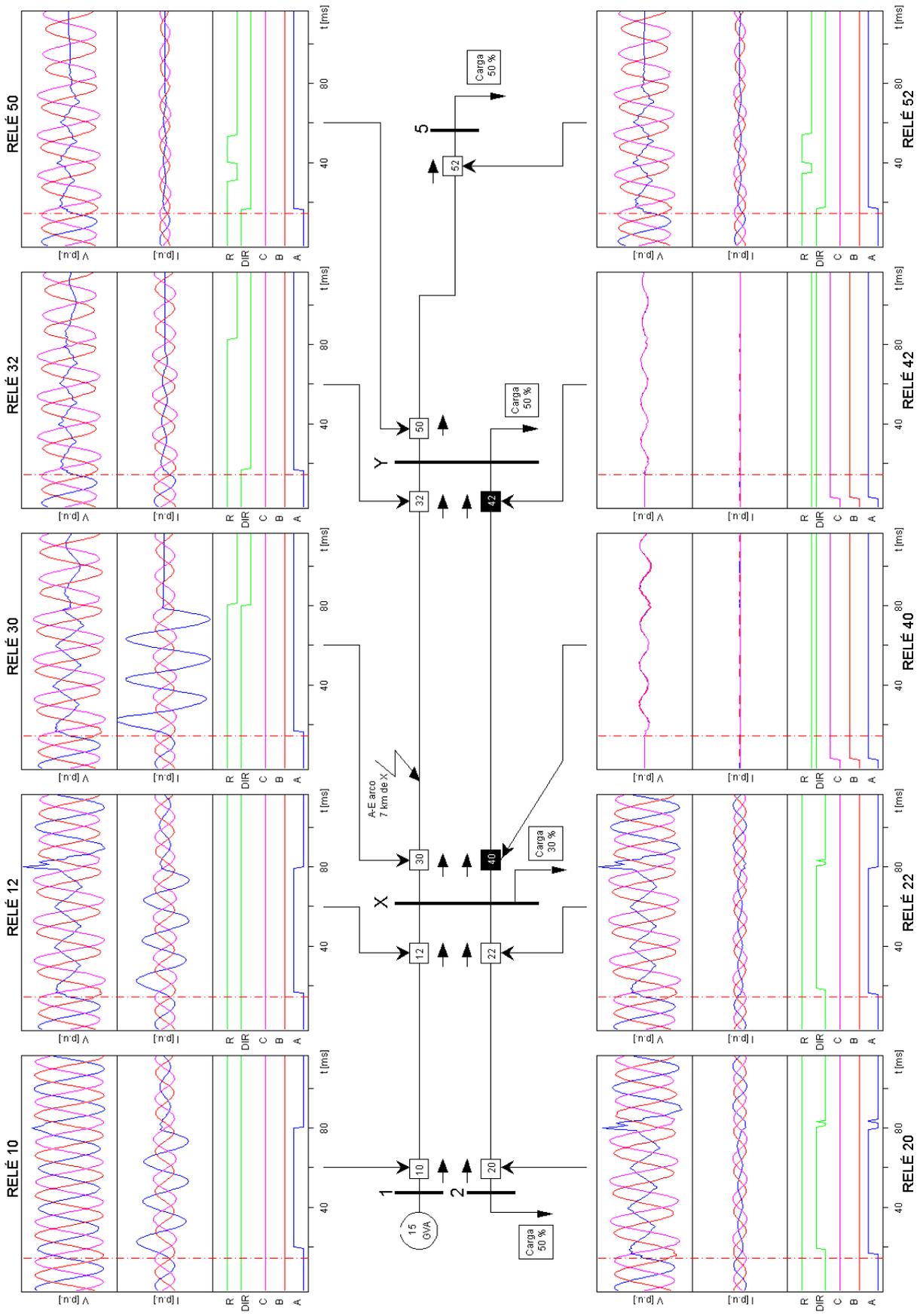


Fig. A.8 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase A a tierra con arco de 35 kV, y a 7 km de la barra X.

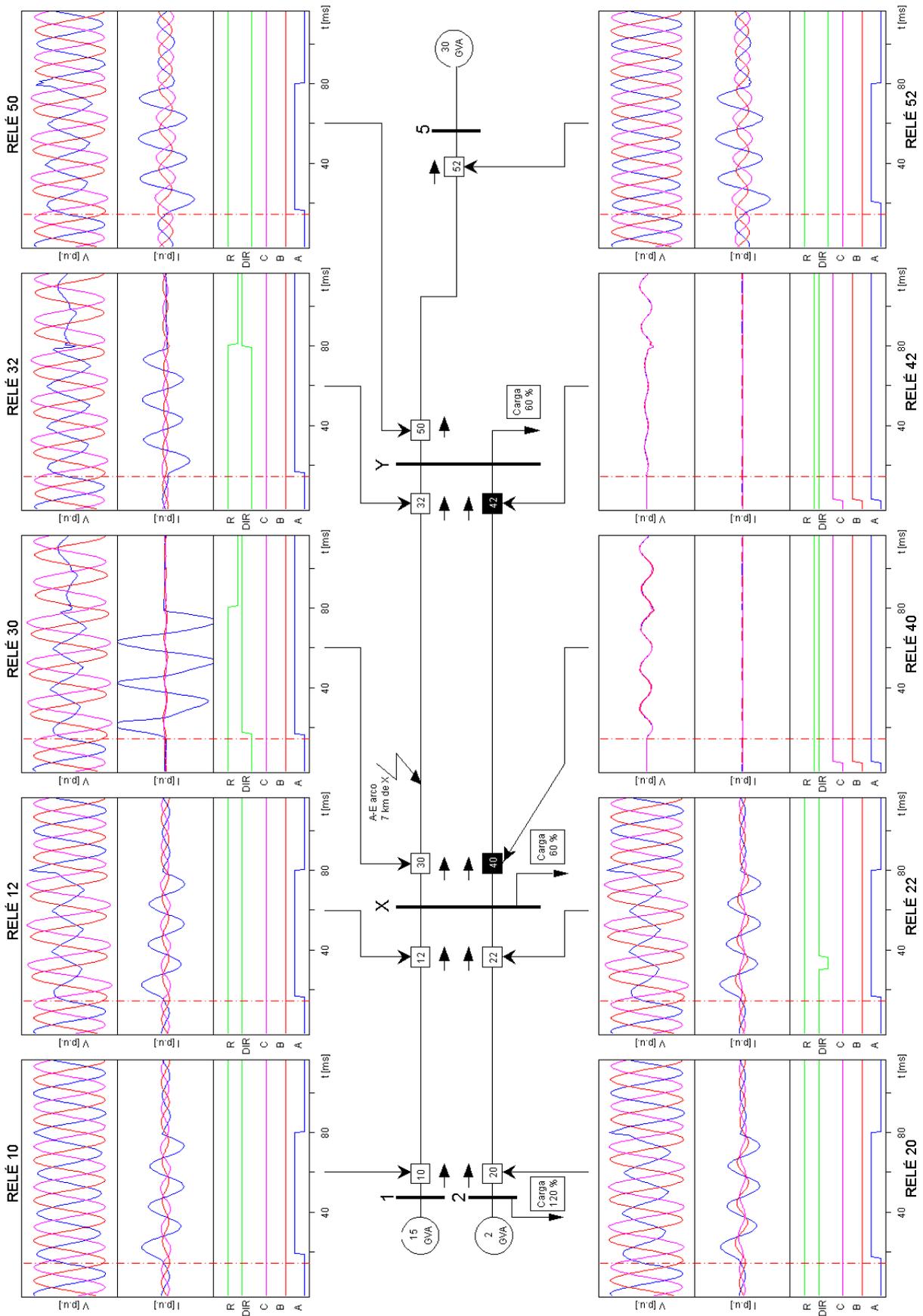


Fig. A.9 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase A a tierra con arco de 35 kV, y a 7 km de la barra X.

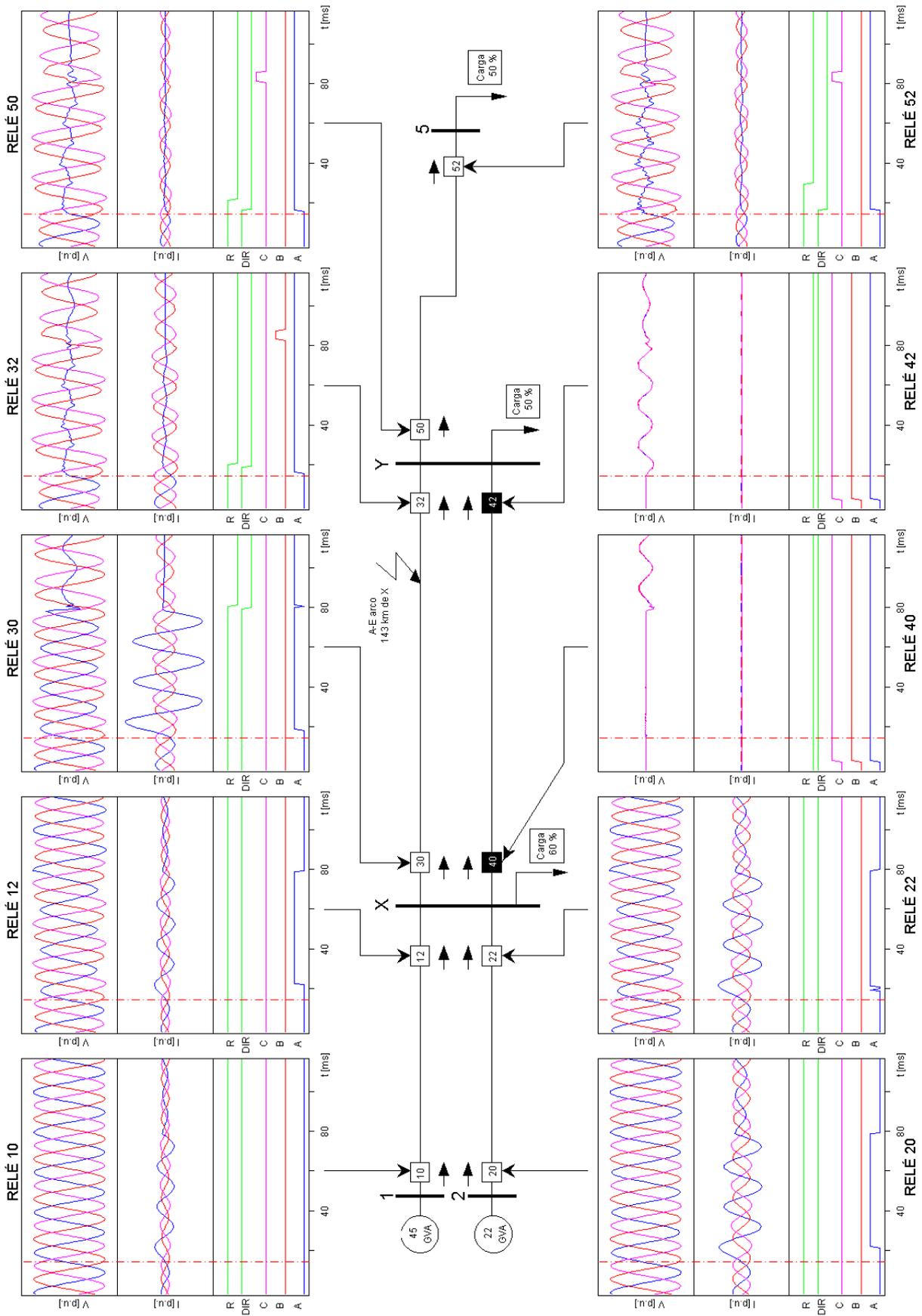


Fig. A.10 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase A a tierra con arco de 35 kV, y a 143 km de la barra X.

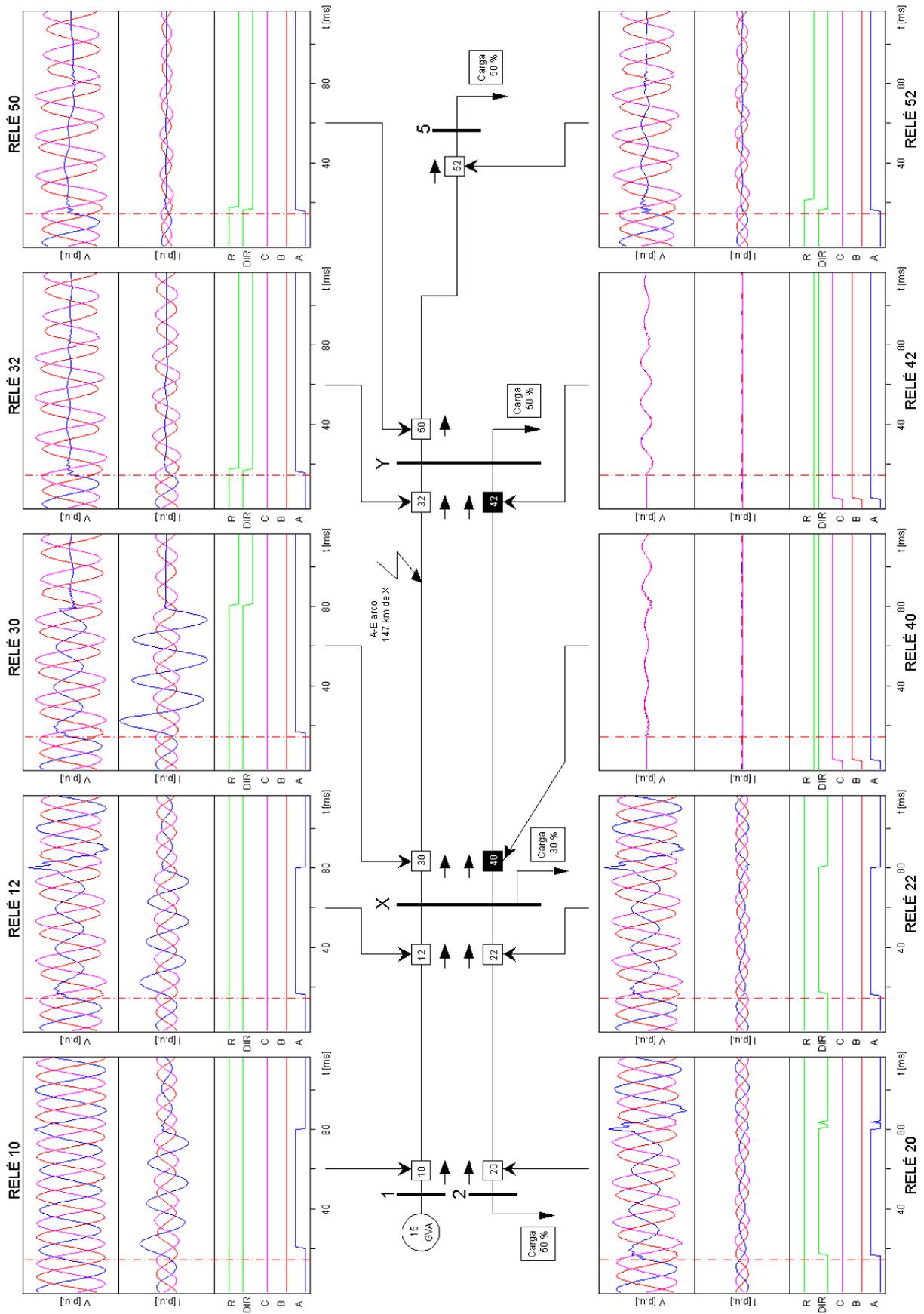


Fig. A.11 Respuesta del relé MFLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase A a tierra con arco de 35 kV, y a 143 km de la barra X.

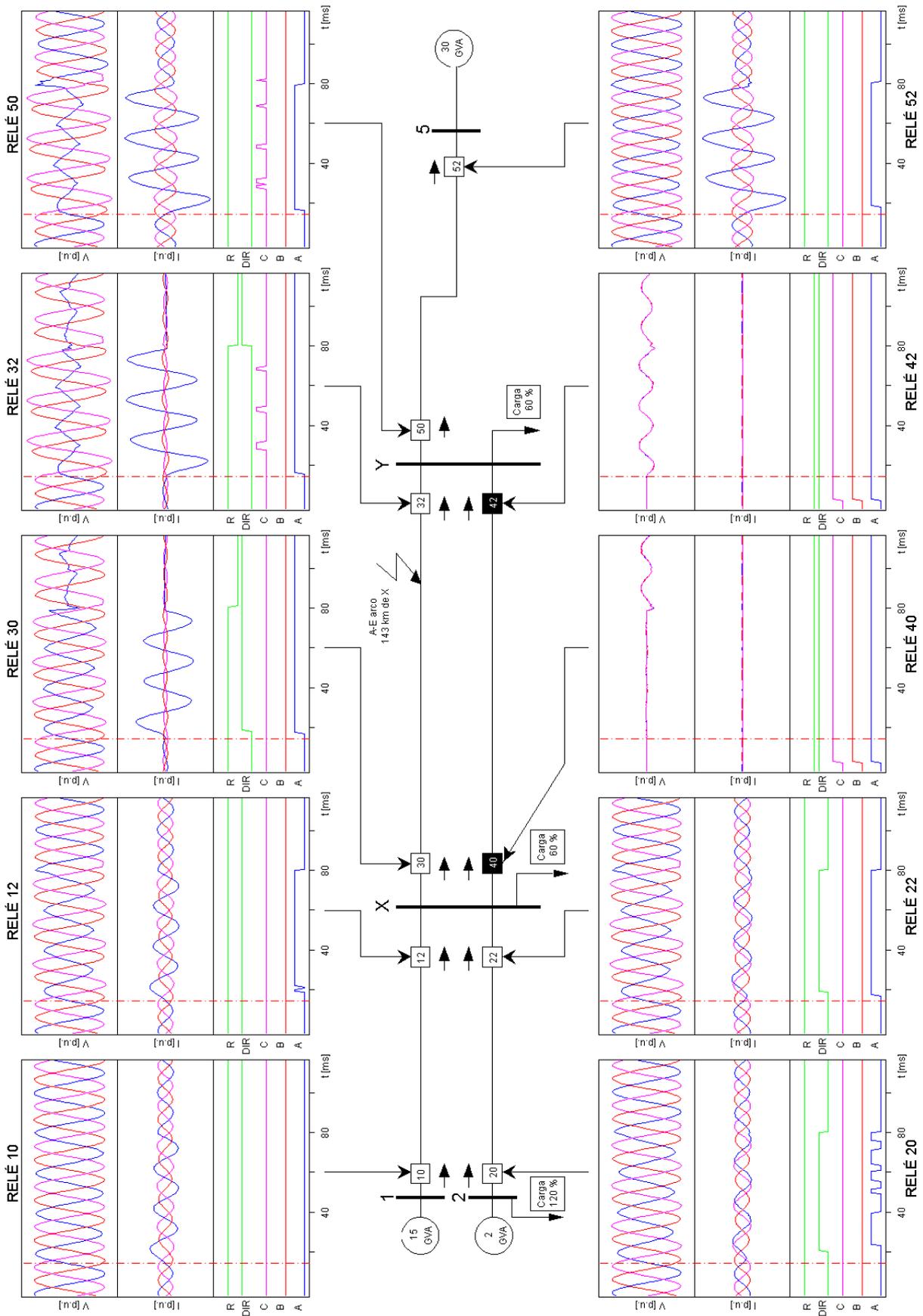


Fig. A.12 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase A a tierra con arco de 35 kV, y a 143 km de la barra X.

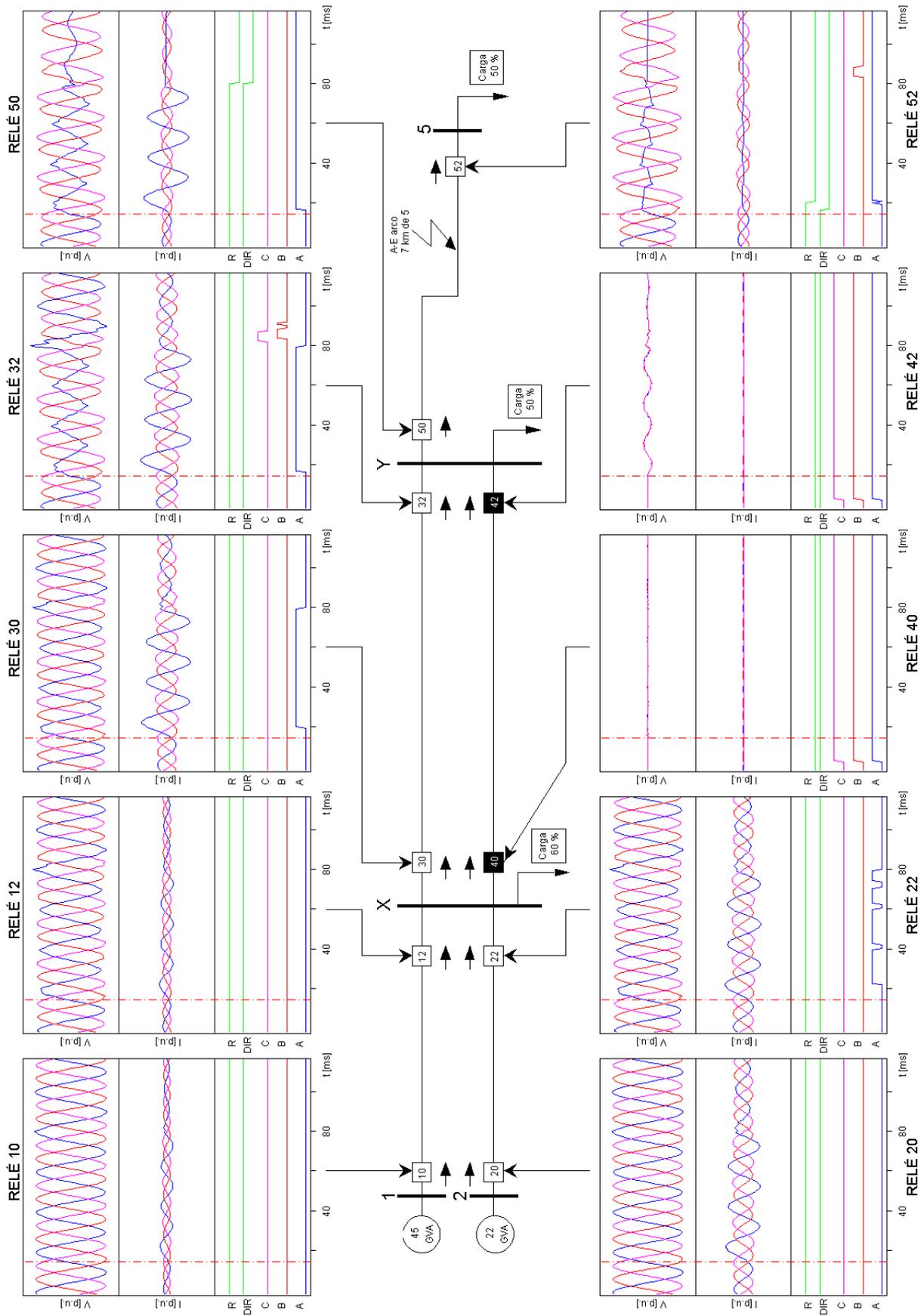


Fig. A.13 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase A a tierra con arco de 35 kV, y a 7 km de la barra 5.

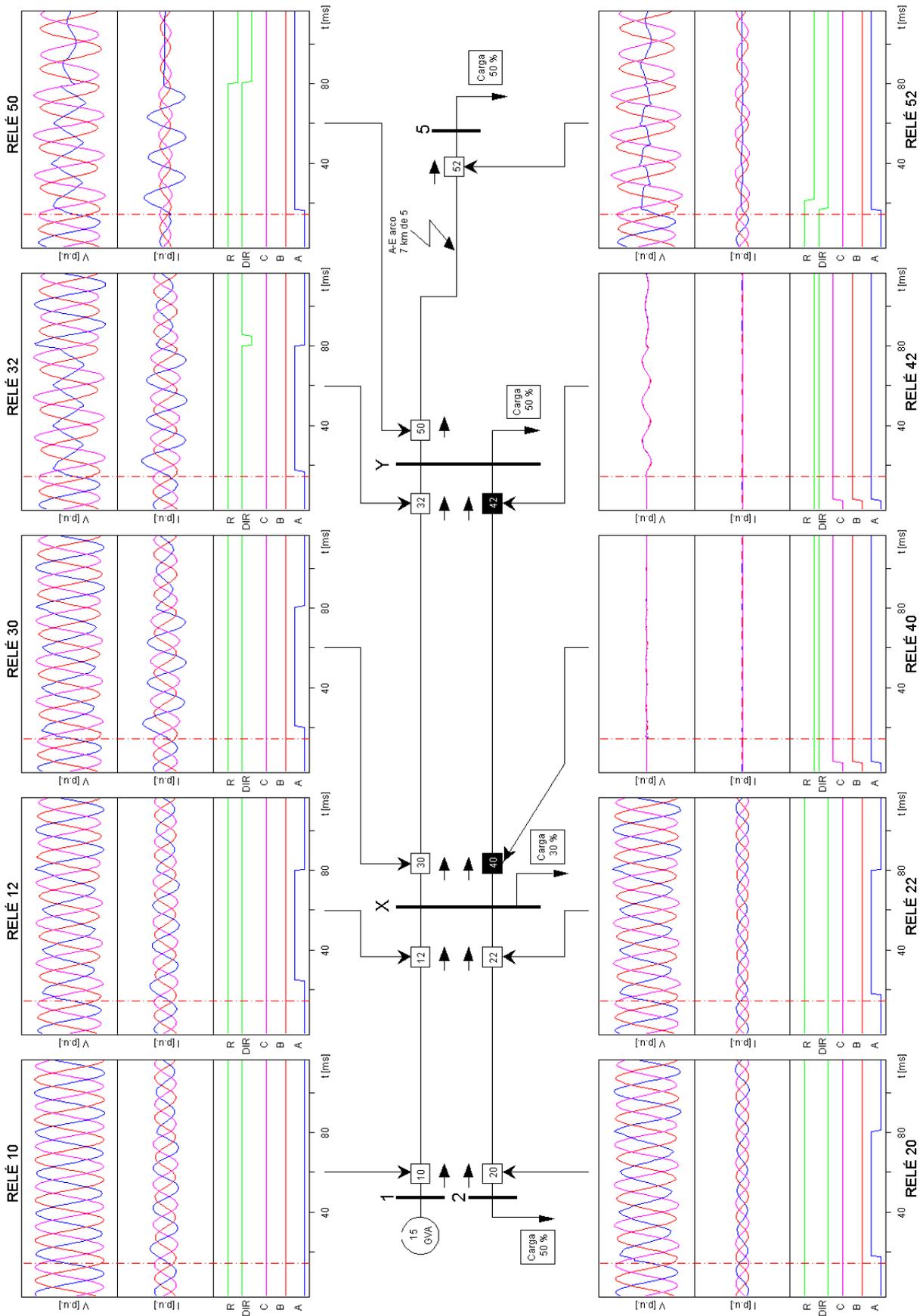


Fig. A.14 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase A a tierra con arco de 35 kV, y a 7 km de la barra 5.

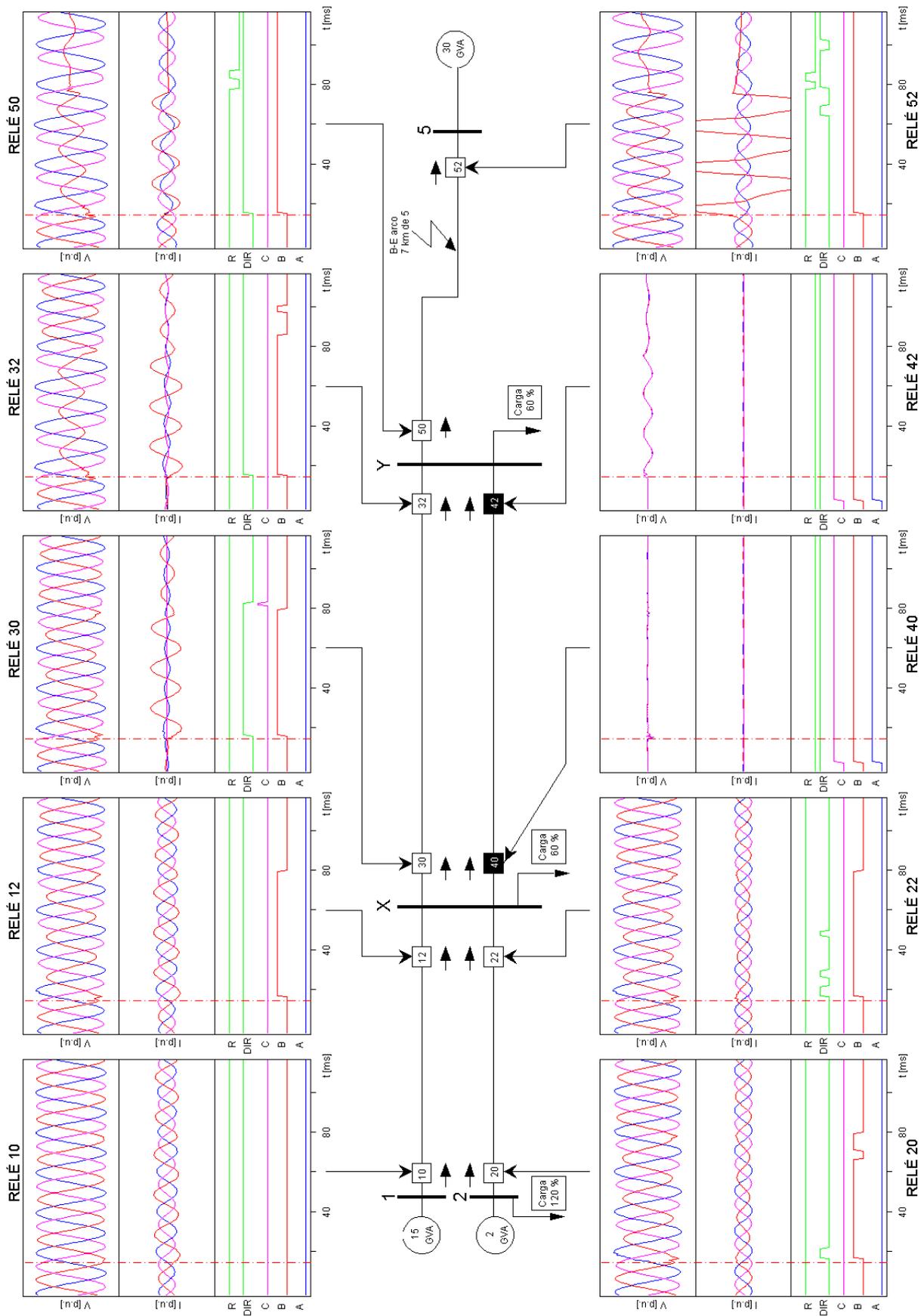


Fig. A.15 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase B a tierra con arco de 35 kV, y a 7 km de la barra 5.

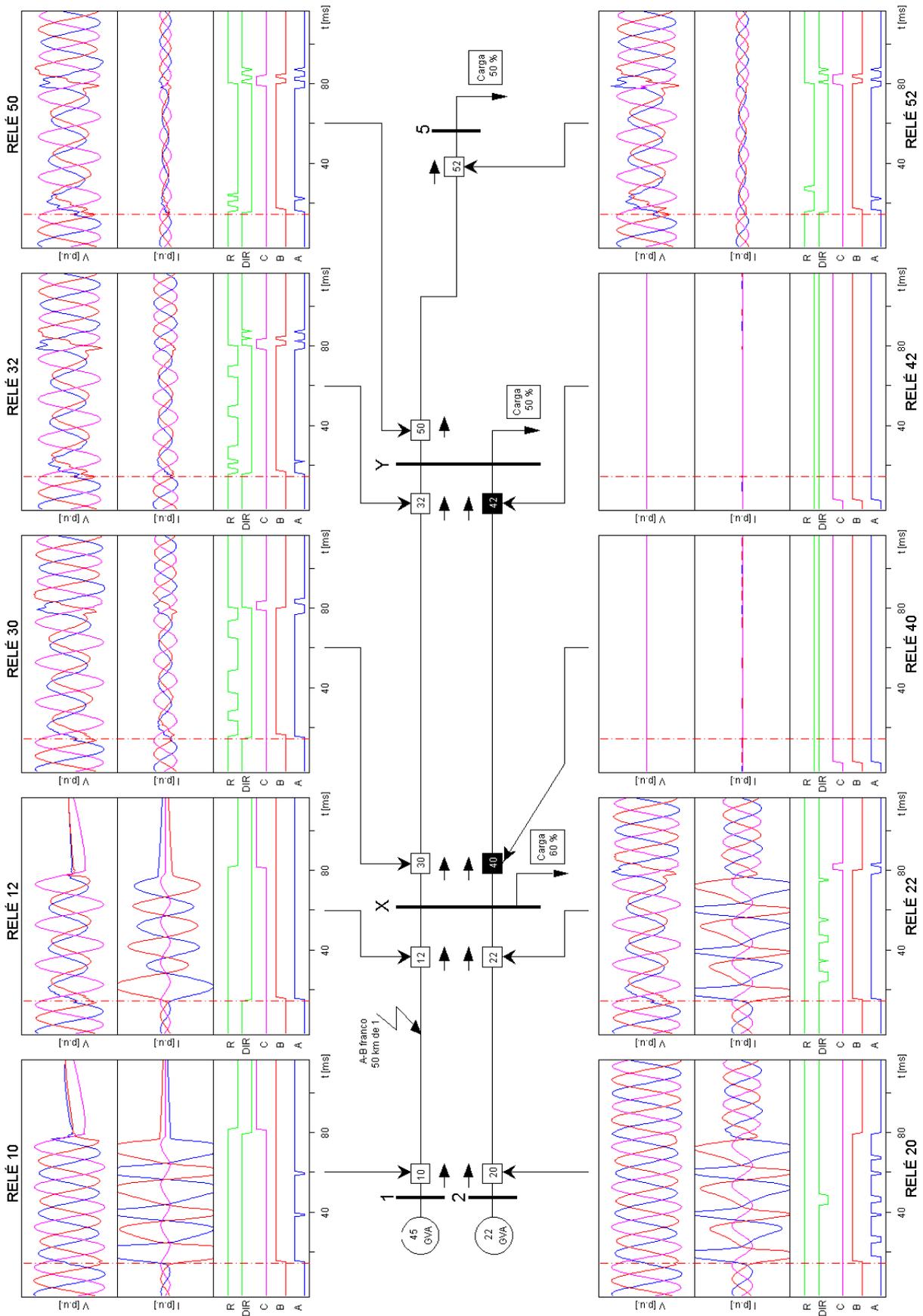


Fig. A.16 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A y B, y a 50 km de la barra 1.

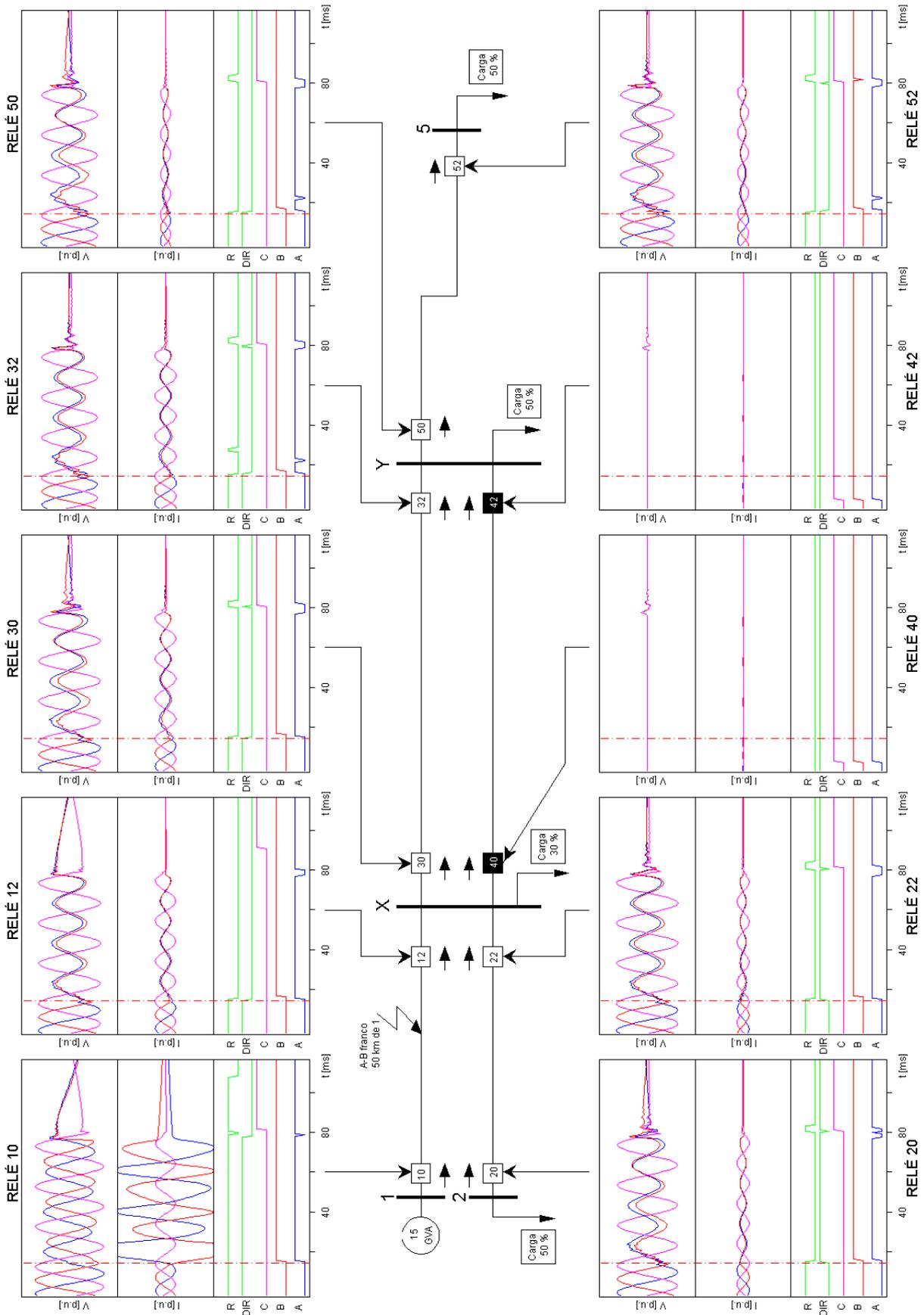


Fig. A.17 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A y B, y a 50 km de la barra 1.

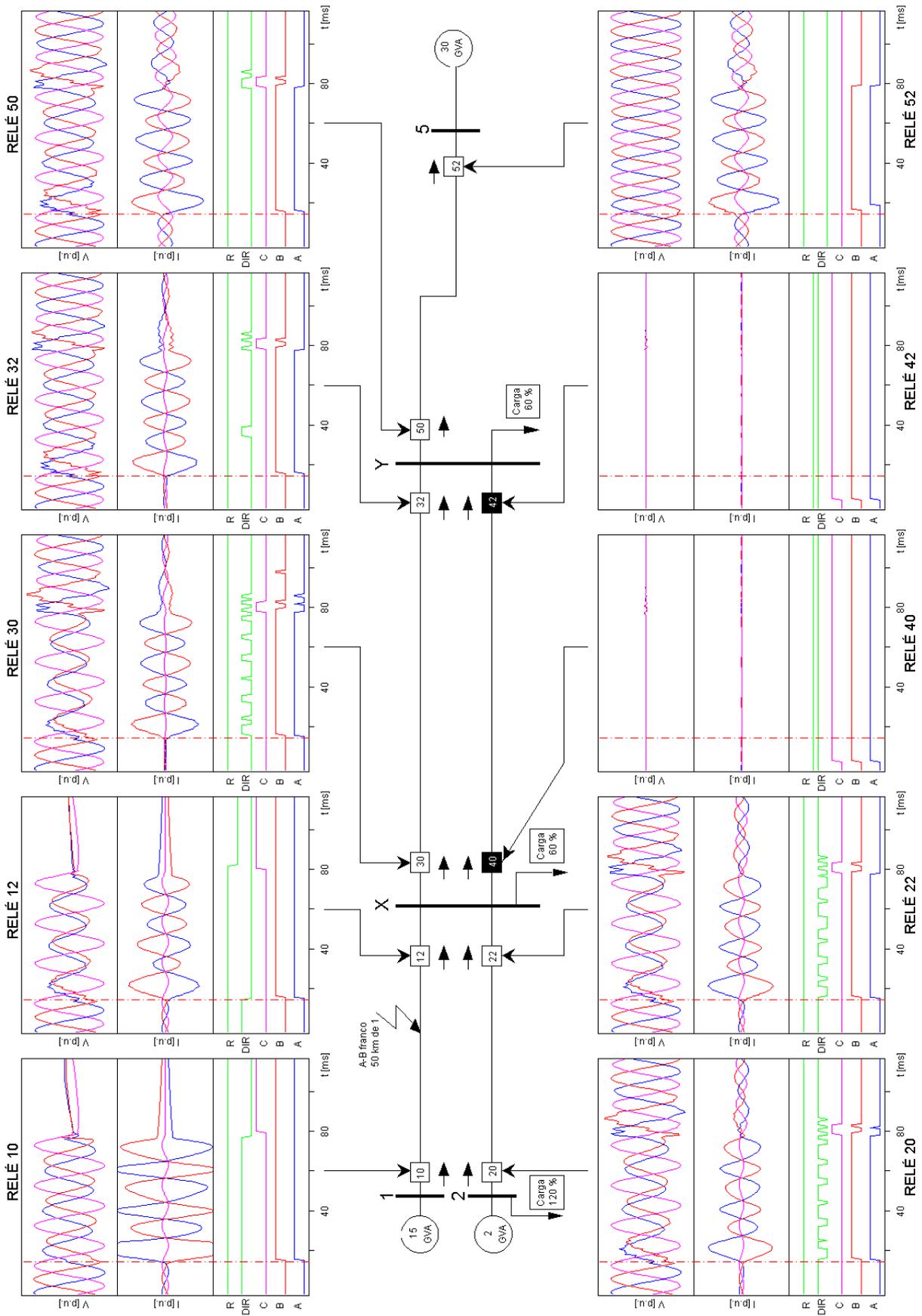


Fig. A.18 Respuesta del relé MLI-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A y B, y a 50 km de la barra 1.

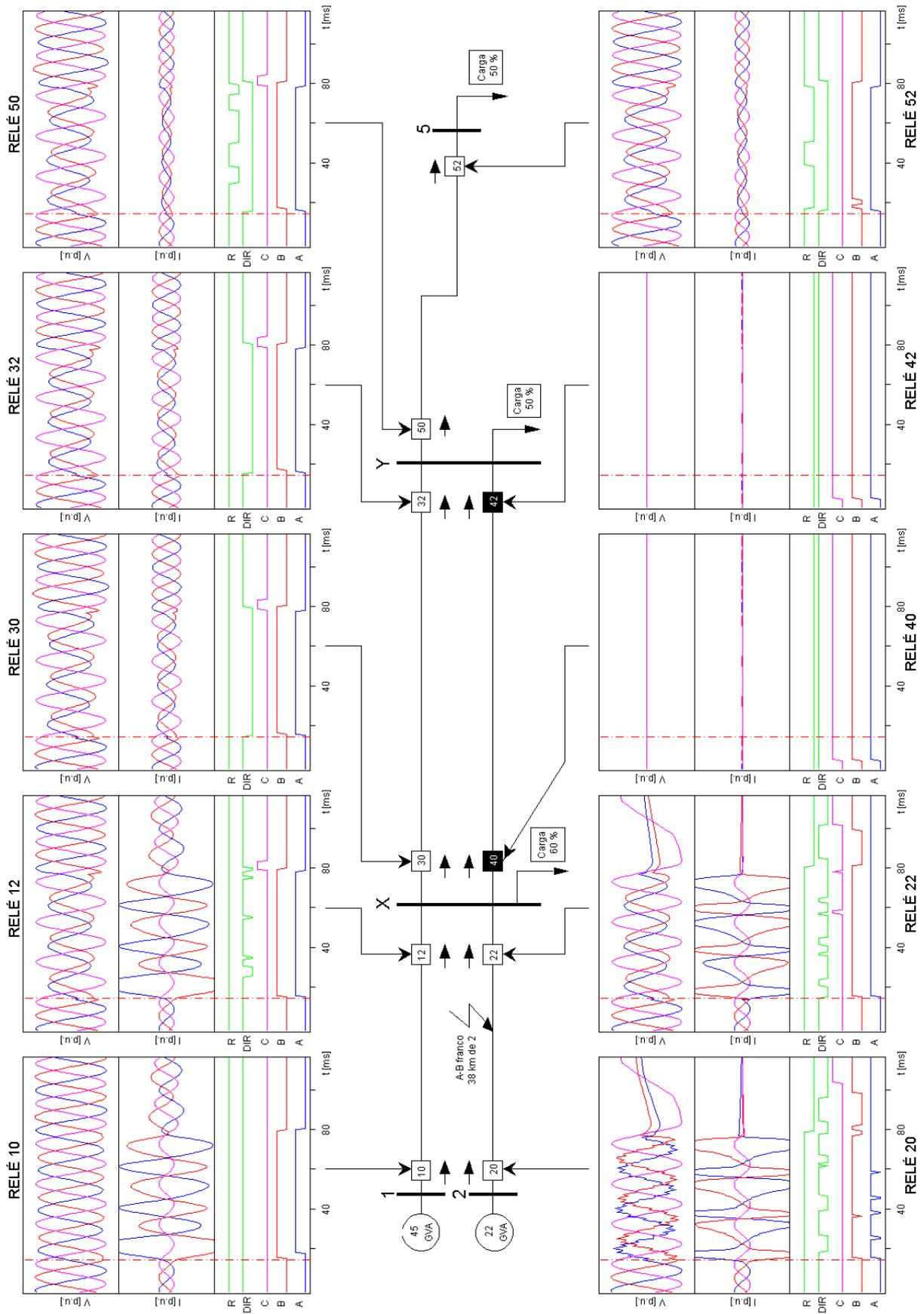


Fig. A.19 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A y B, y a 38 km de la barra 2.

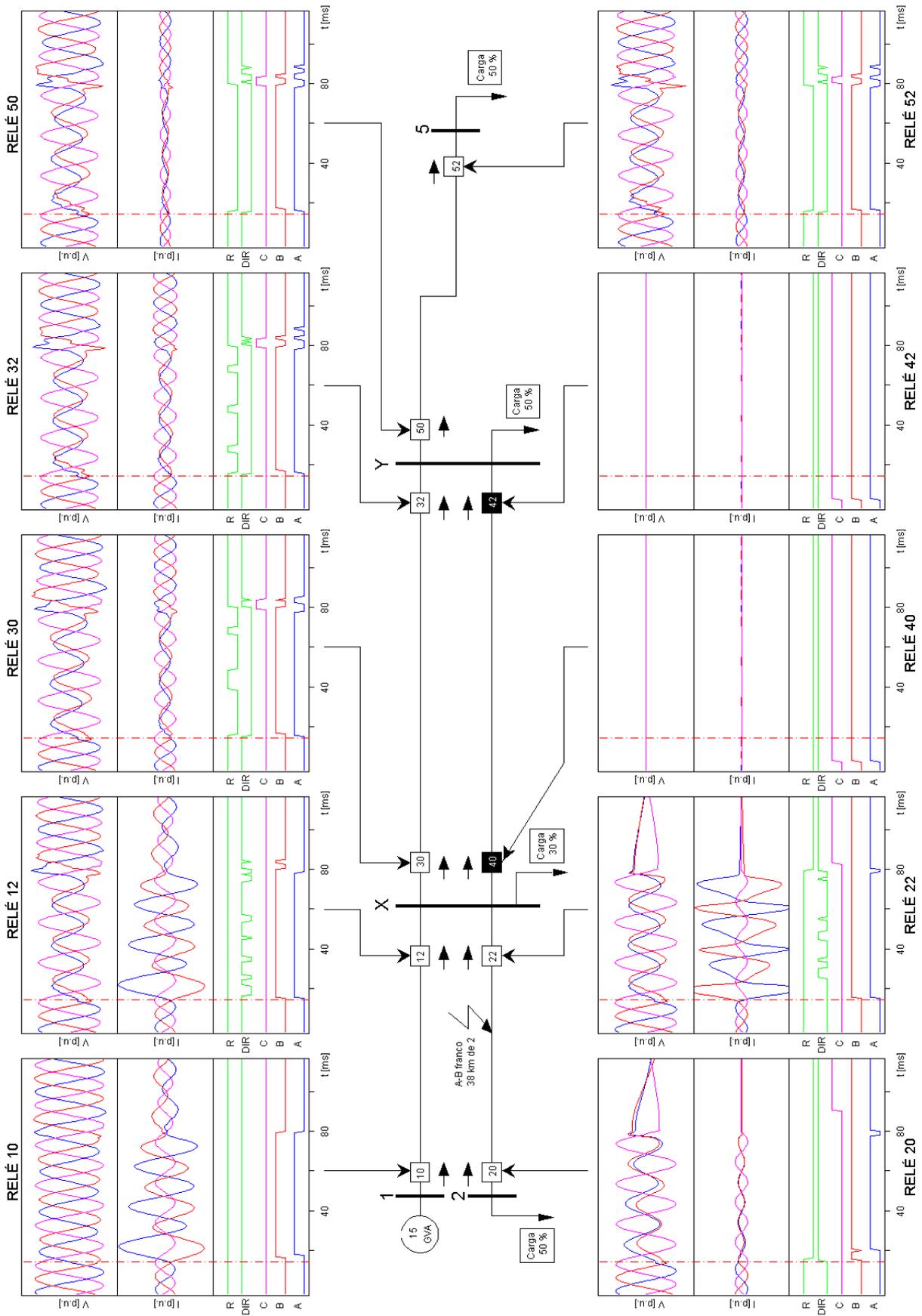


Fig. A.20 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A y B, y a 38 km de la barra 2.

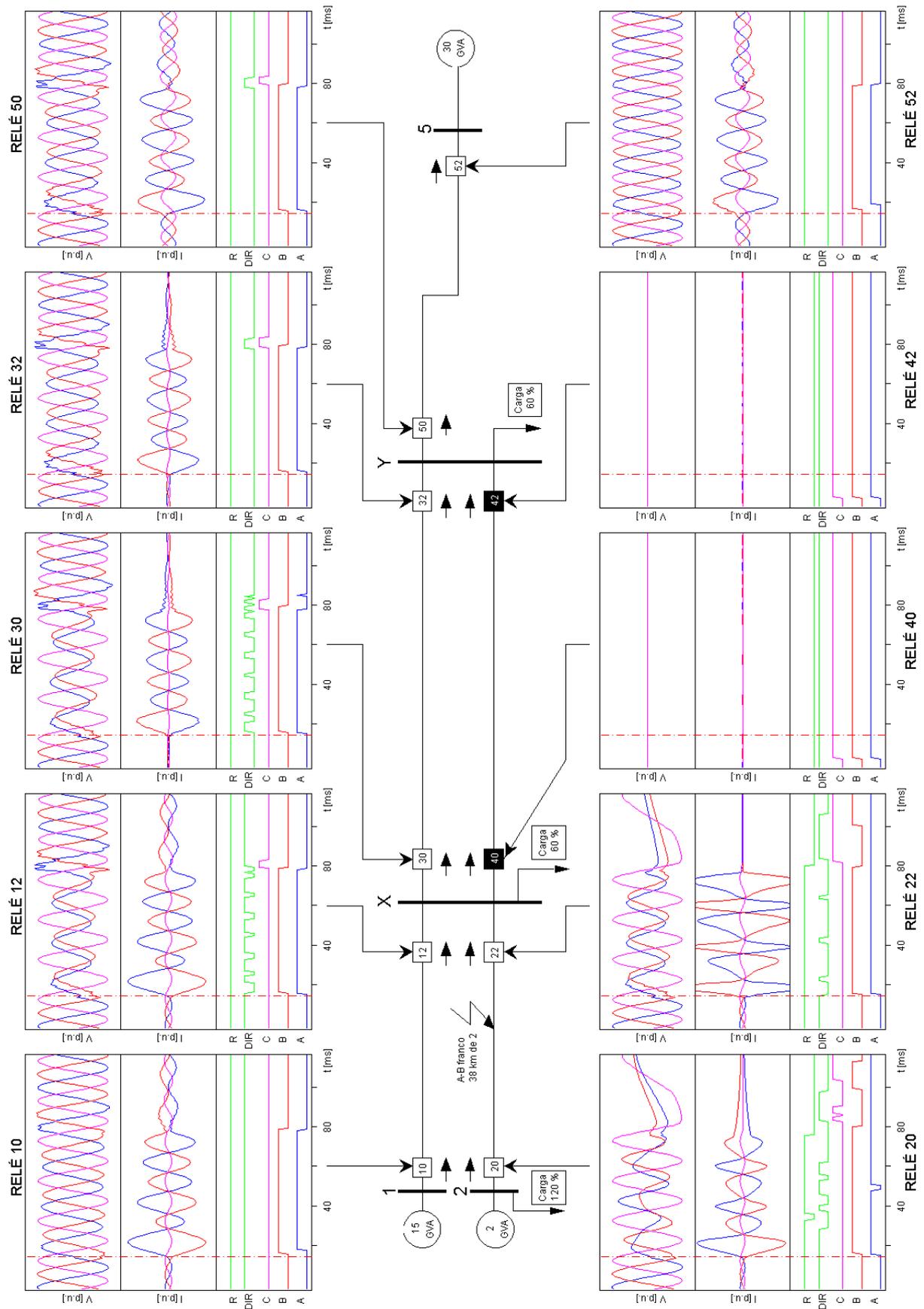


Fig. A.21 Respuesta del relé MWF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A y B, y a 38 km de la barra 2.

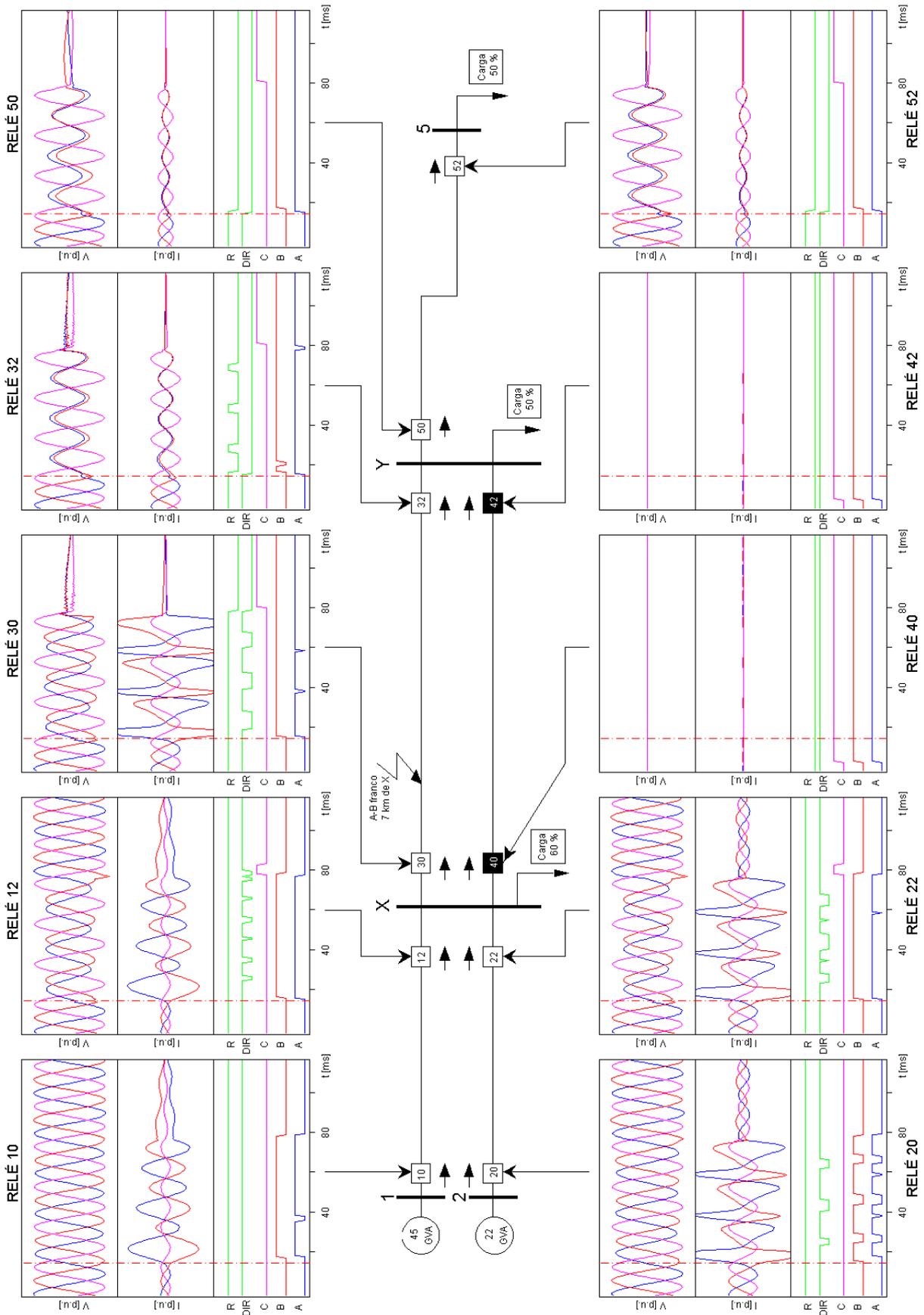


Fig. A.22 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A y B, y a 7 km de la barra X.

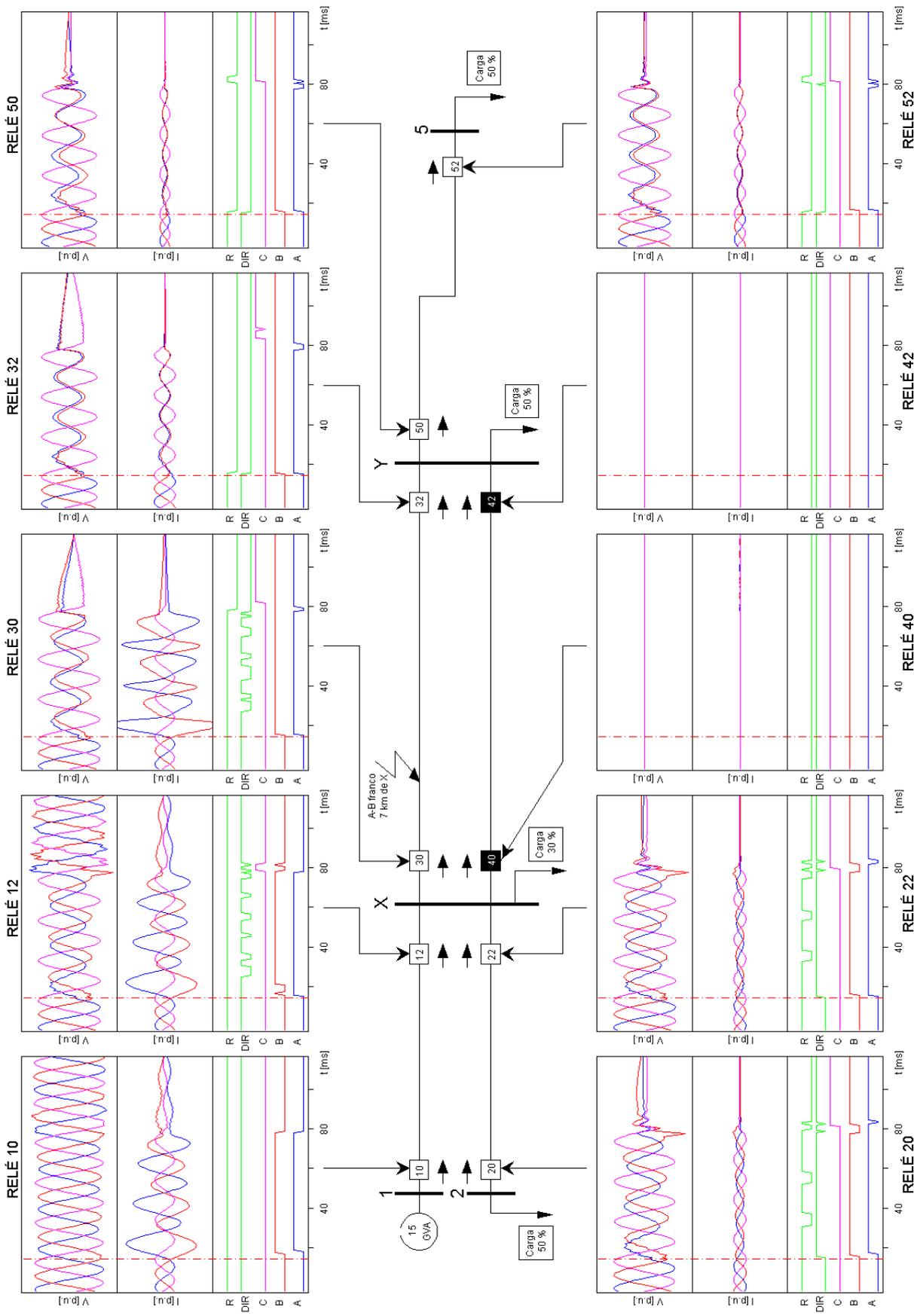


Fig. A.23 Respuesta del relé MFL-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A y B, y a 7 km de la barra X.

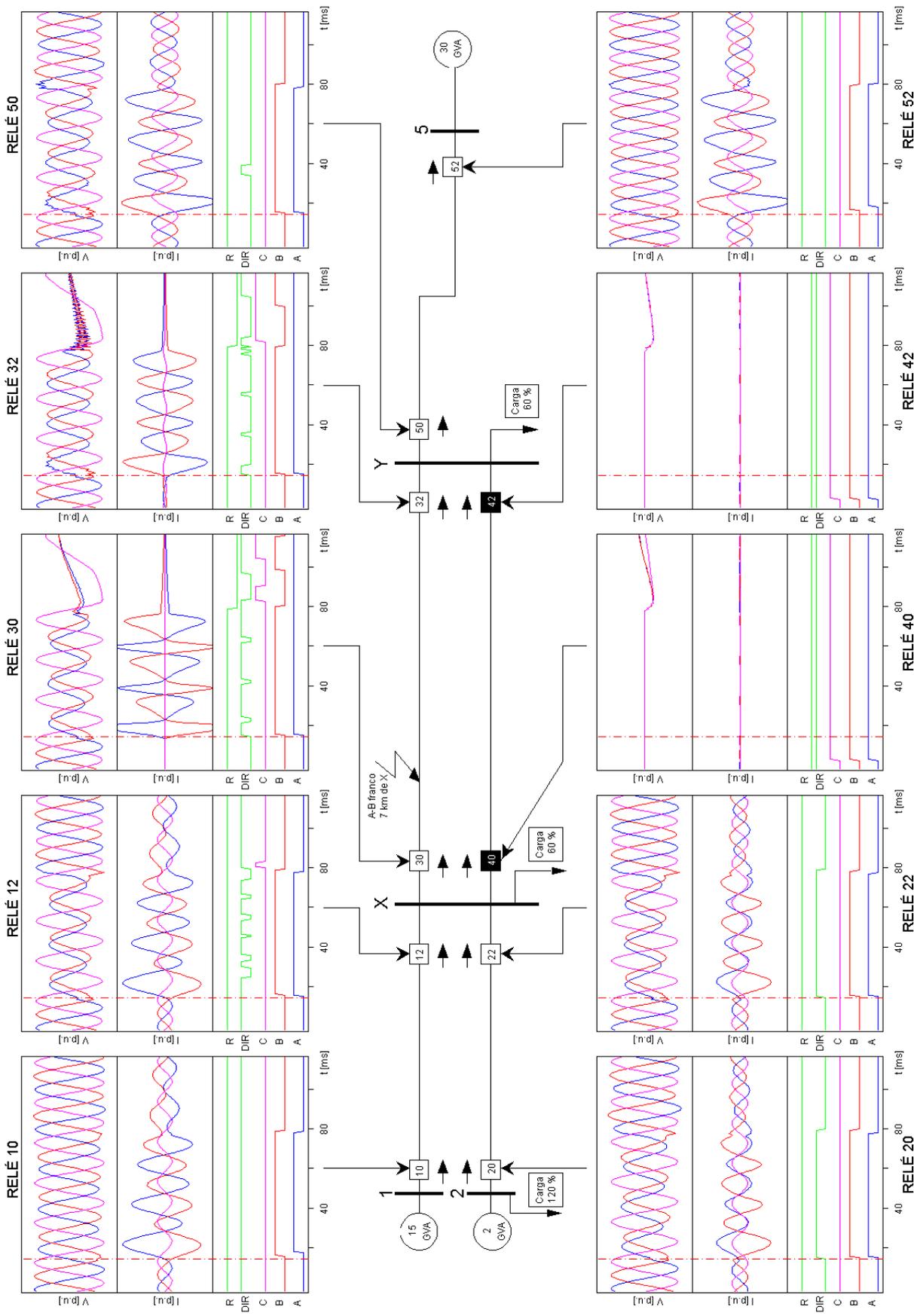


Fig. A.24 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A Y B, y a 7 km de la barra X.

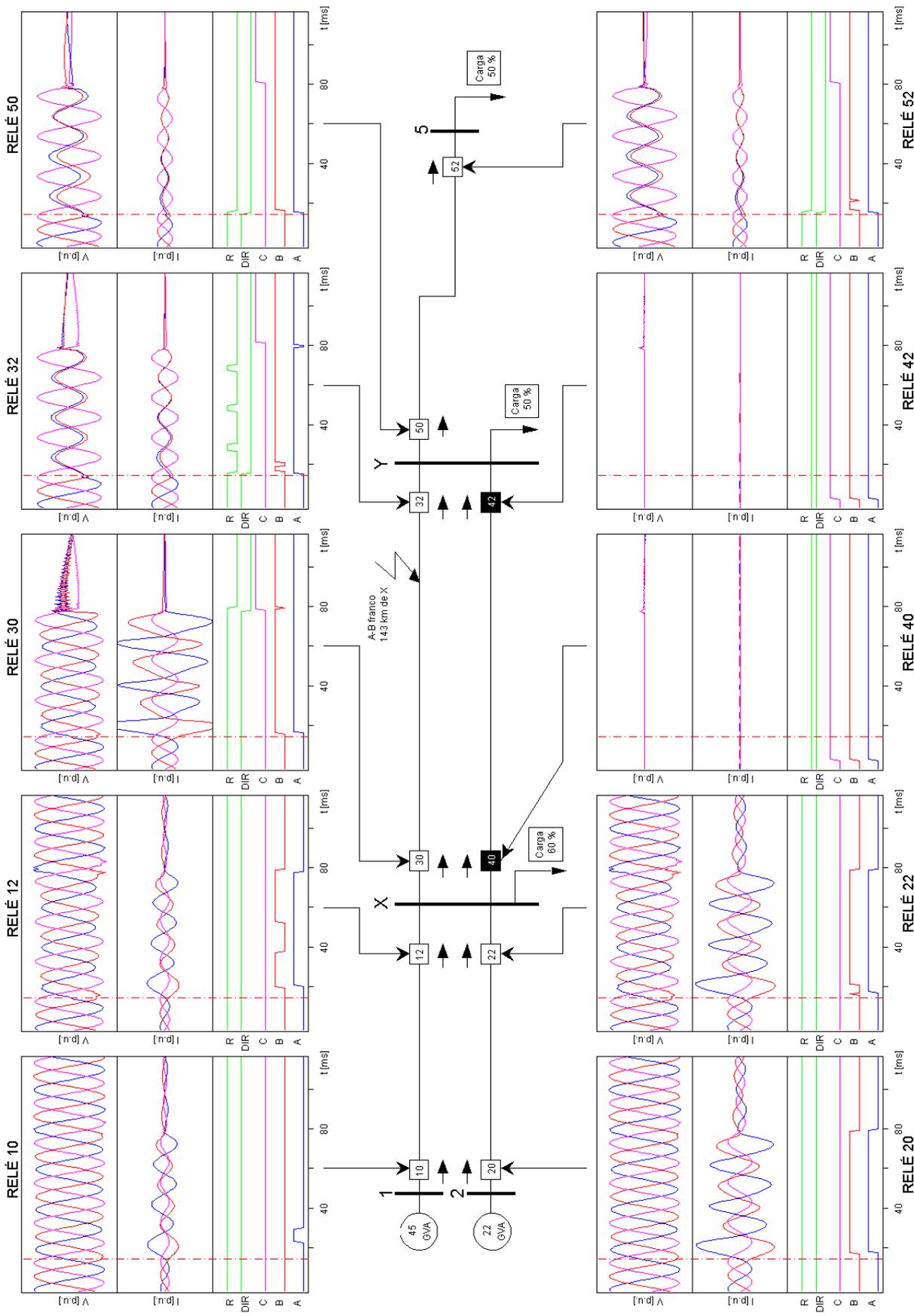


Fig. A.25 Respuesta del relé MFL-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A y B, y a 143 km de la barra X.

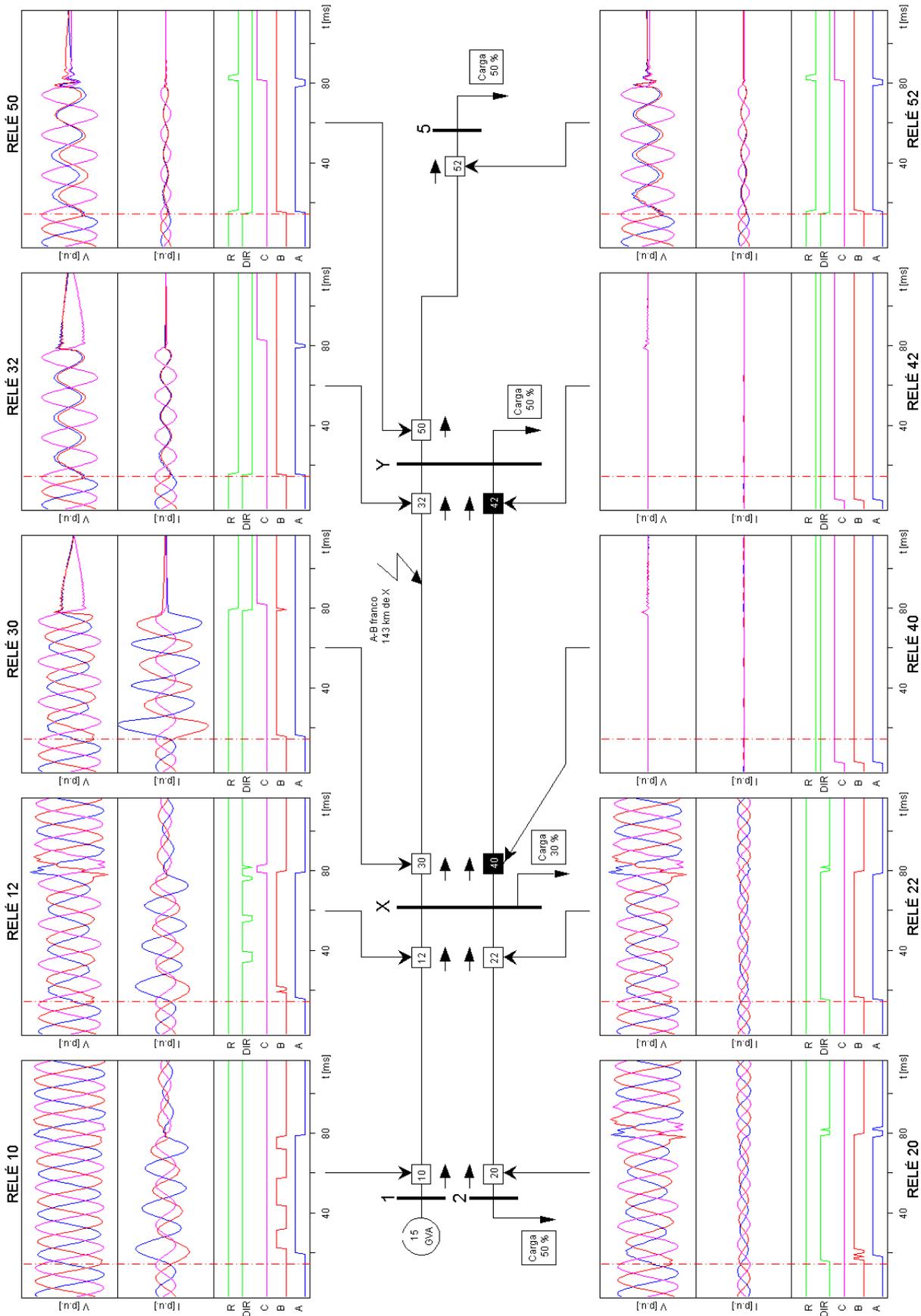


Fig. A.26 Respuesta del relé MFL-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A y B, y a 143 km de la barra X.

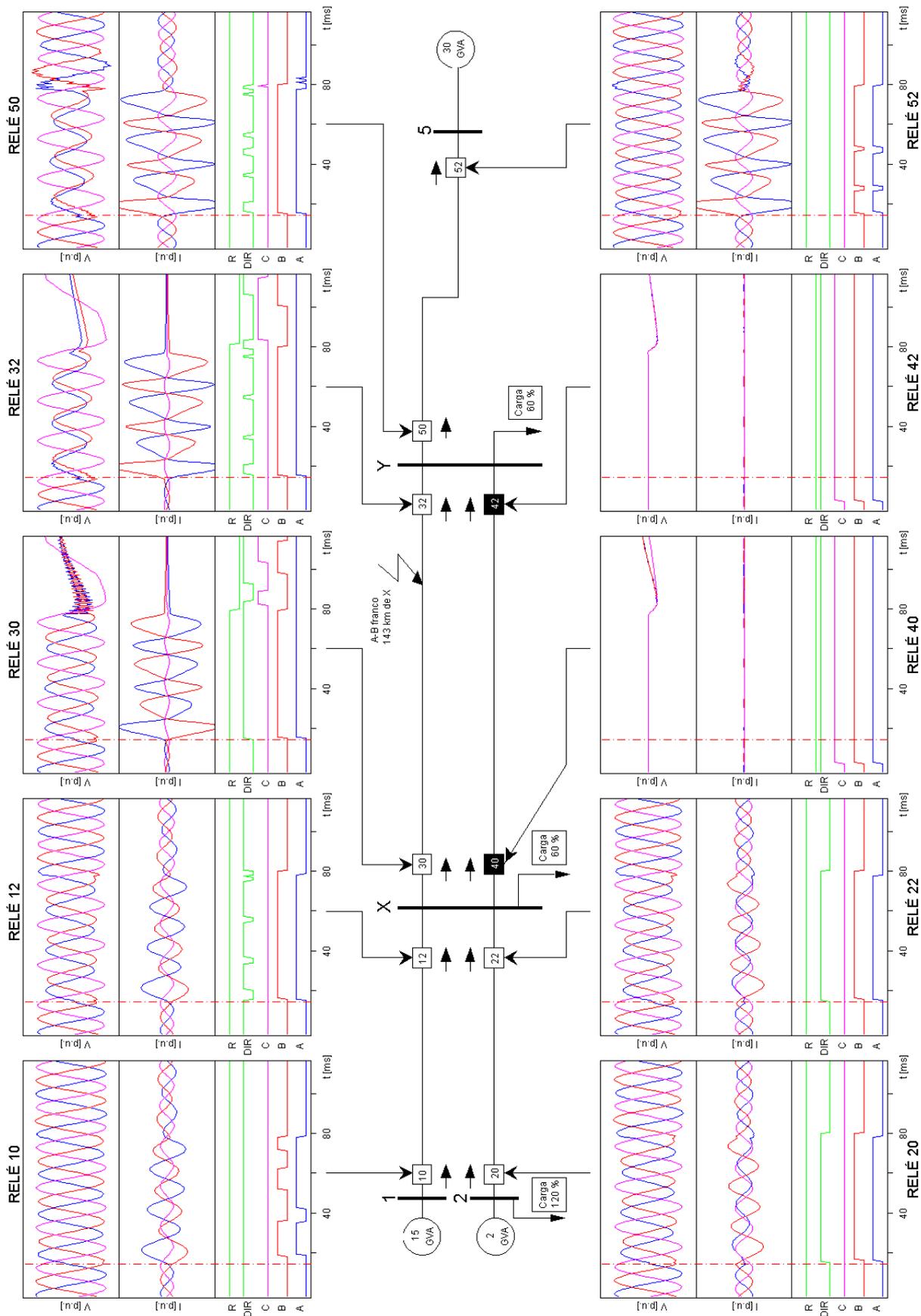


Fig. A.27 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A y B, y a 143 km de la barra X.

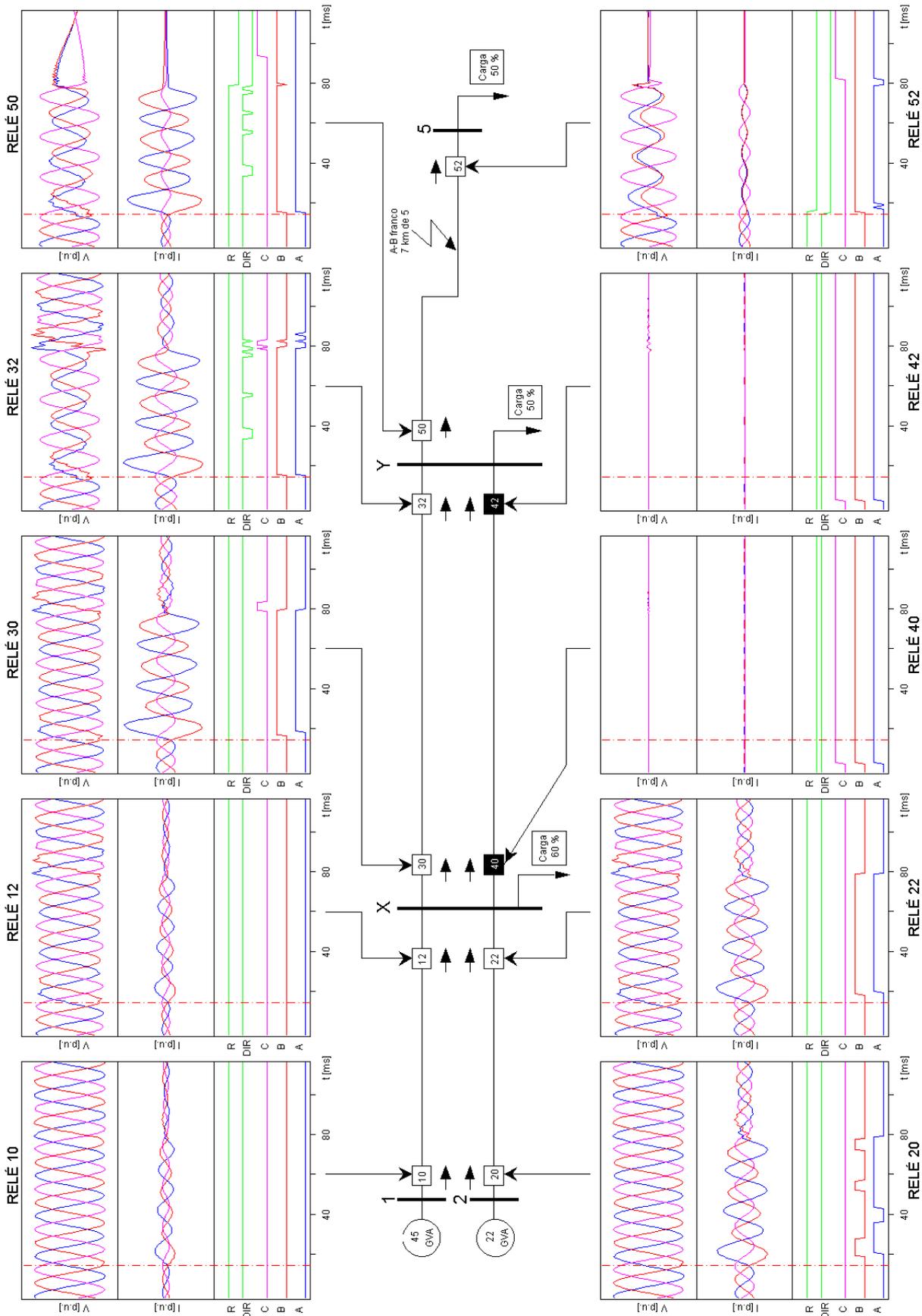


Fig. A.28 Respuesta del relé MFL-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A y B, y a 5 km de la barra 5.

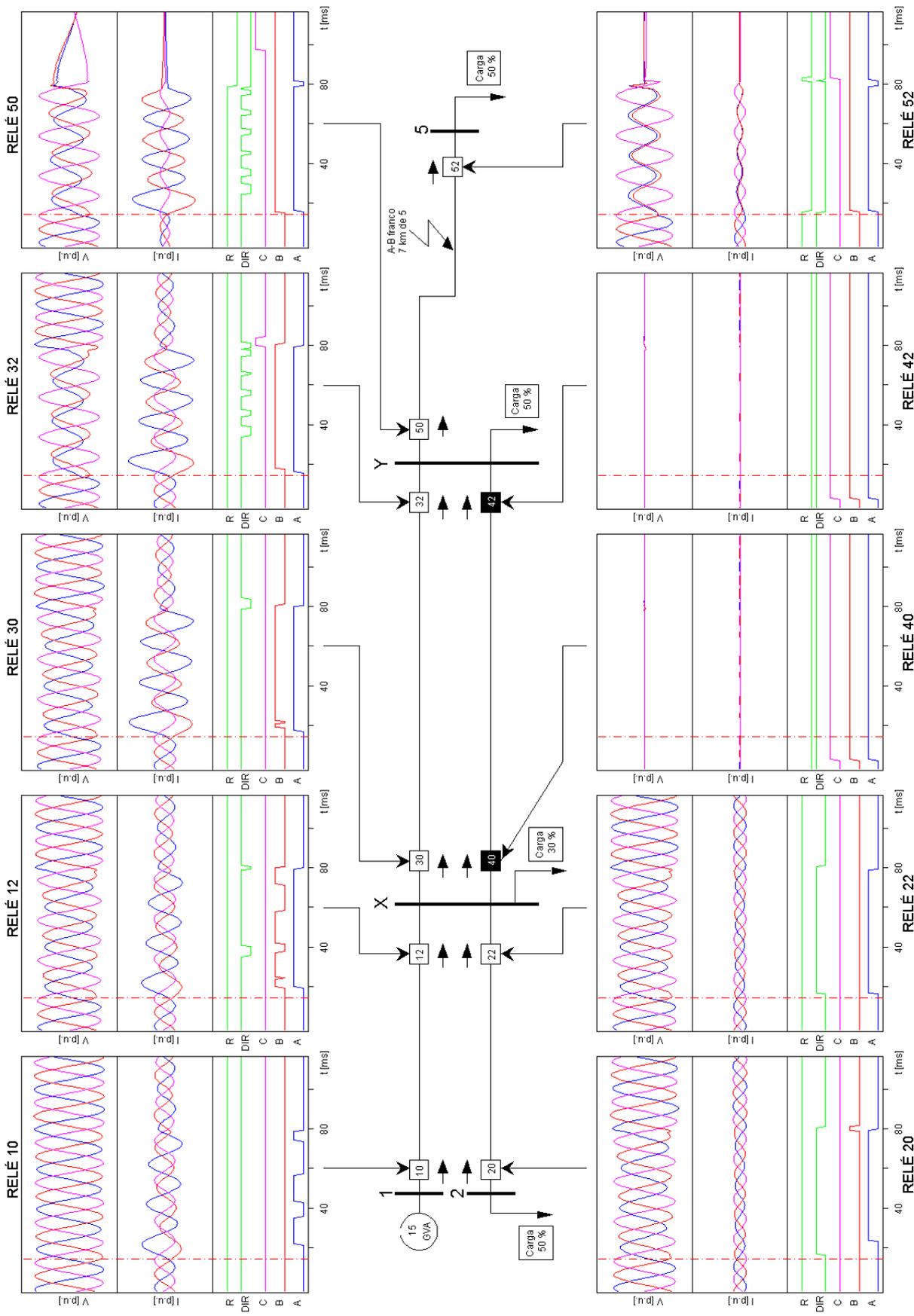


Fig. A.29 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A y B, y a 5 km de la barra 5.

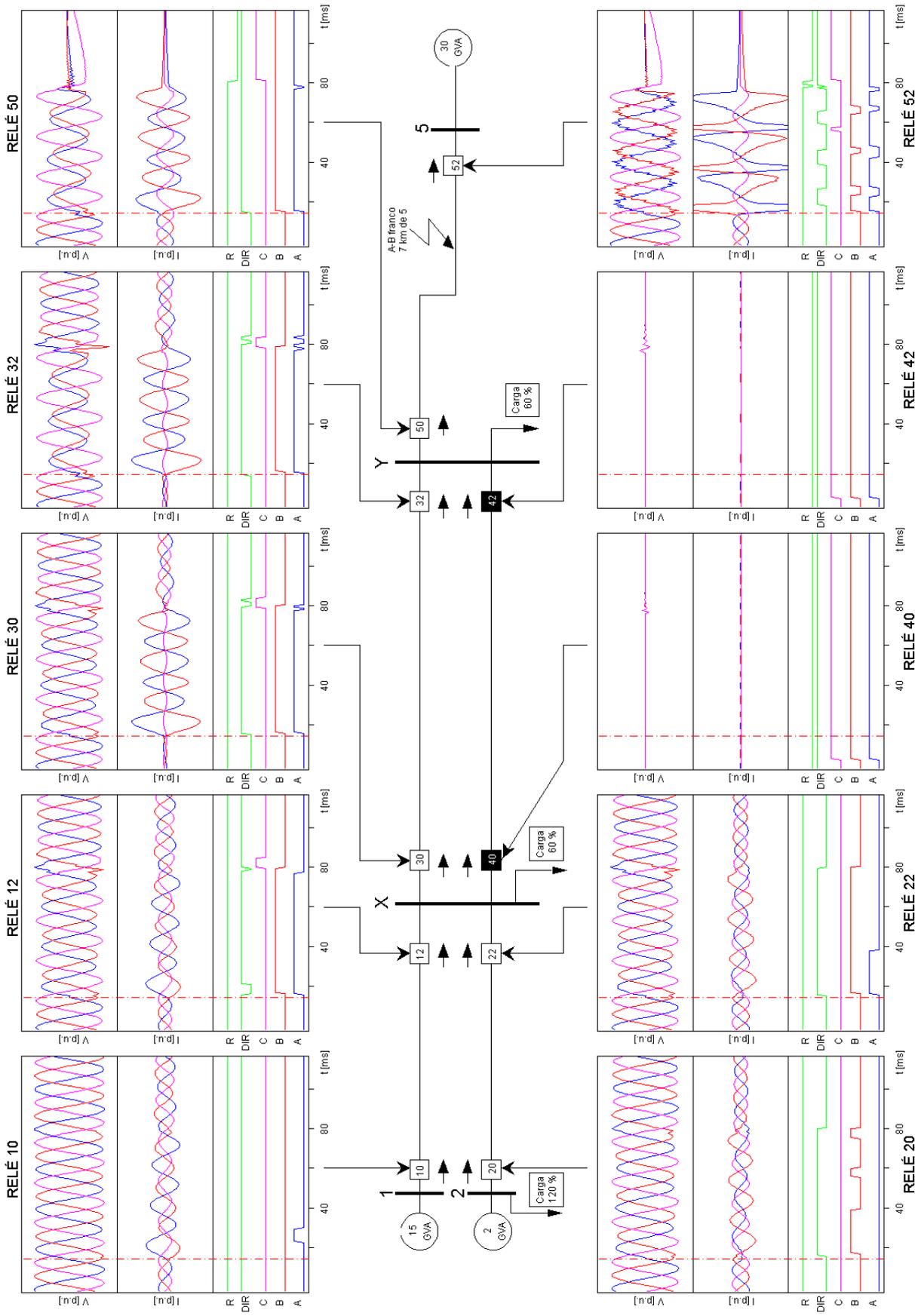


Fig. A.30 Respuesta del relé MFL-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A y B, y a 5 km de la barra 5.

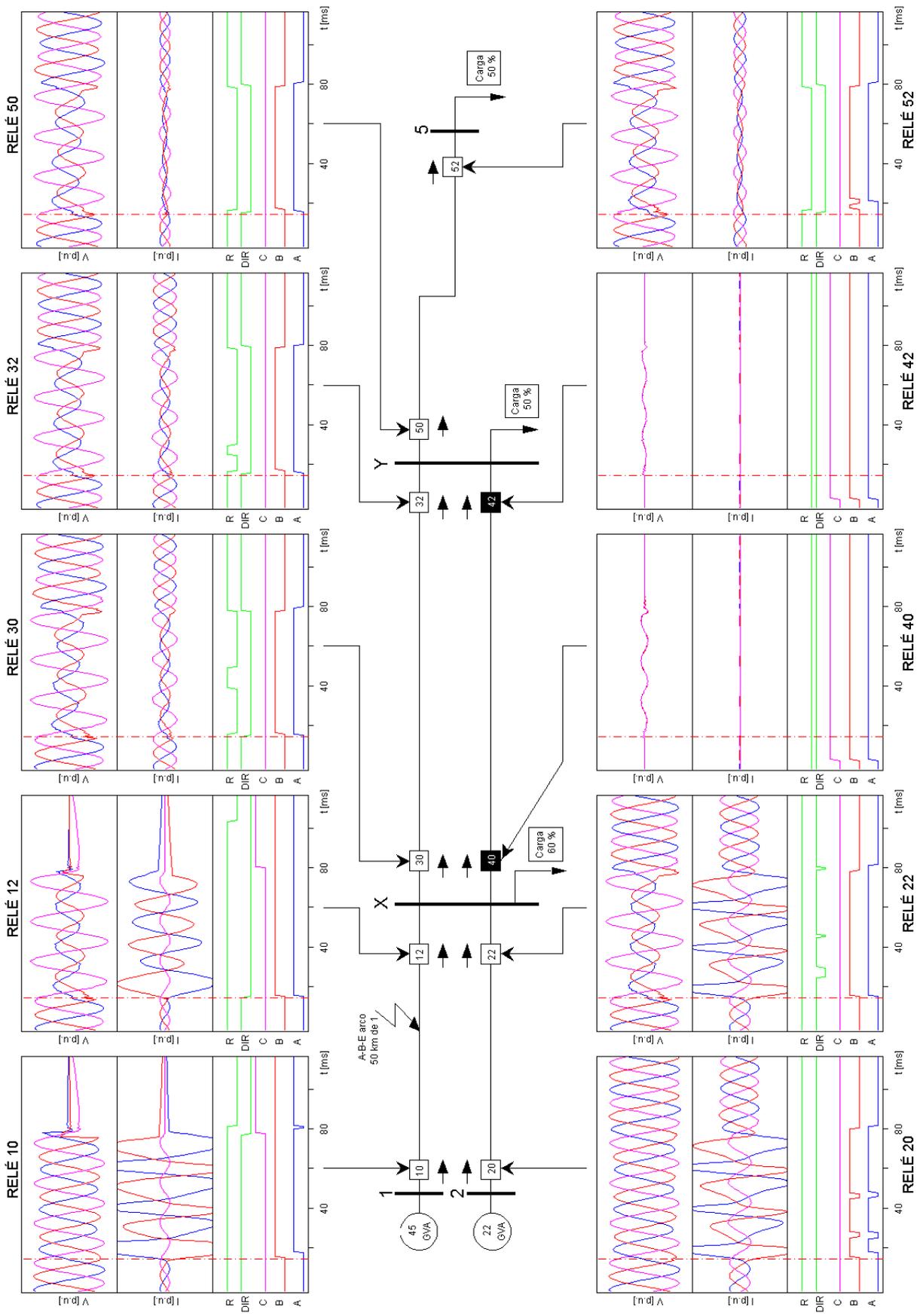


Fig. A.31 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre la fase A, la fase B y tierra con arco de 35 kV, y a 50 km de la barra 1.

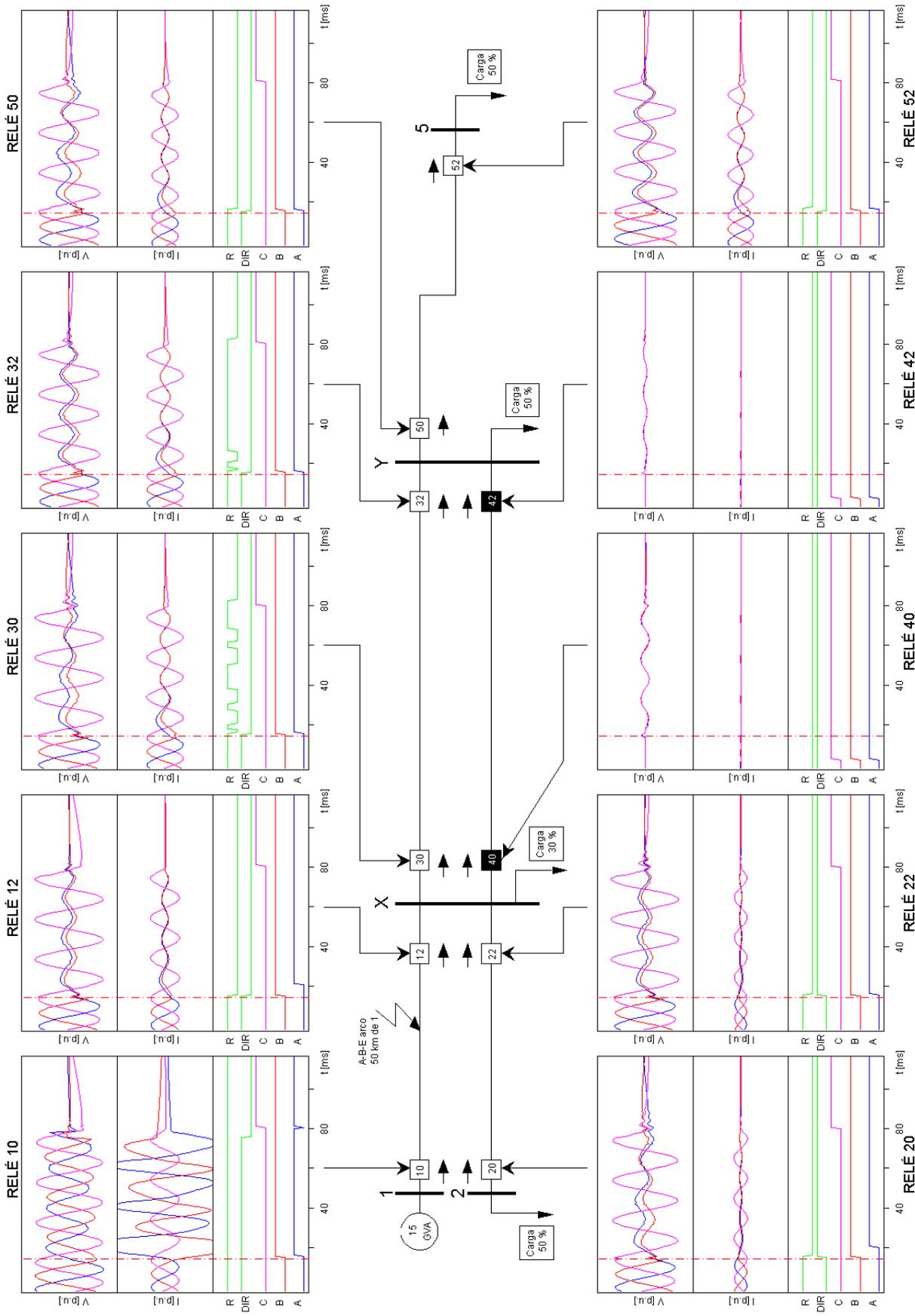


Fig. A.32 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre la fase A, la fase B y tierra con arco de 35 kV, y a 50 km de la barra 1.

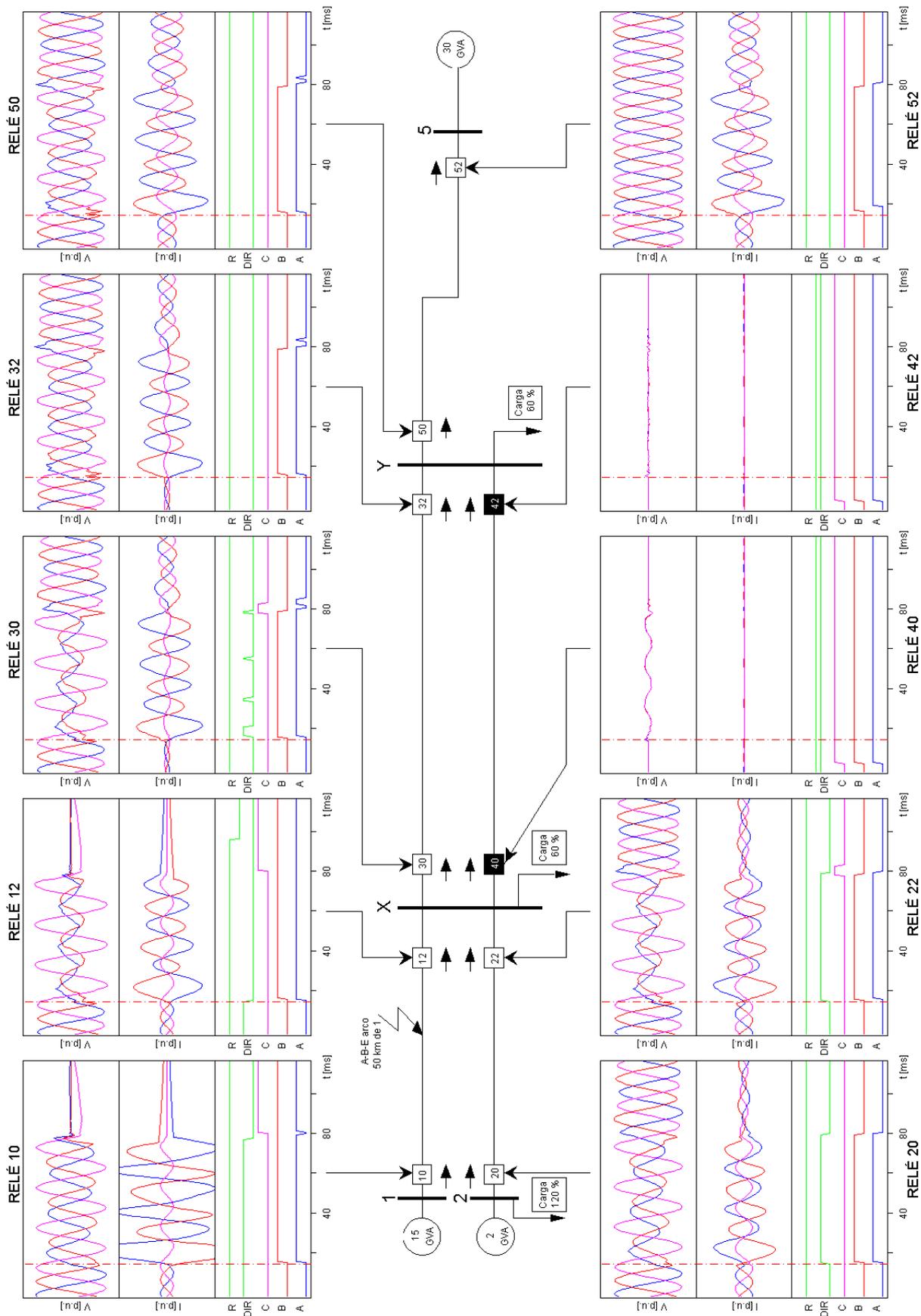


Fig. A.33 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre la fase A, la fase B y tierra con arco de 35 kV, y a 50 km de la barra 1.

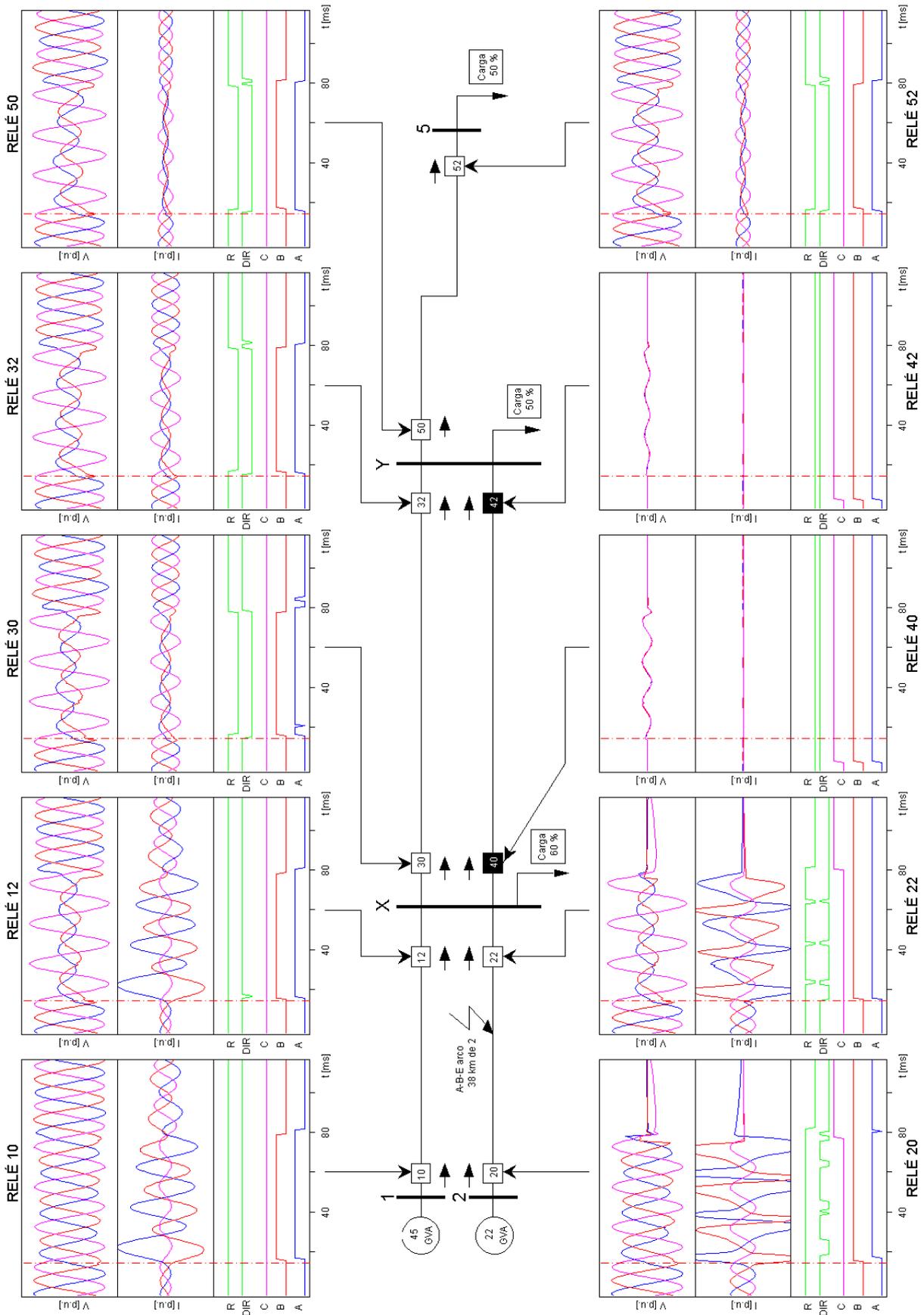


Fig. A.34 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre la fase A, la fase B y tierra con arco de 35 kV, y a 38 km de la barra 2.

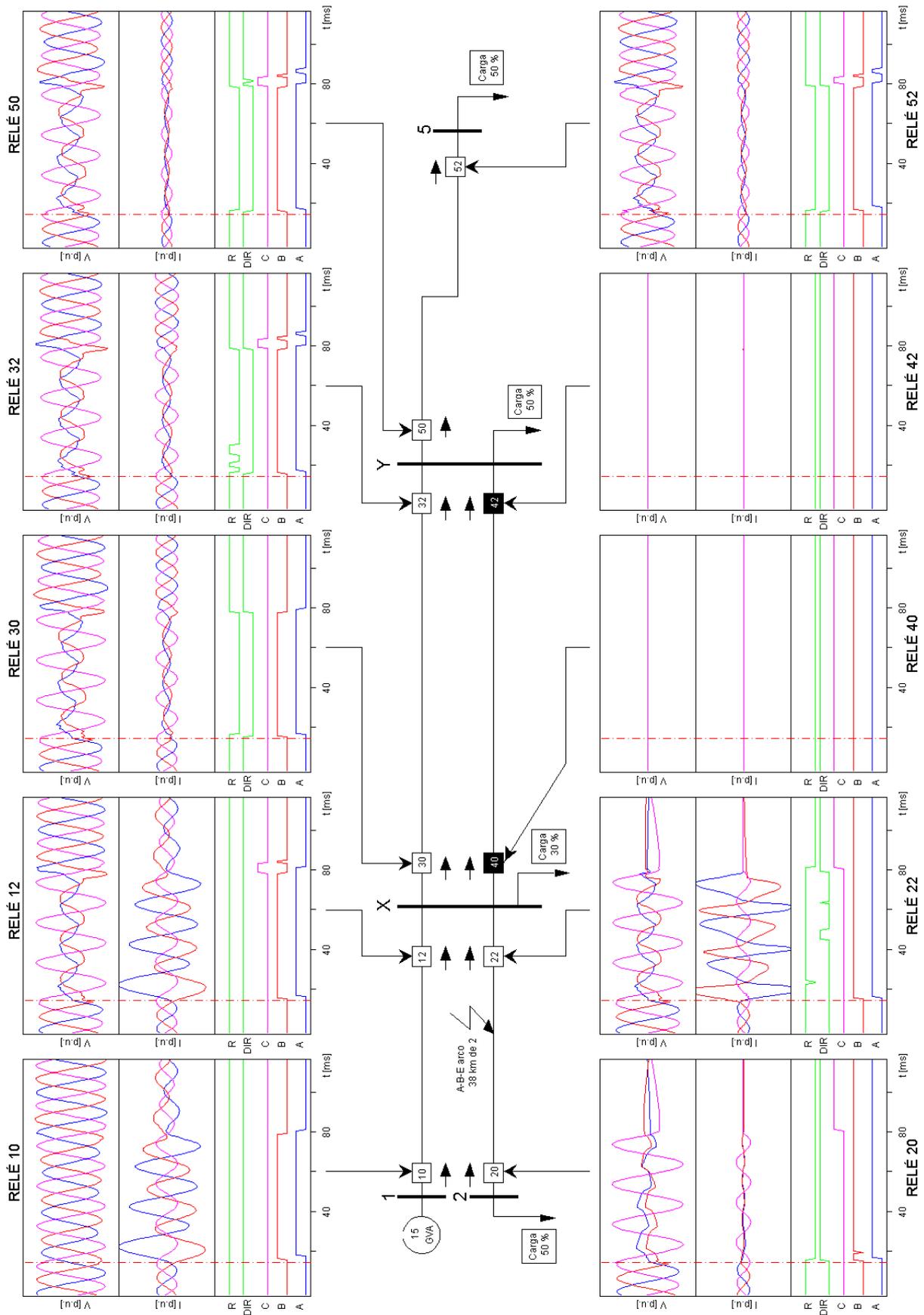


Fig. A.35 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A, B y tierra con arco de 35 kV, y a 38 km de la barra 2.

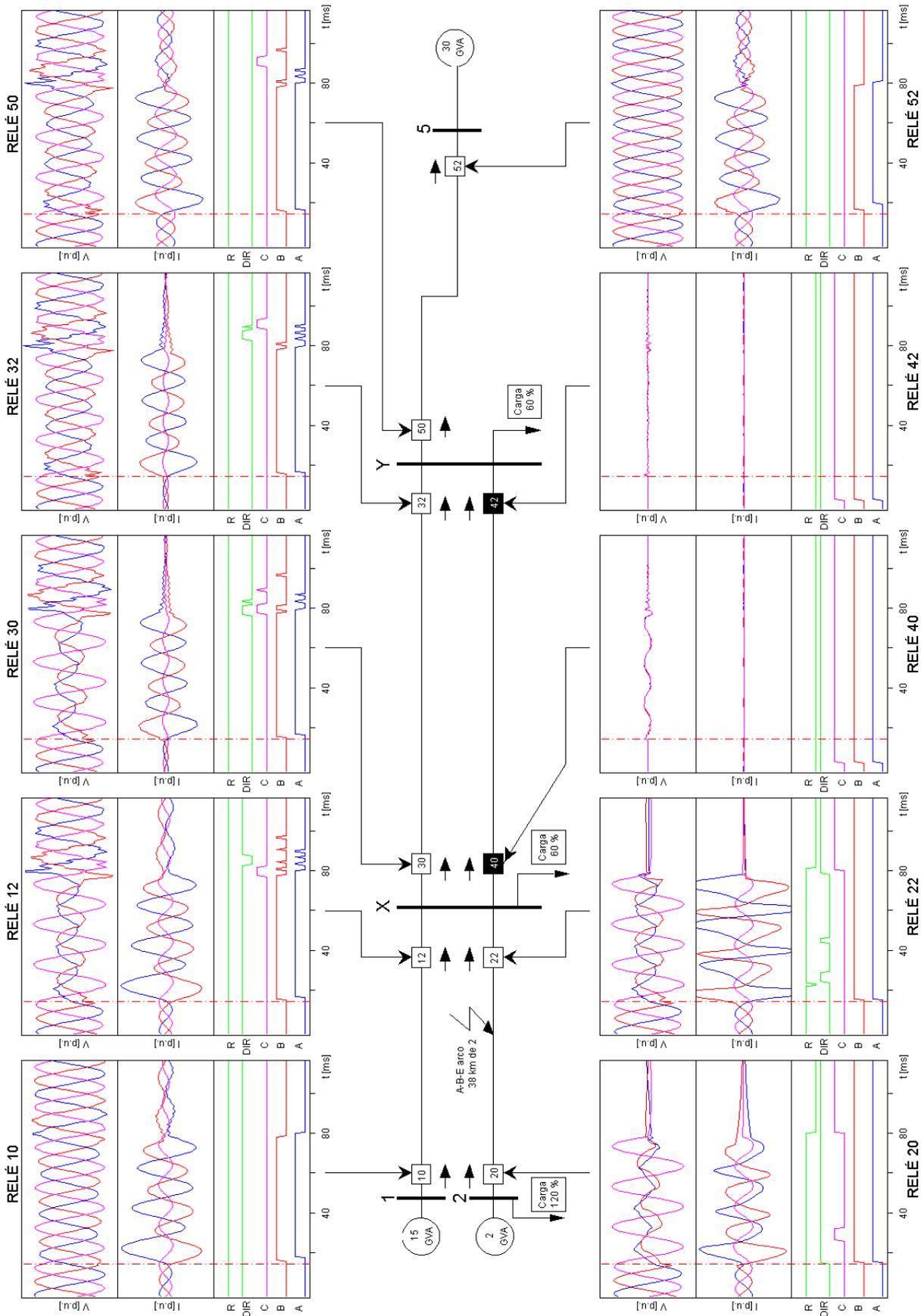


Fig. A.36 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre la fase B y tierra con arco de 35 kV, y a 38 km de la barra 2.

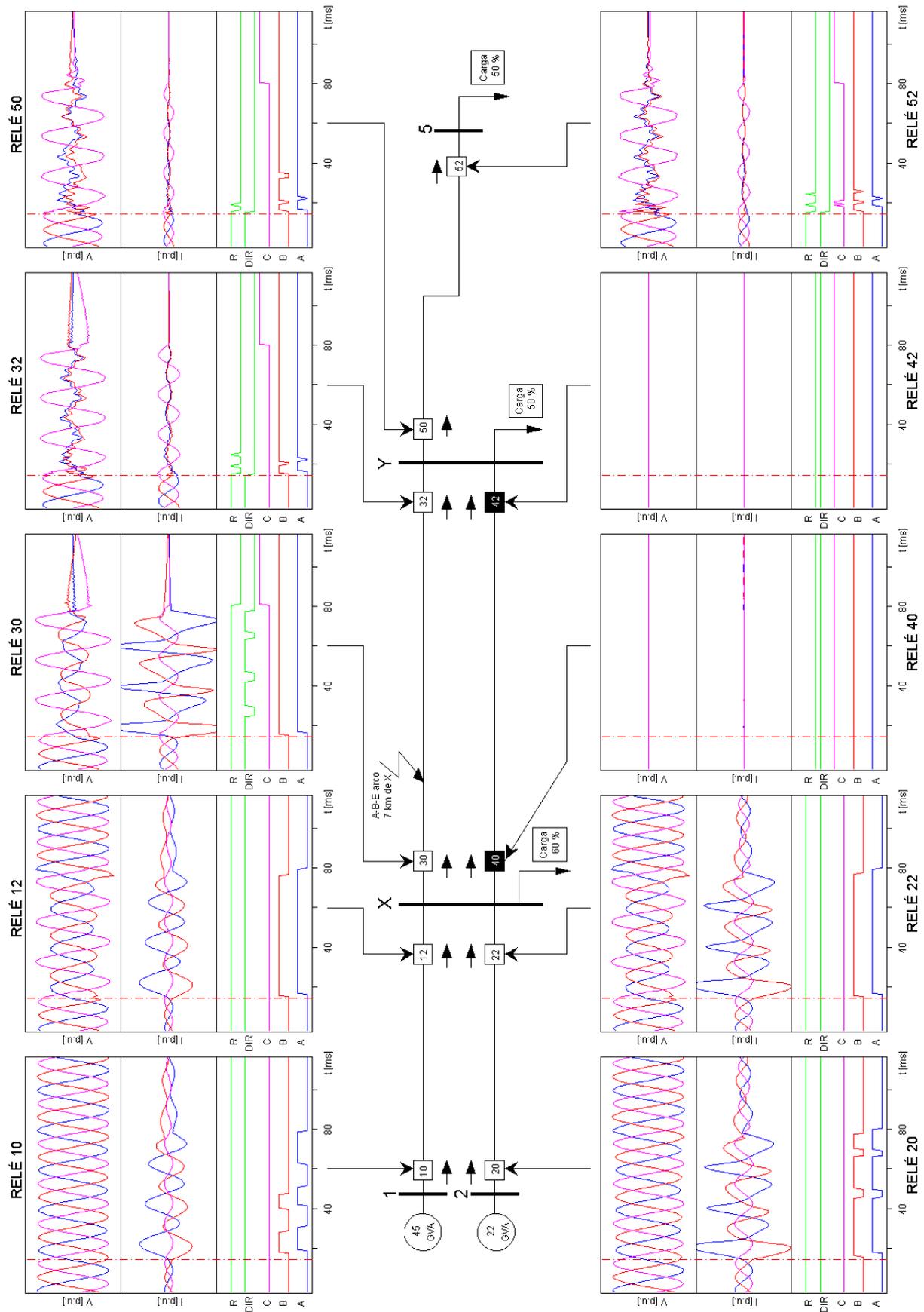


Fig. A.37 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre la fase B y tierra con arco de 35 kV, y a 7 km de la barra X.

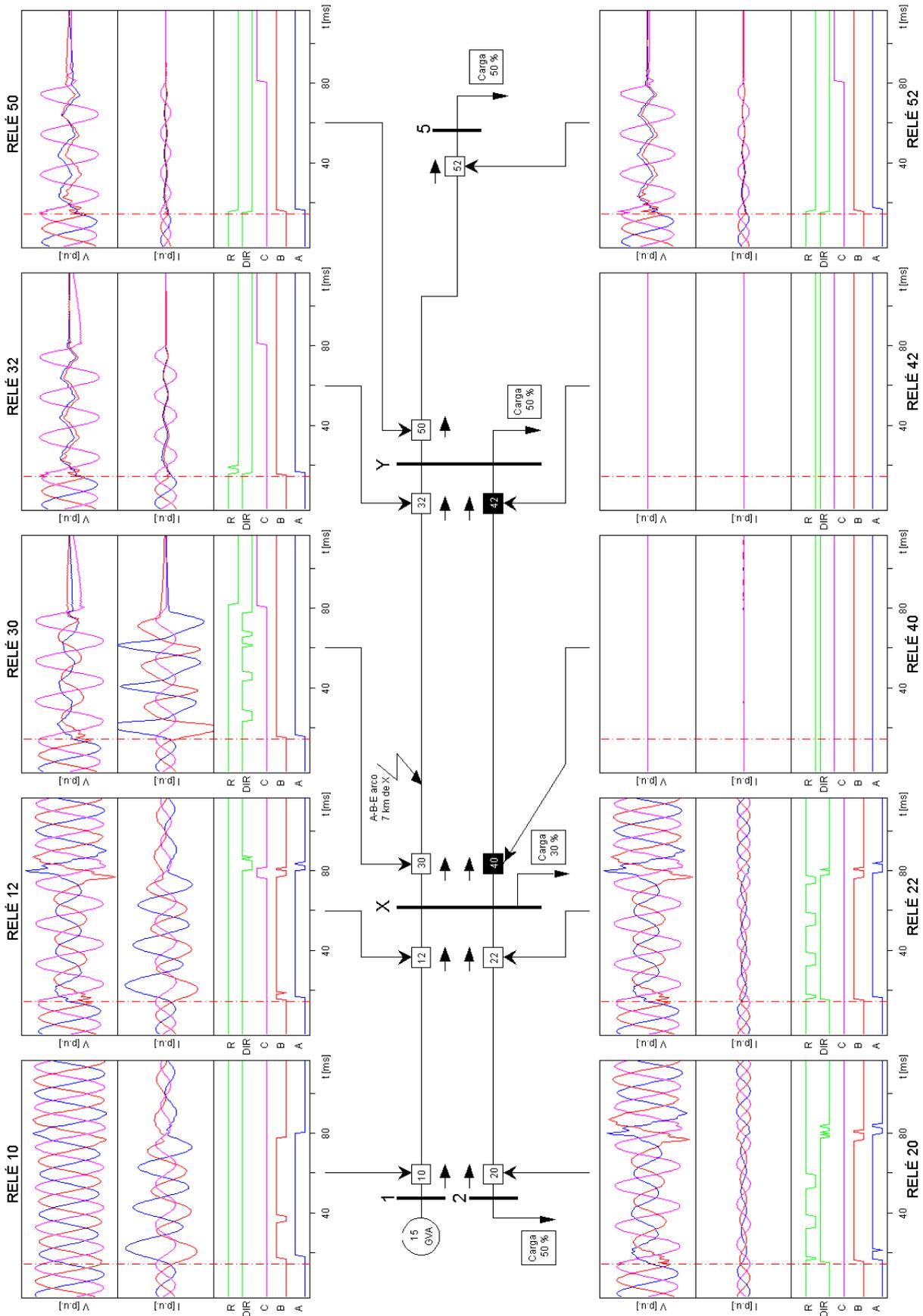


Fig. A.38 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre la fase B y tierra con arco de 35 kV, y a 7 km de la barra X.

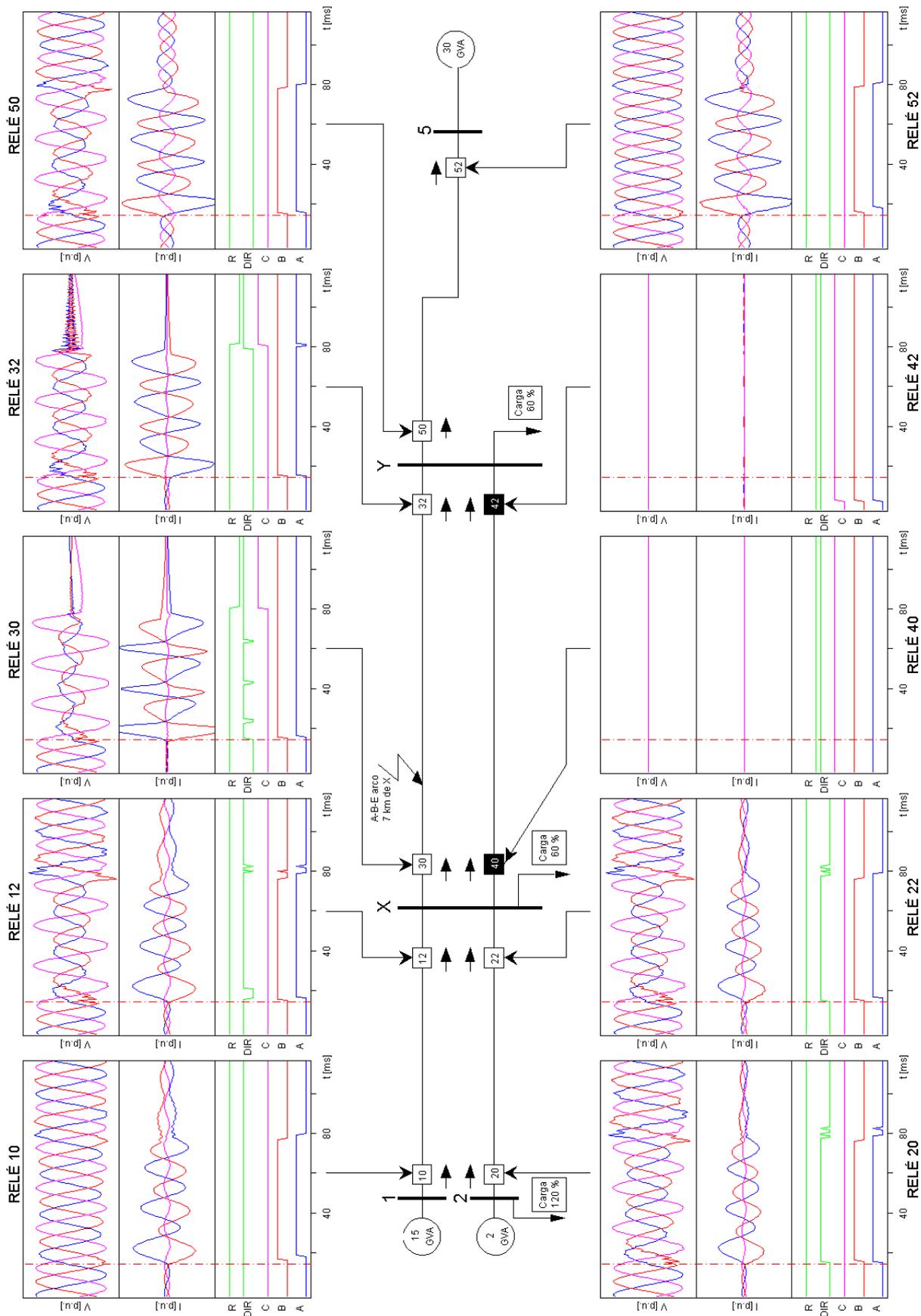


Fig. A.39 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre la fase A, la fase B y tierra con arco de 35 kV, y a 7 km de la barra X.

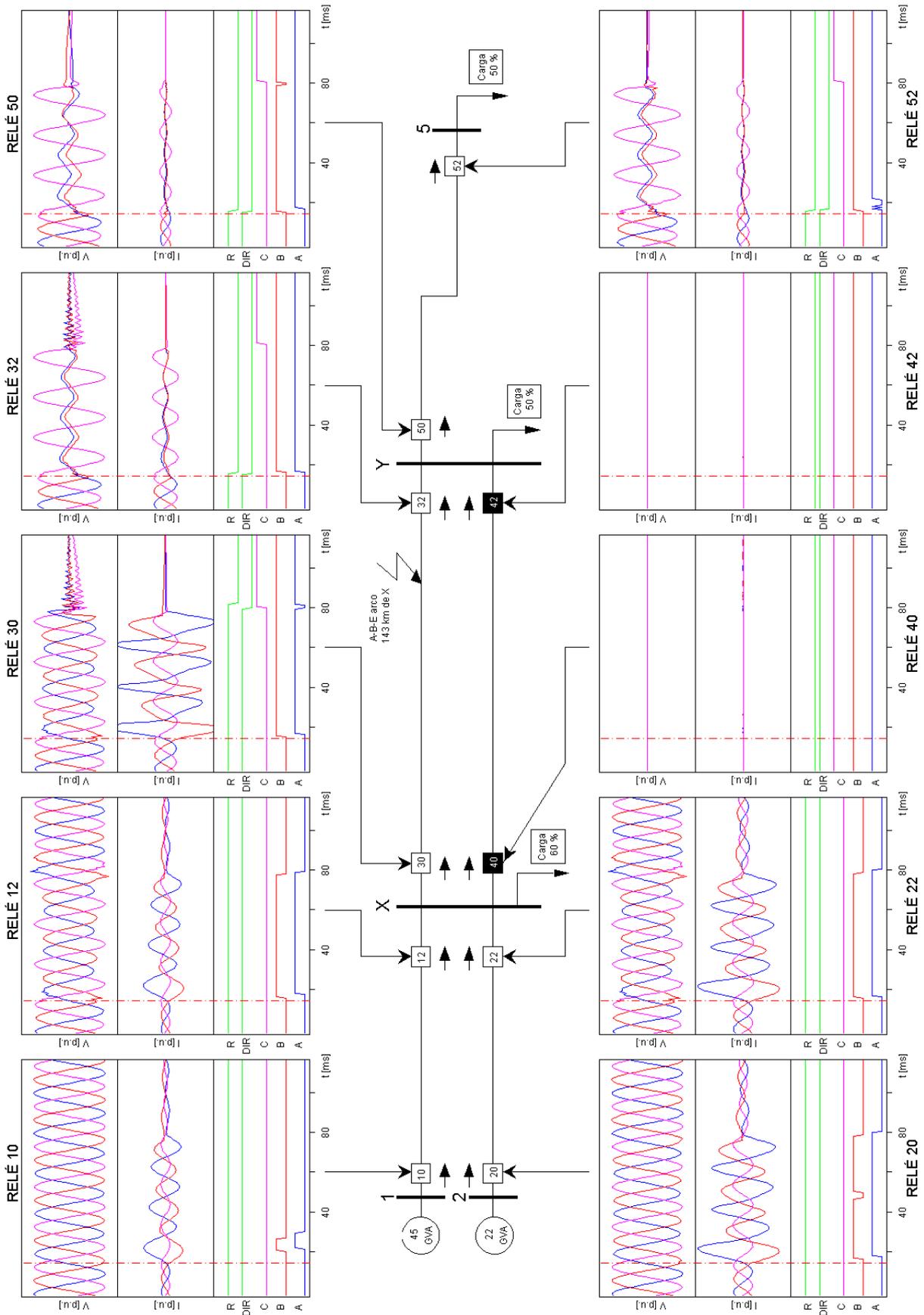


Fig. A.40 Respuesta del relé MLI-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre la fase A, la fase B y tierra con arco de 35 kV, y a 143 km de la barra X.

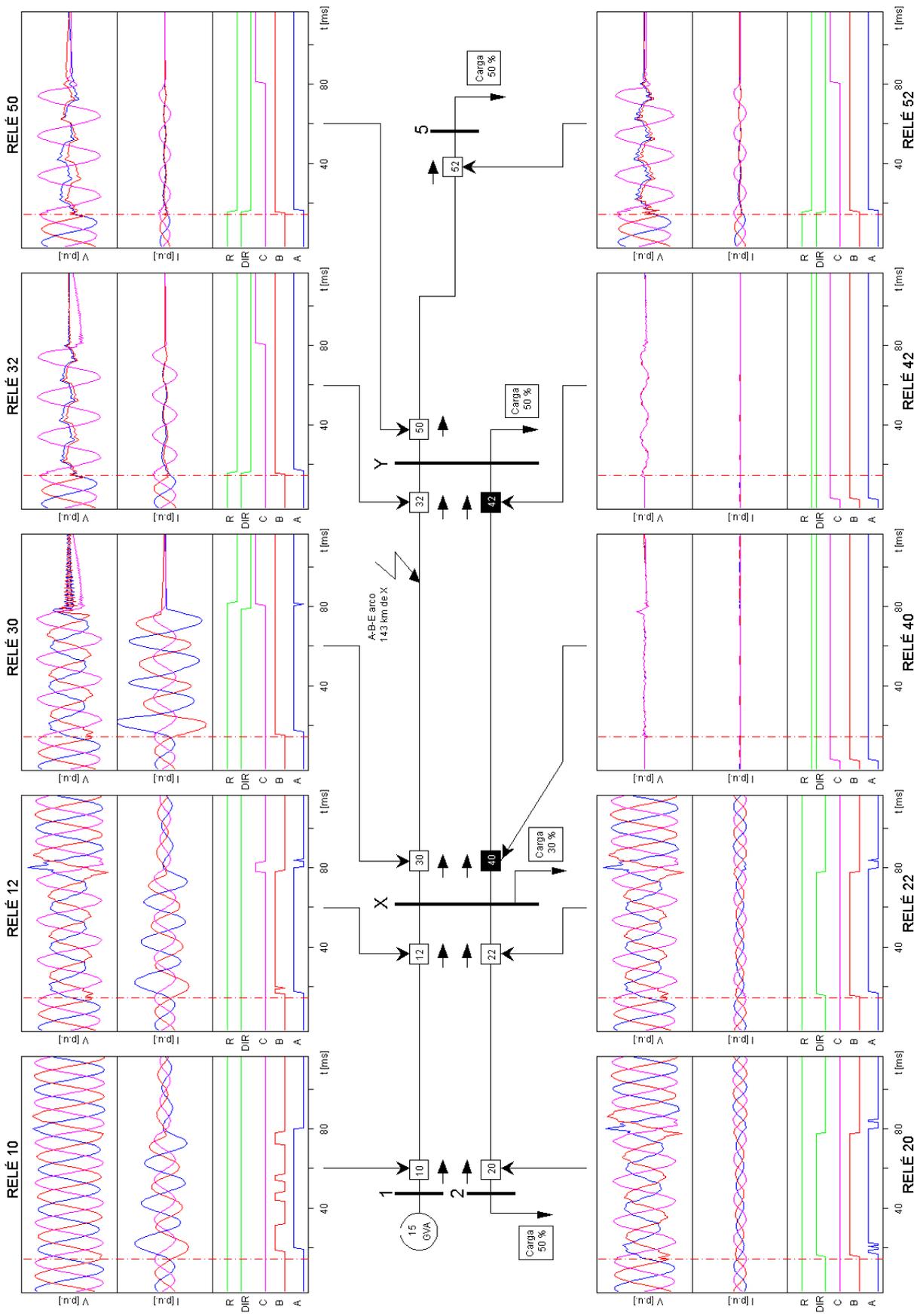


Fig. A.41 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre la fase A, la fase B y tierra con arco de 35 kV, y a 143 km de la barra X.

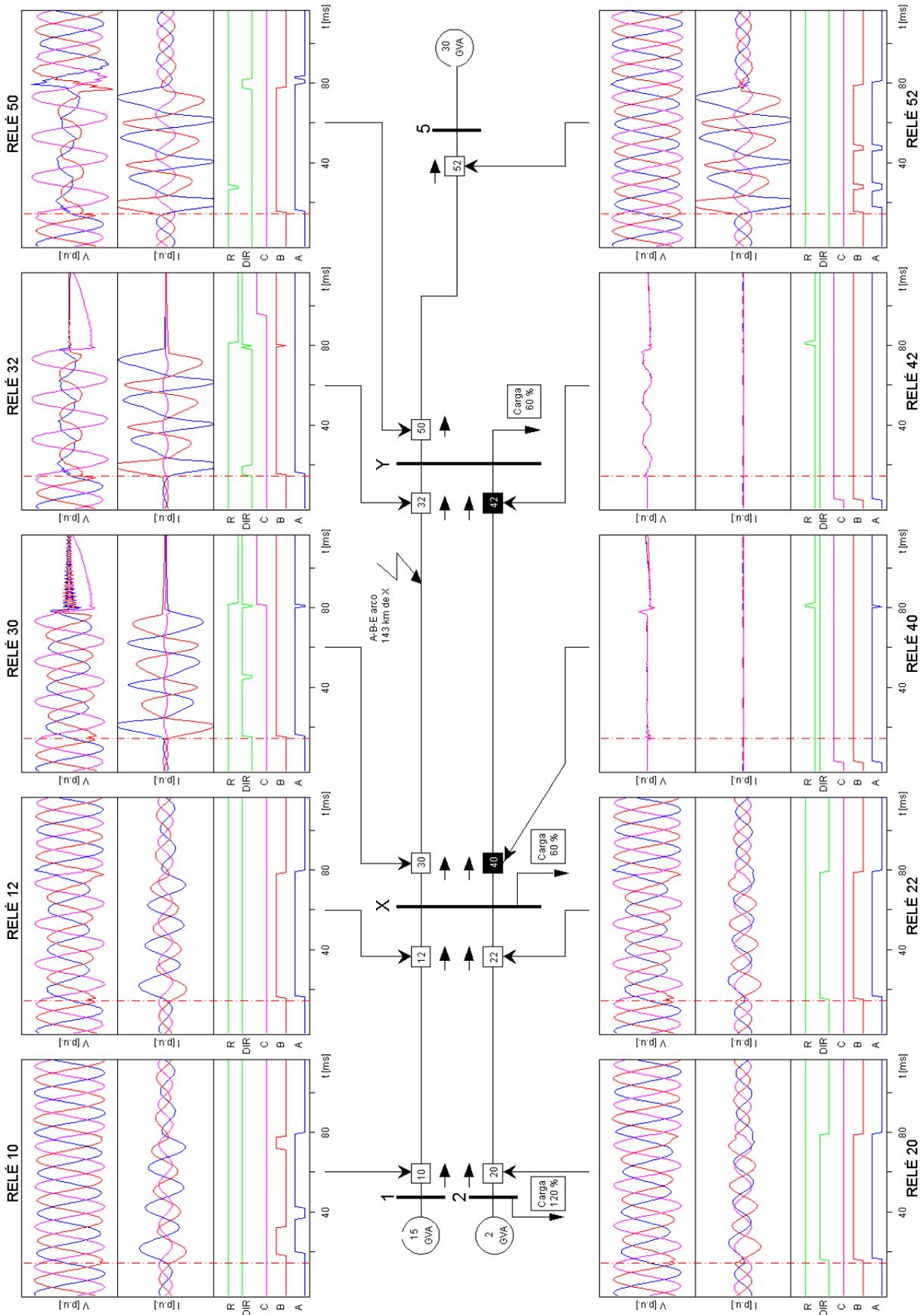


Fig. A.42 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A, B y tierra con arco de 35 kV, y a 143 km de la barra X.

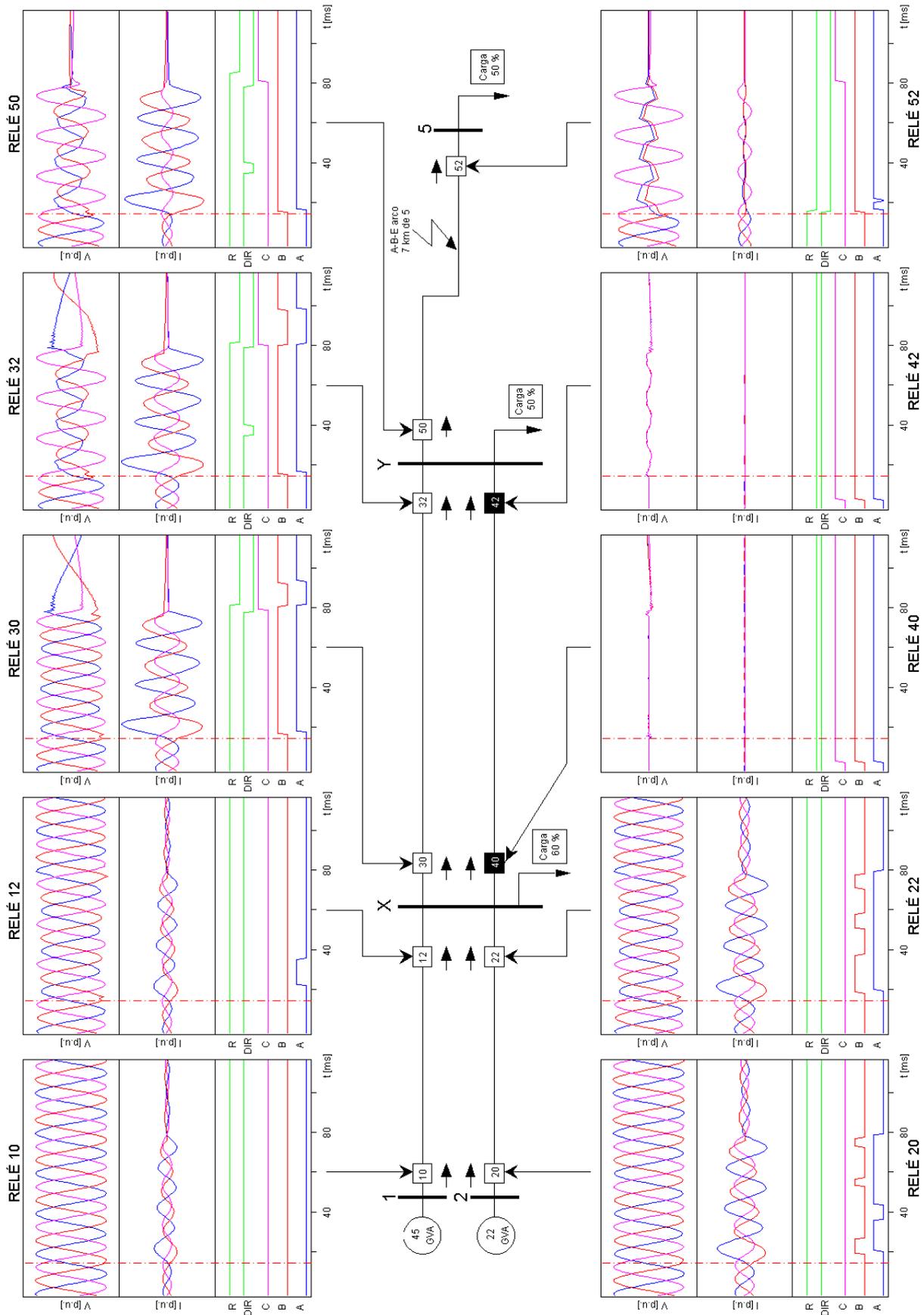


Fig. A.43 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre la fase A, la fase B y tierra con arco de 35 kV, y a 7 km de la barra 5.

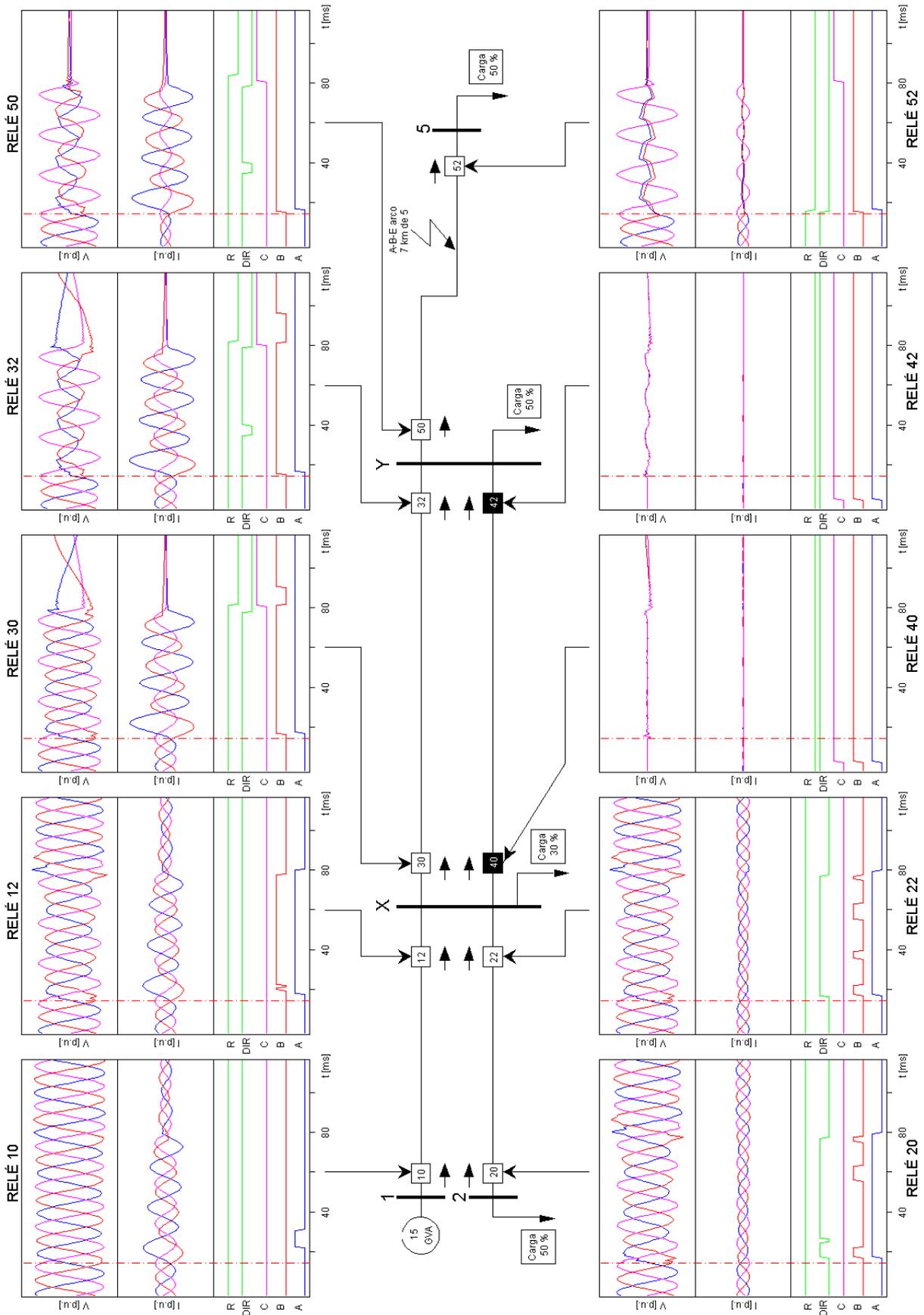


Fig. A.44 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre la fase B y tierra con arco de 35 kV, y a 7 km de la barra 5.

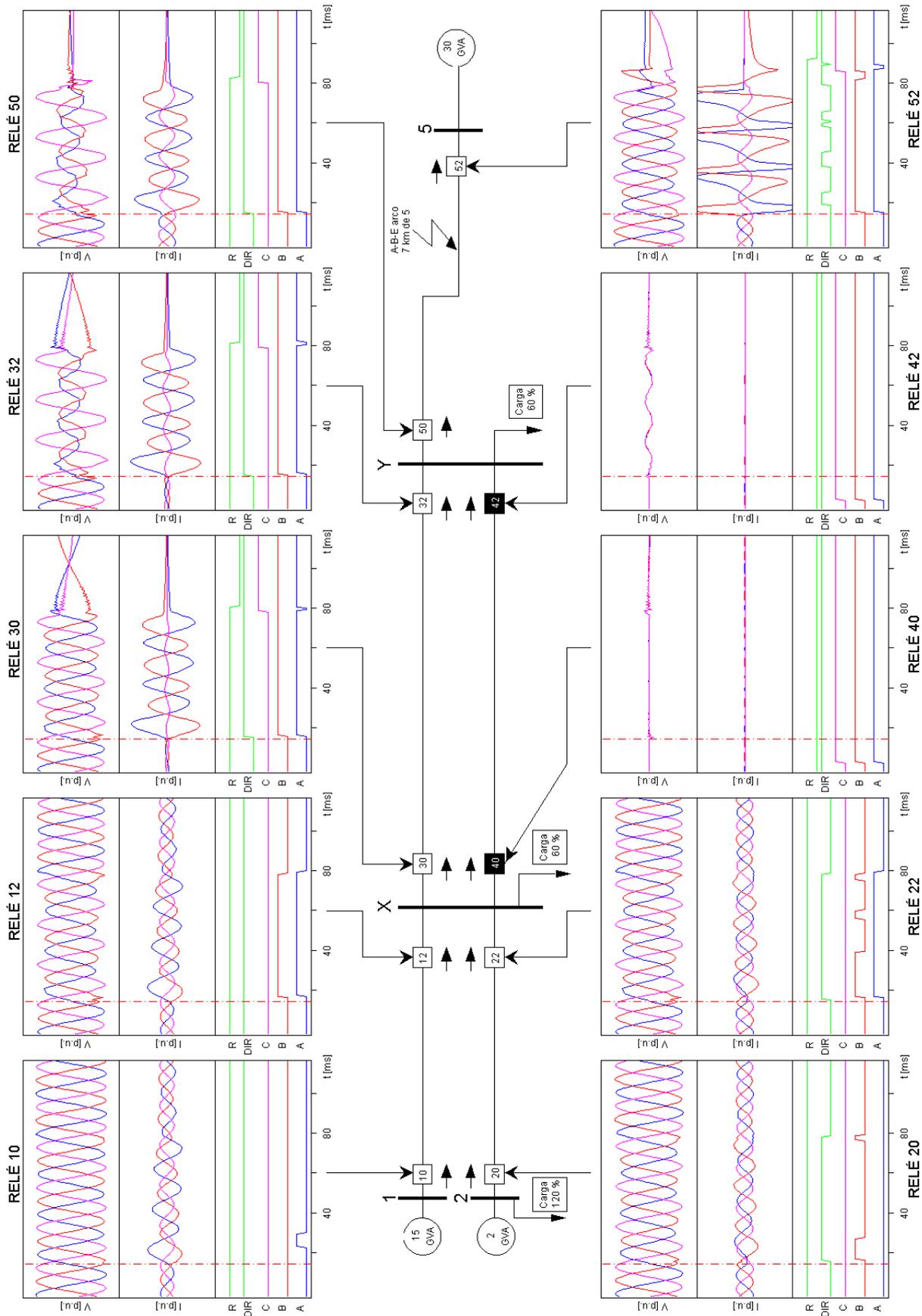


Fig. A.45 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A, B y tierra con arco de 35 kV, y a 7 km de la barra 5.

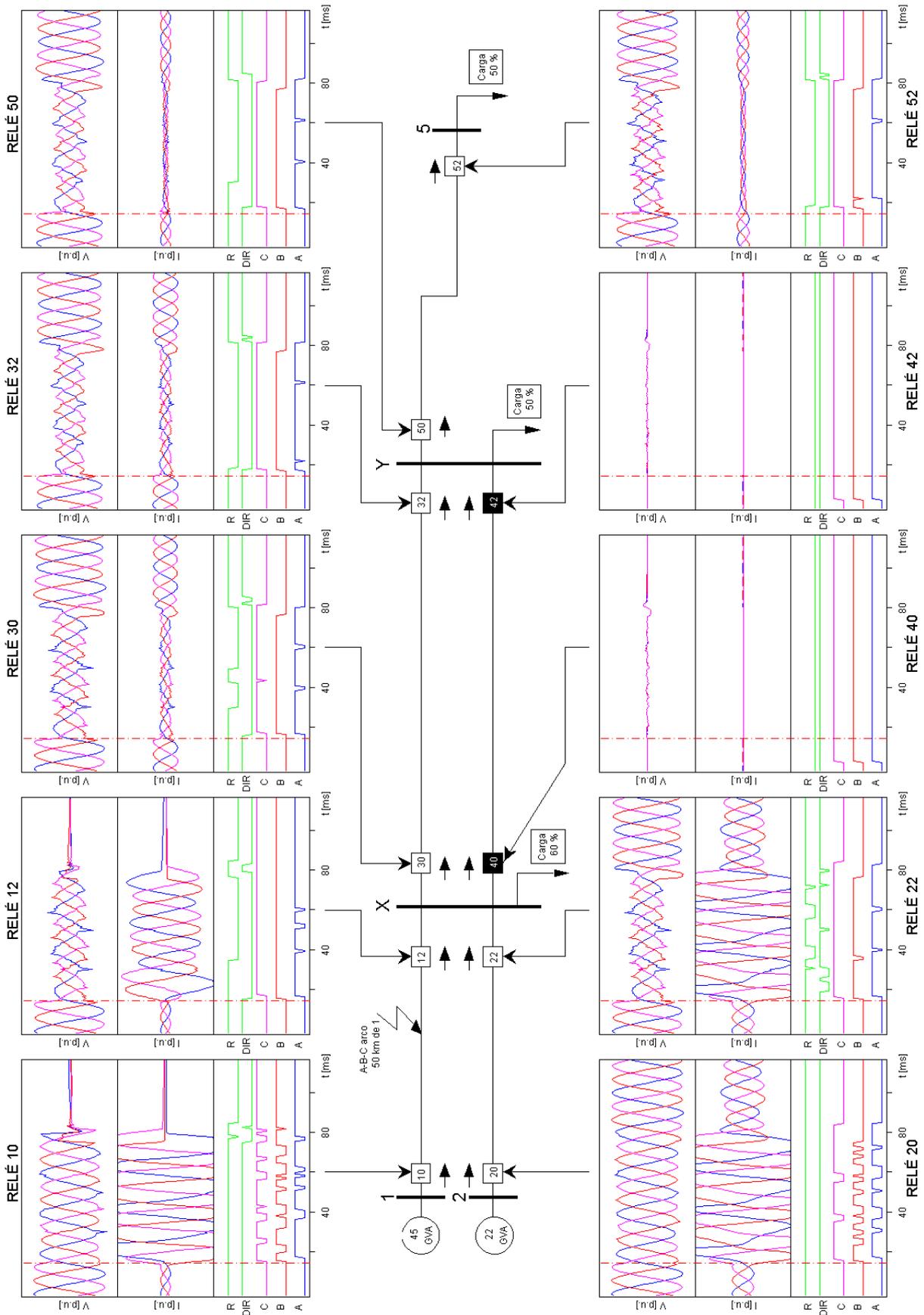


Fig. A.46 Respuesta del relé MLI-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra con arco de 35 kV y a 50 km de la barra 1.

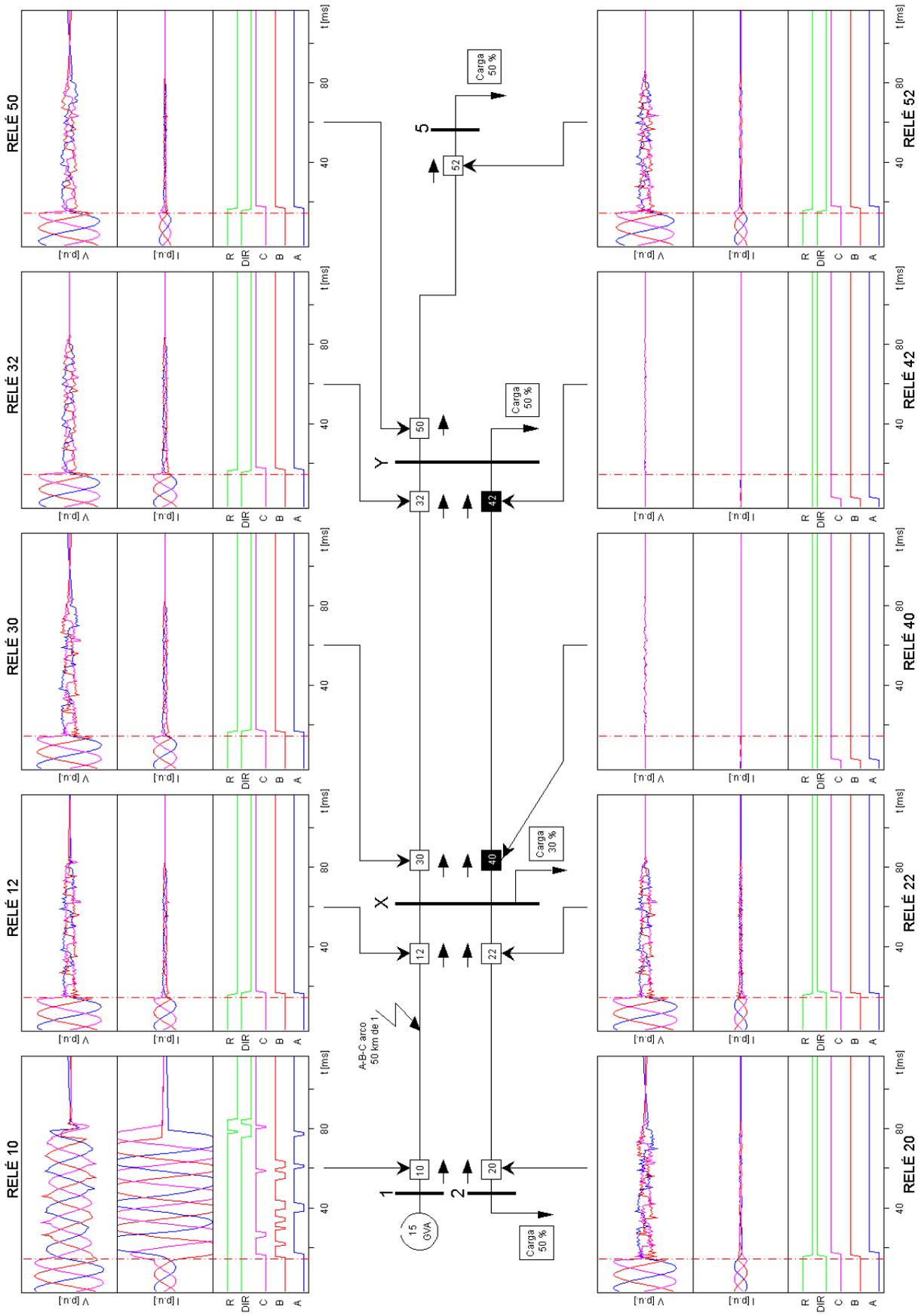


Fig. A.47 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra con arco de 35 kV y a 50 km de la barra 1.

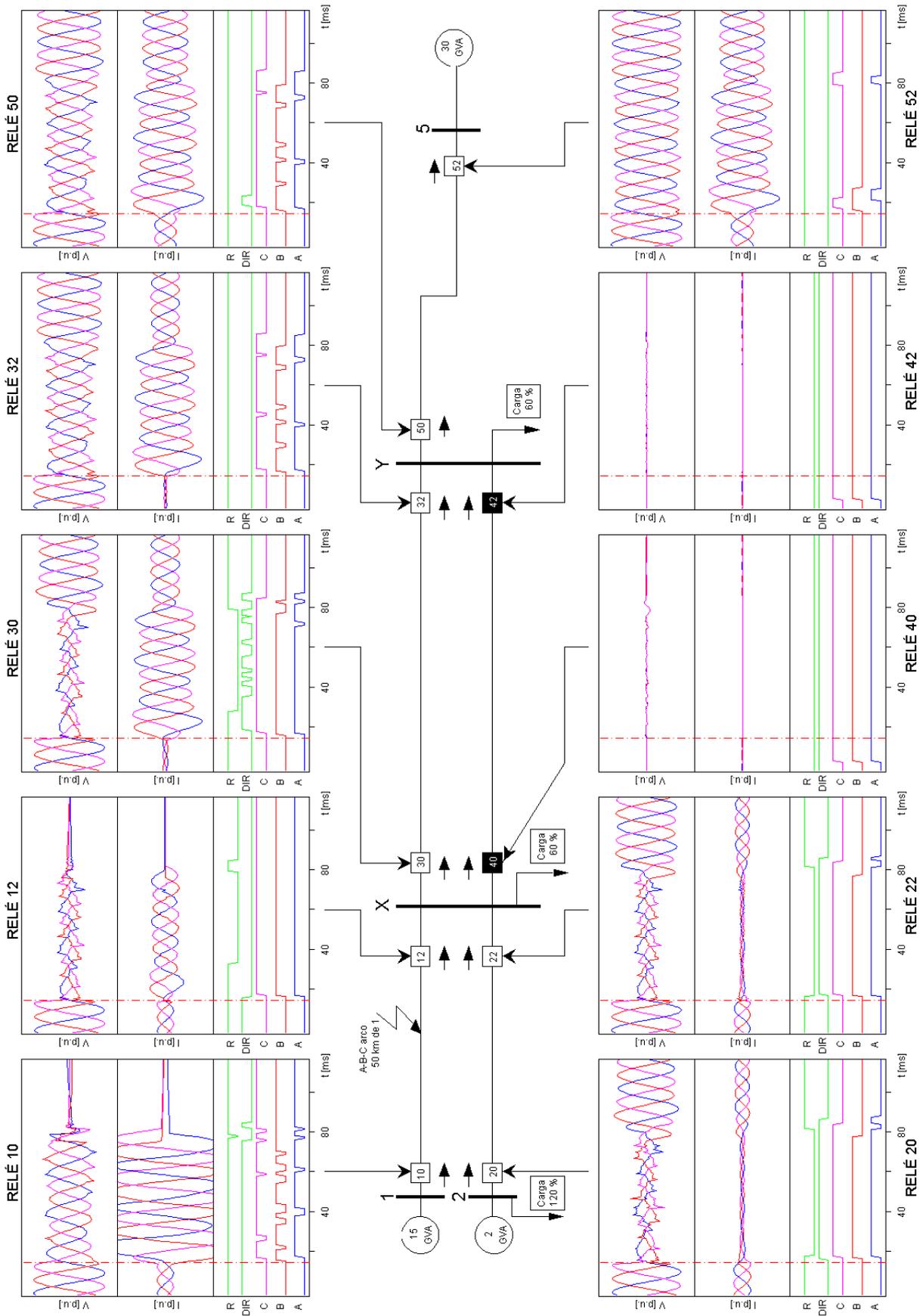


Fig. A.48 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra con arco de 35 kV y a 50 km de la barra 1.

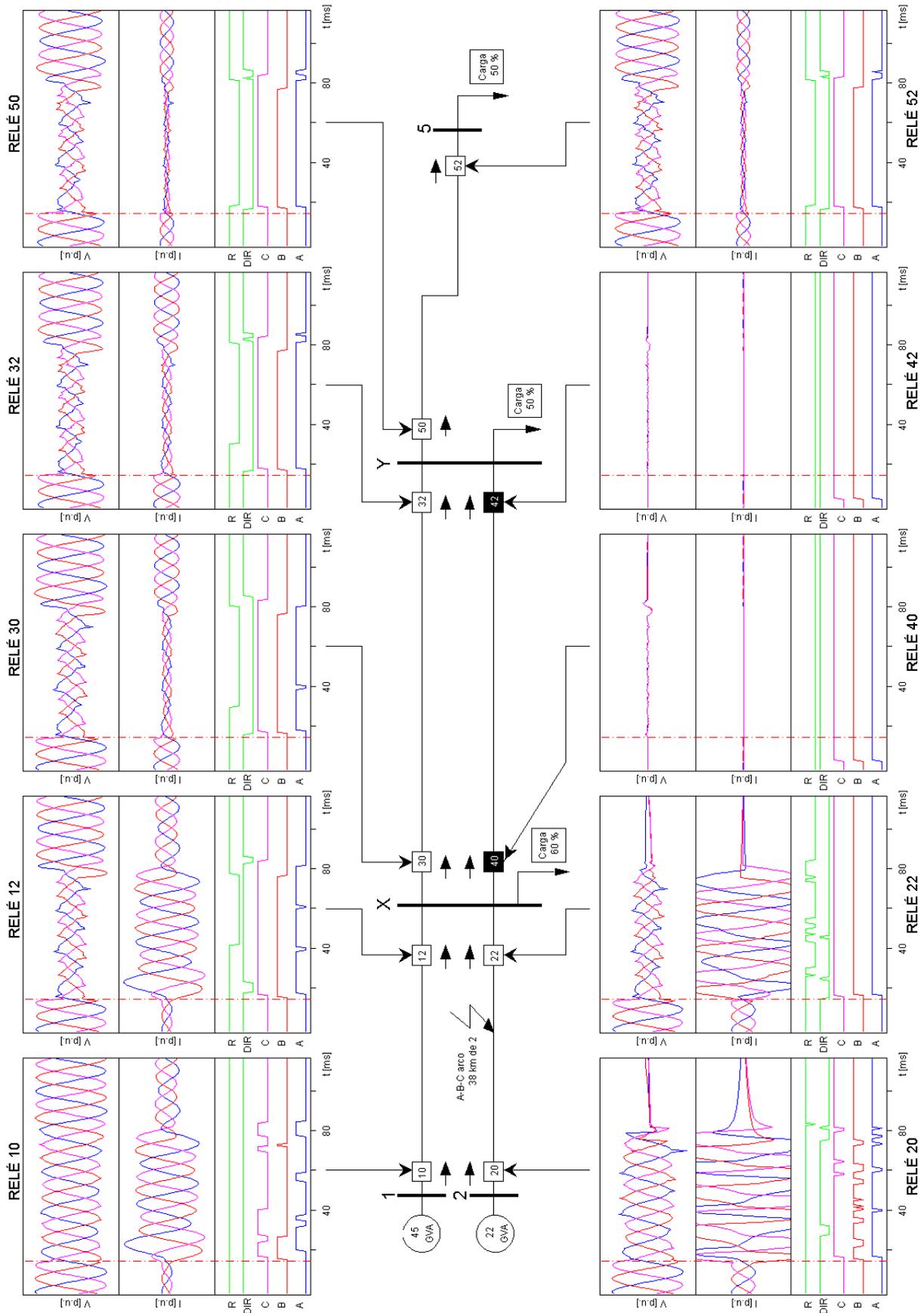


Fig. A.49 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra con arco de 35 kV y a 38 km de la barra 2.

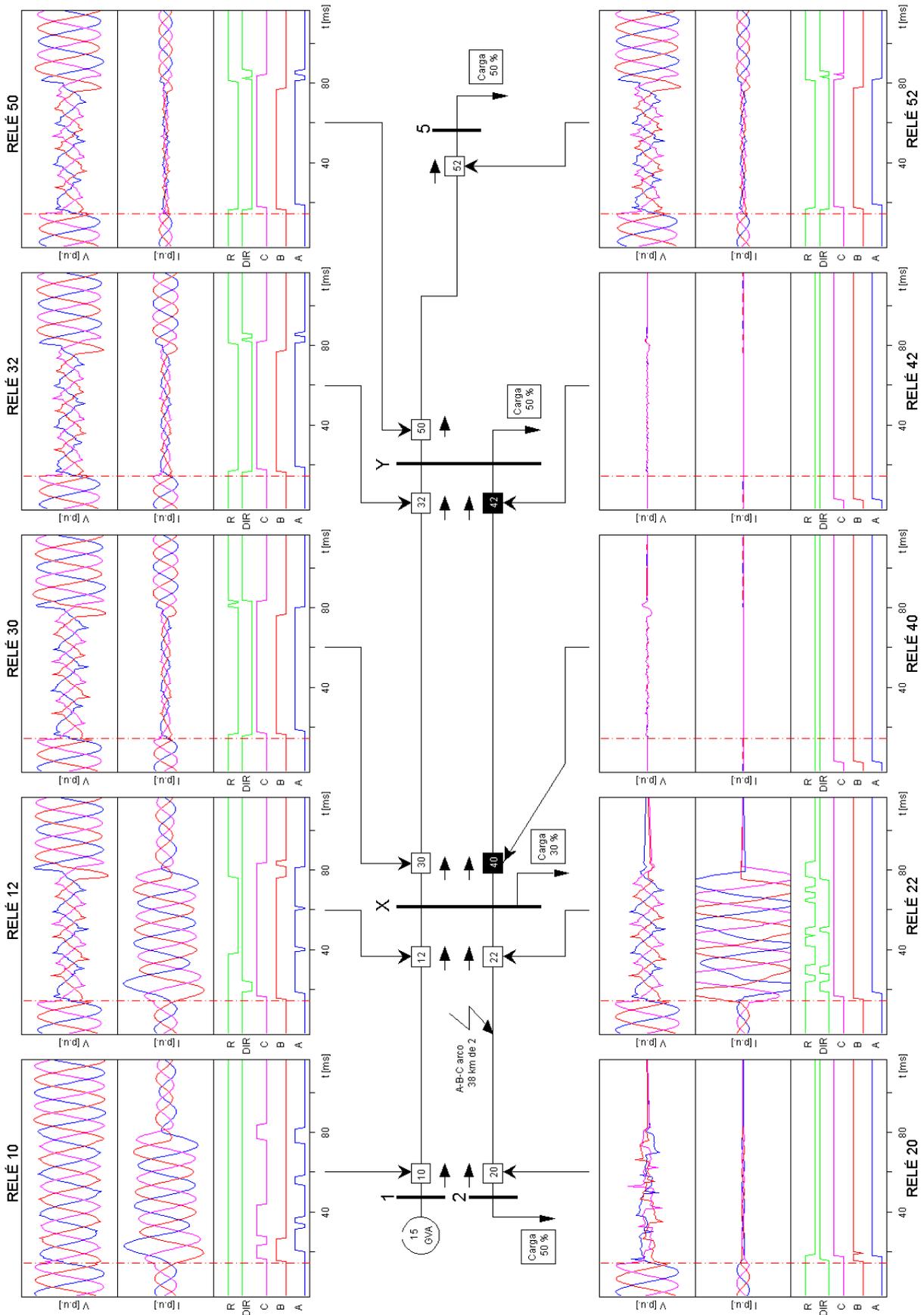


Fig. A.50 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra con arco de 35 kV y a 38 km de la barra 2.

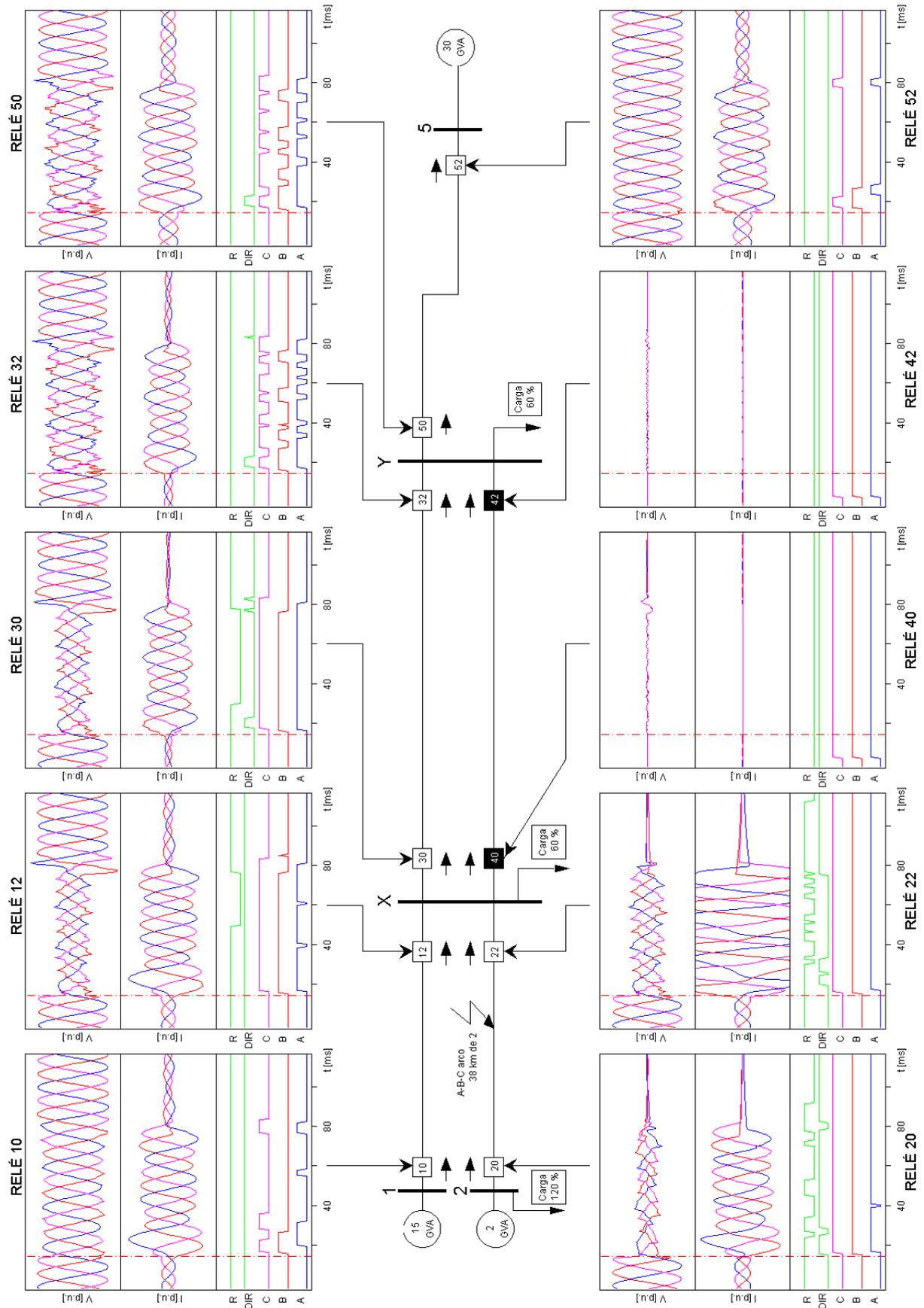


Fig. A.51 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra con arco de 35 kV y a 38 km de la barra 2.

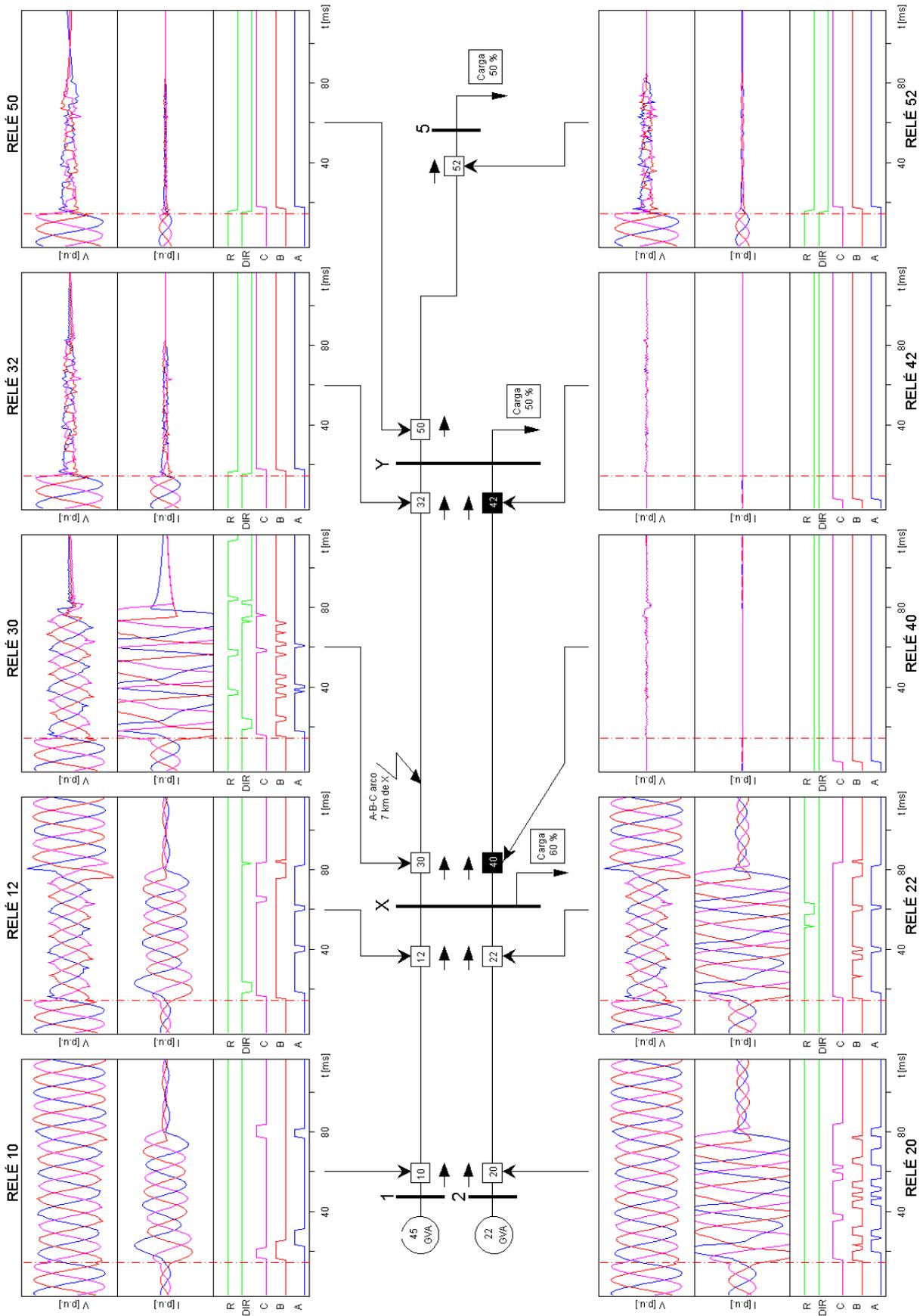


Fig. A.52 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra con arco de 35 kV y a 7 km de la barra X.

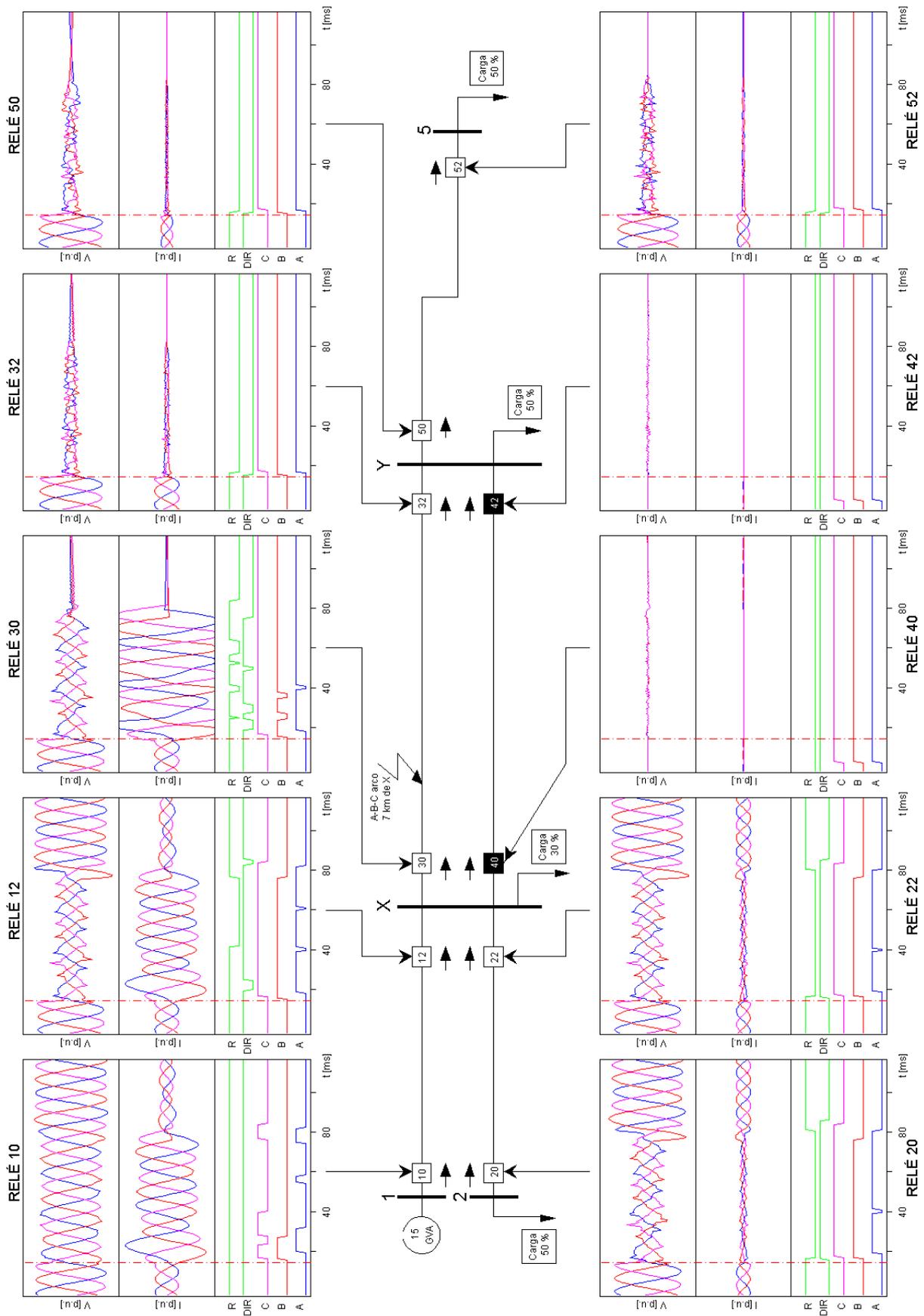


Fig. A.53 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra con arco de 35 kV y a 7 km de la barra X.

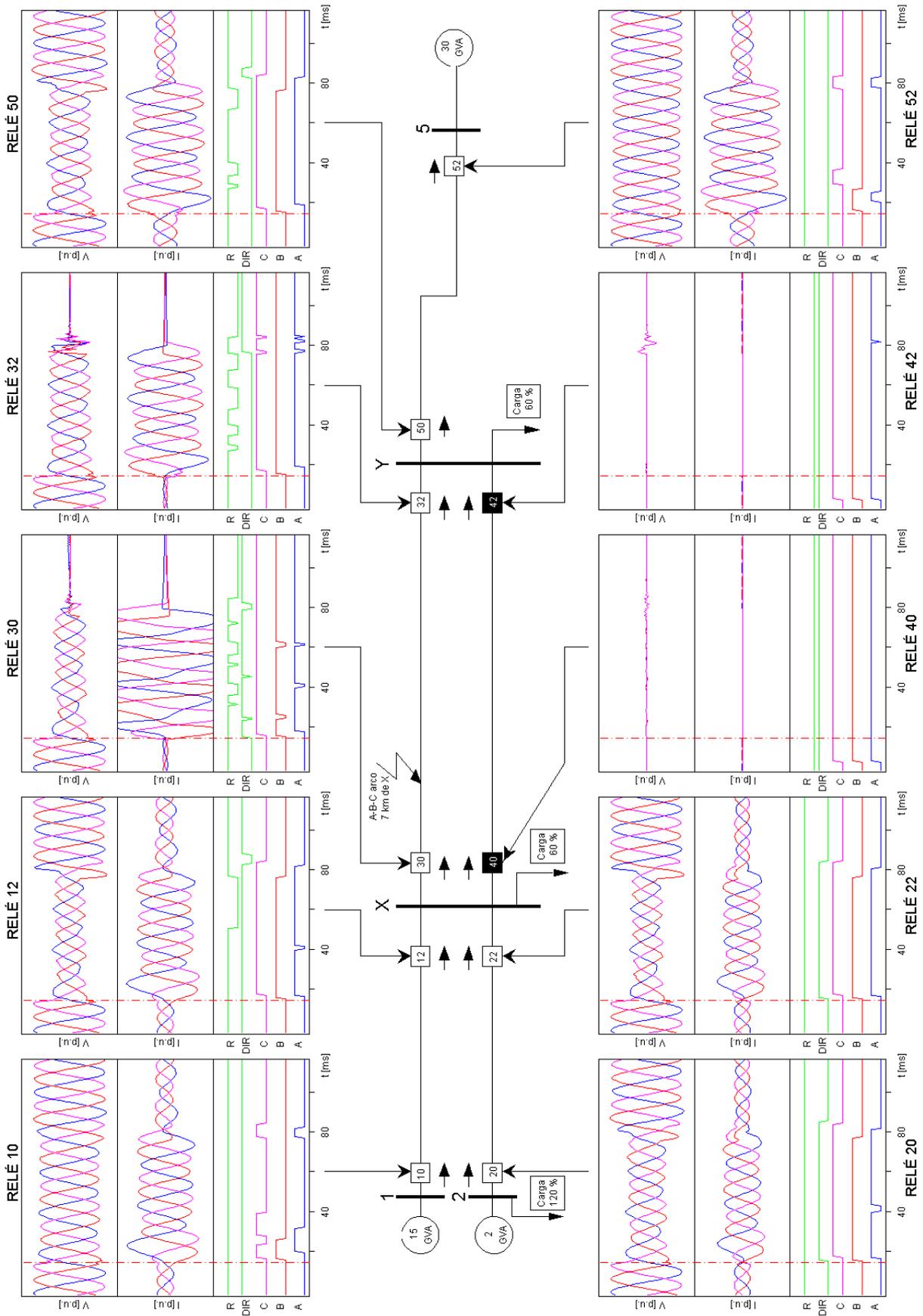


Fig. A.54 Respuesta del relé MFLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra con arco de 35 kV y a 7 km de la barra X.

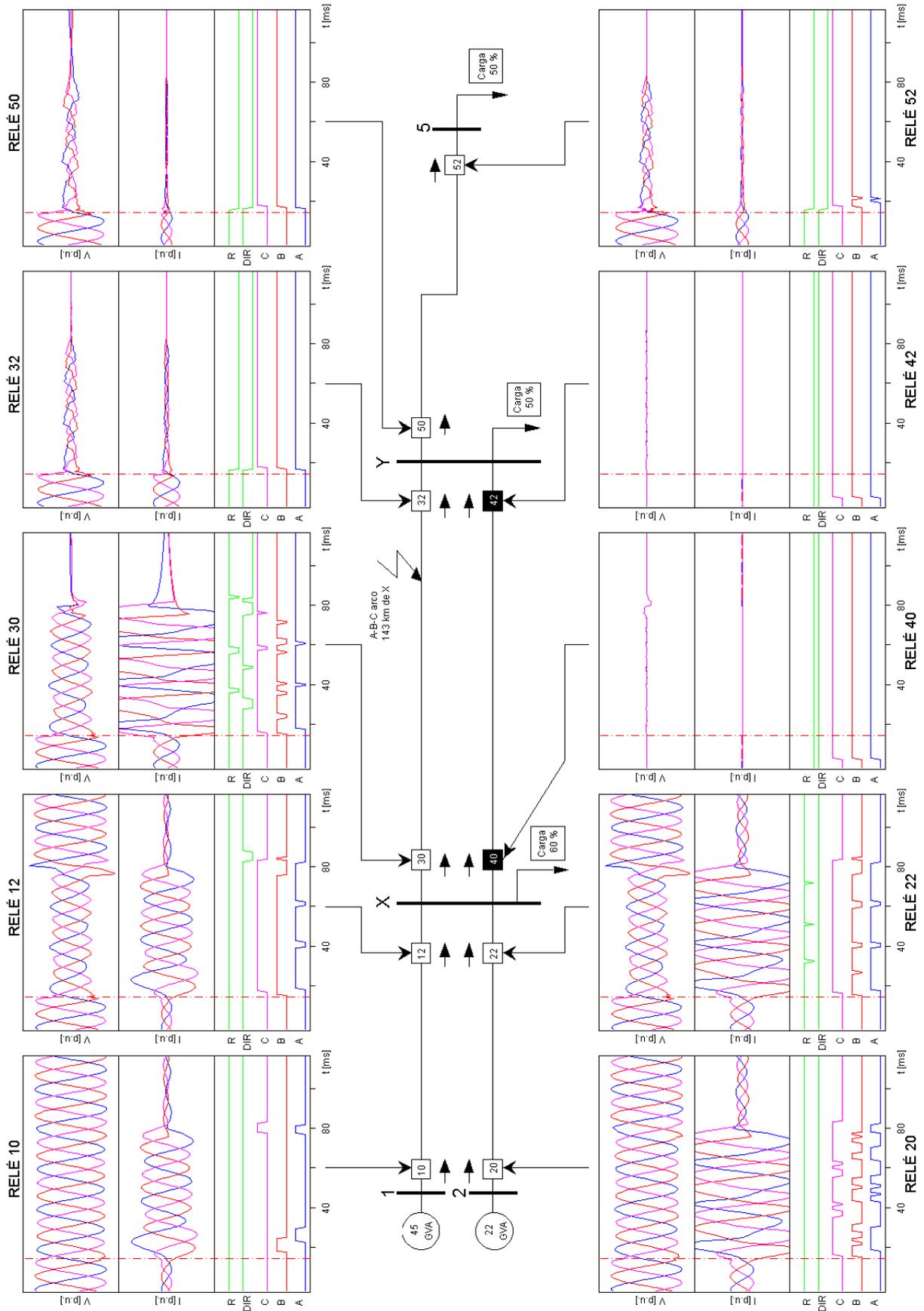


Fig. A.55 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra con arco de 35 kV y a 143 km de la barra X.

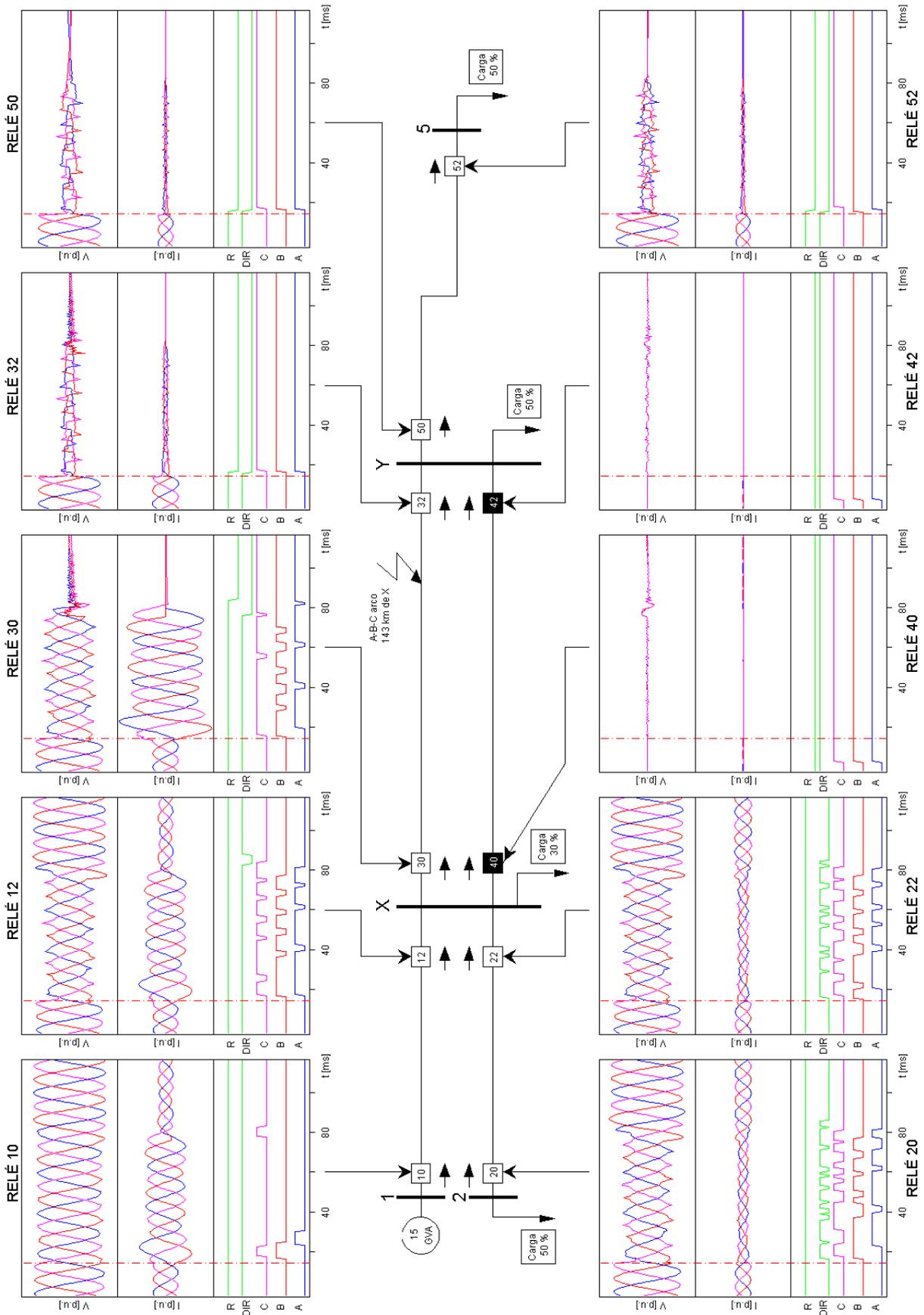


Fig. A.56 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra con arco de 35 kV y a 143 km de la barra X.

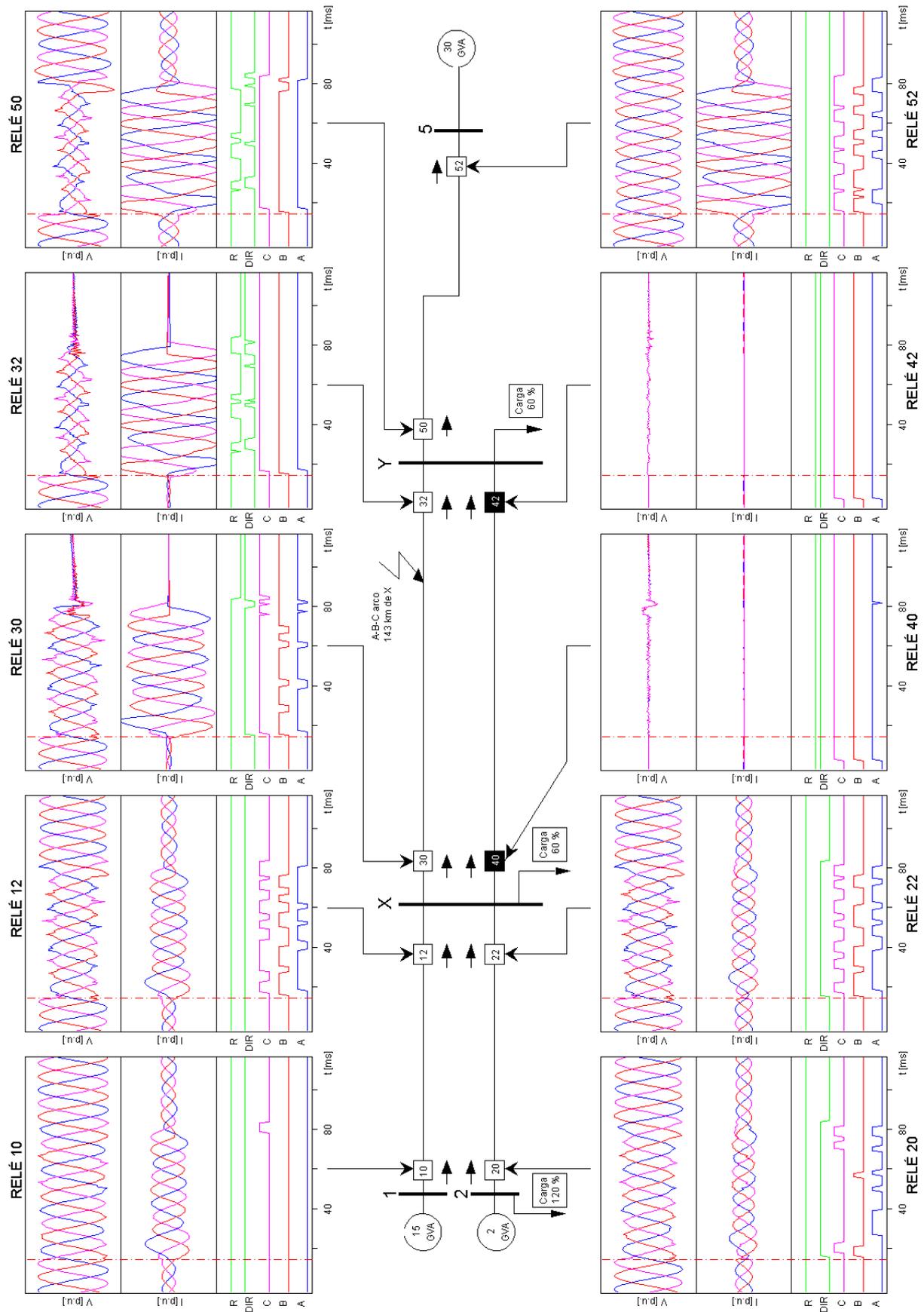


Fig. A.57 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra con arco de 35 kV y a 143 km de la barra X.

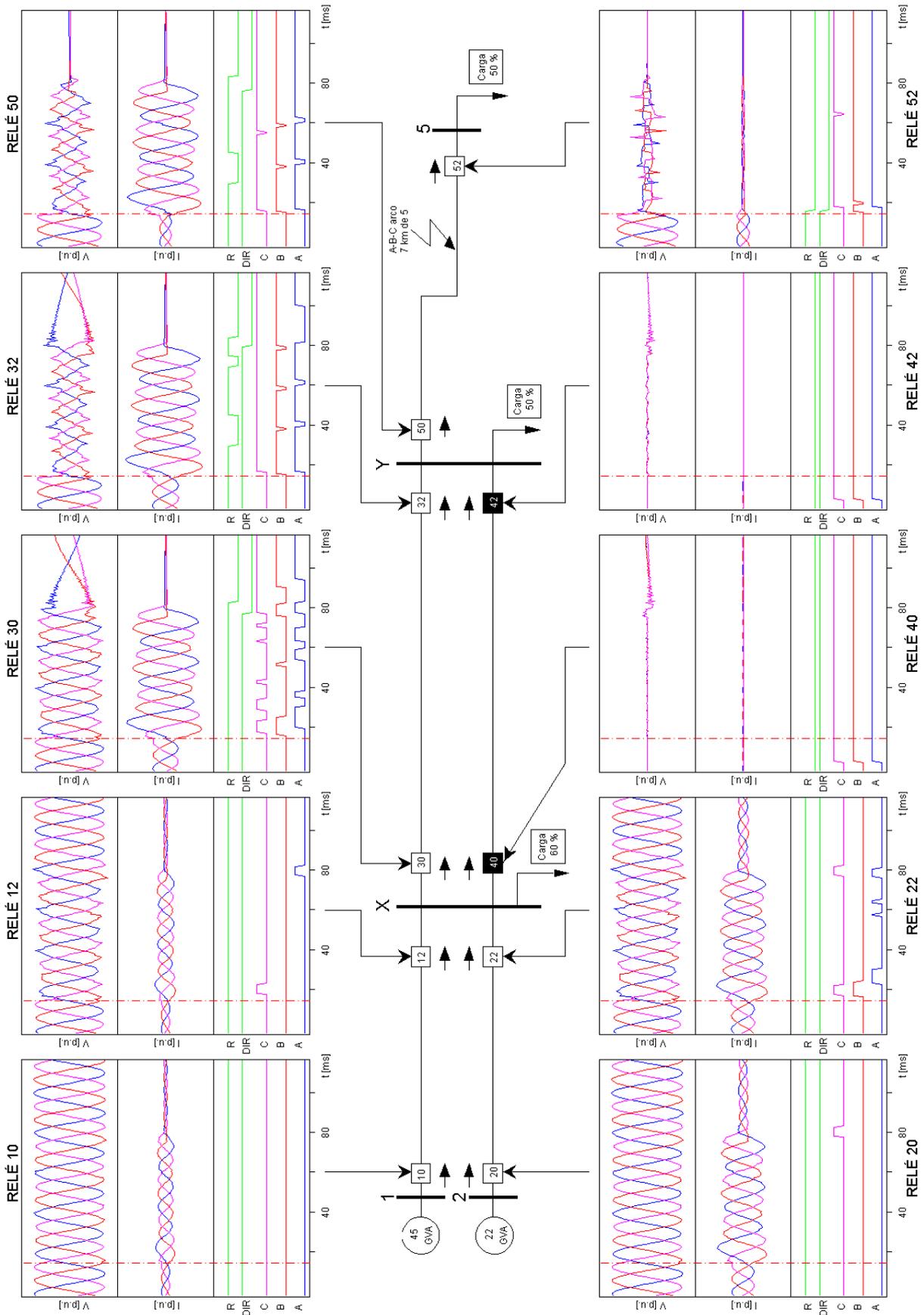


Fig. A.58 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra con arco de 35 kV y a 7 km de la barra 5.

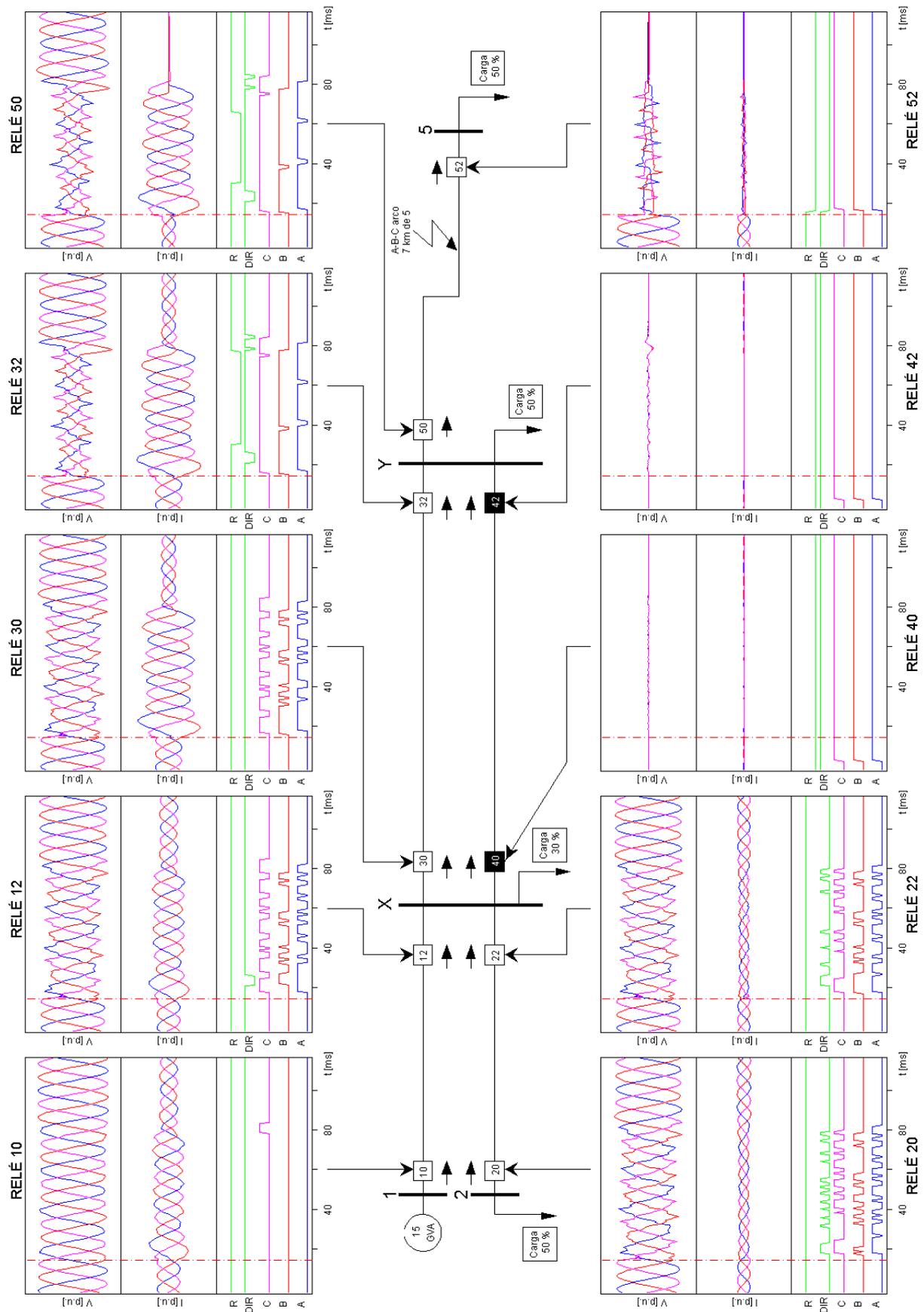


Fig. A.59 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra con arco de 35 kV y a 7 km de la barra 5.

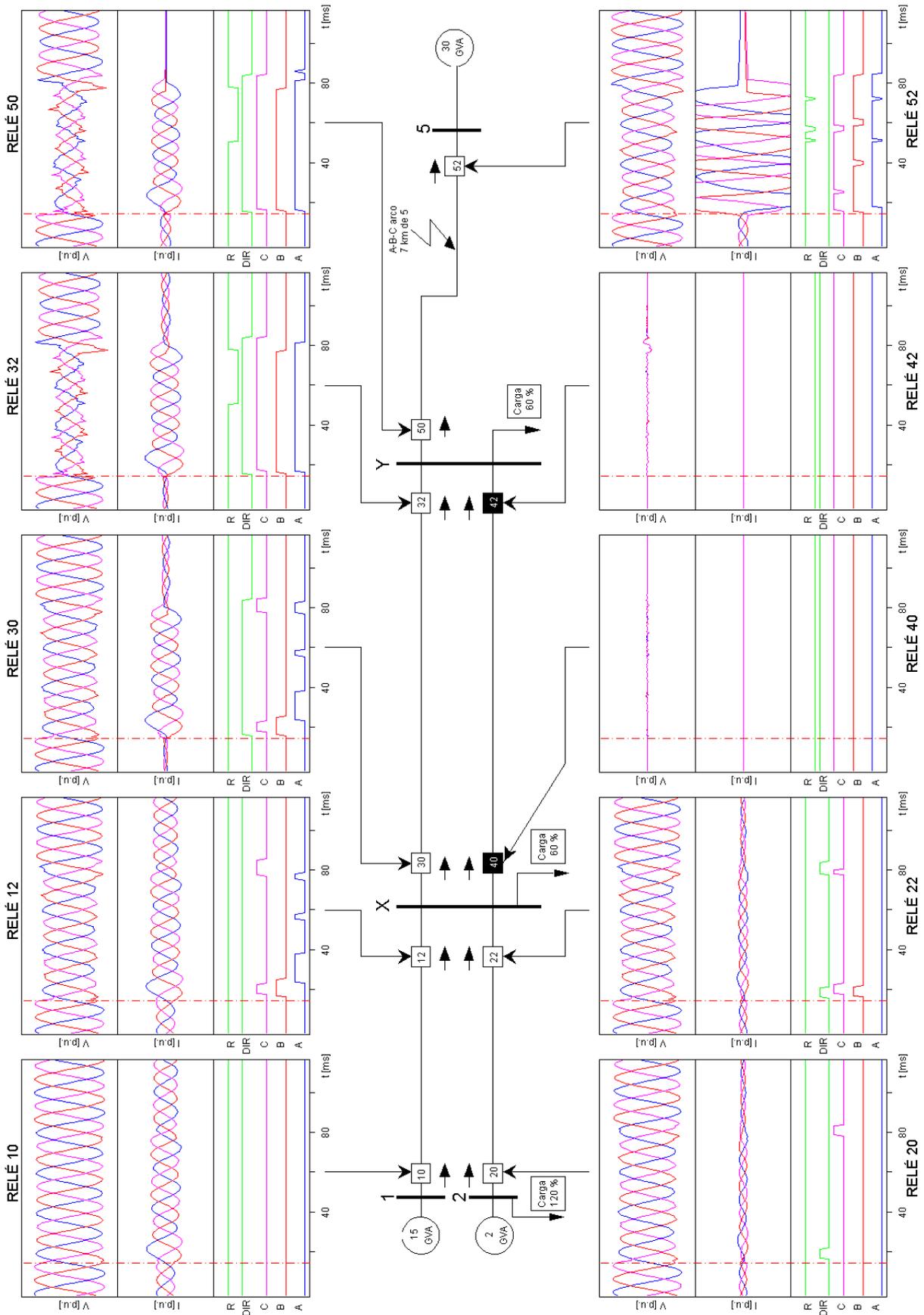


Fig. A.60 Respuesta del relé MLI-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra con arco de 35 kV y a 7 km de la barra 5.

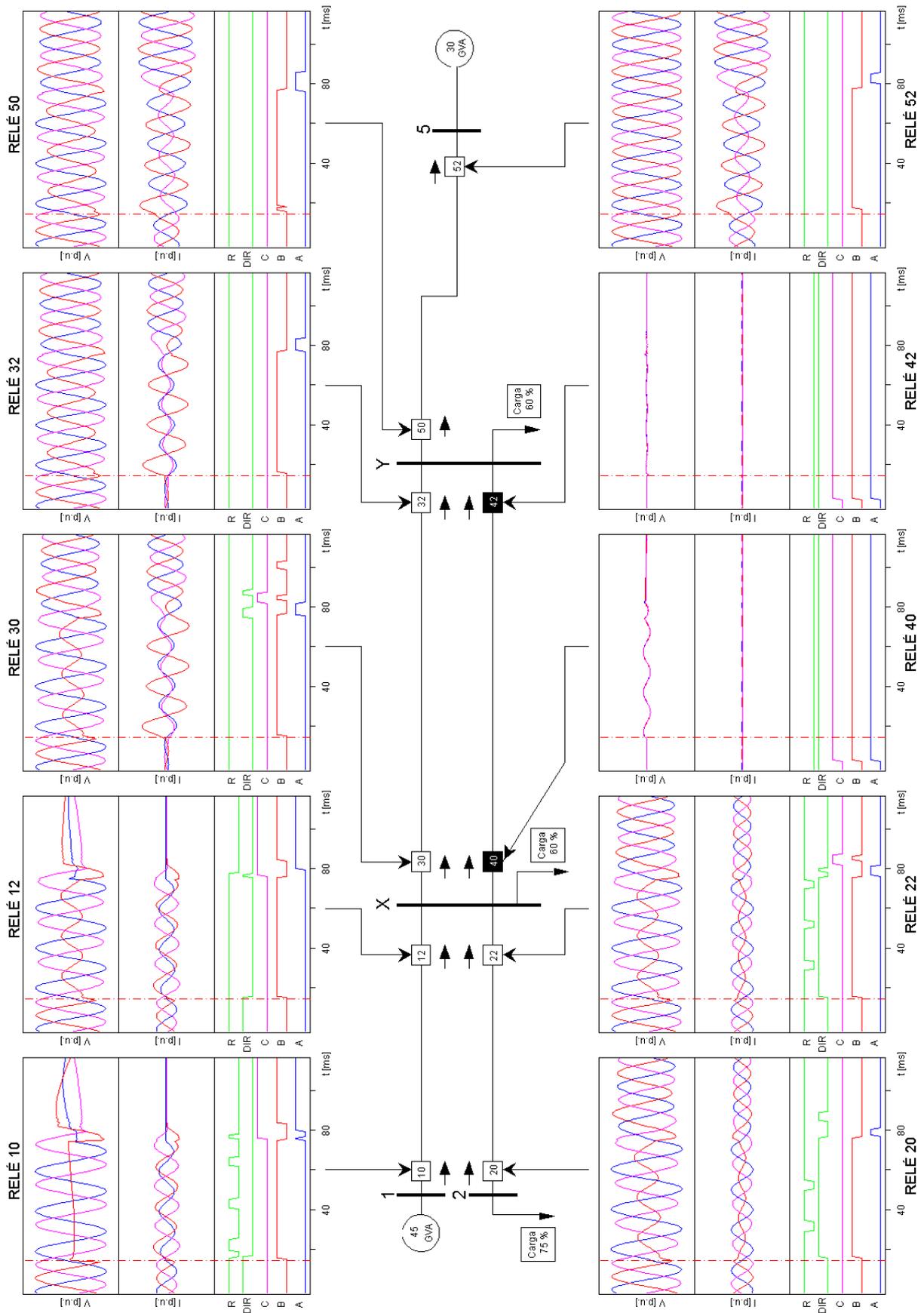


Fig. A.61 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase B a tierra en el punto de la barra 1.

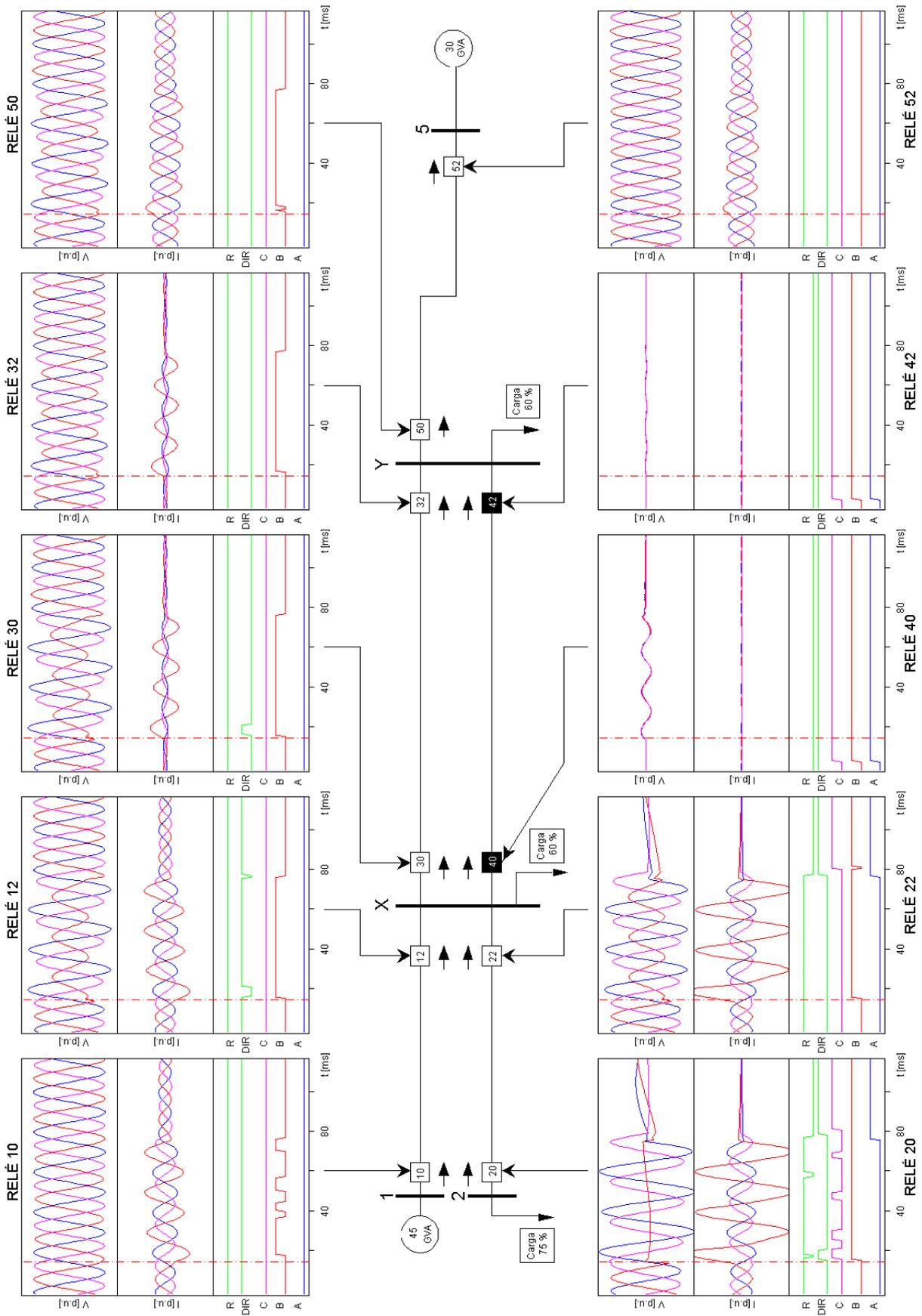


Fig. A.62 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase B a tierra en el punto de la barra 2.

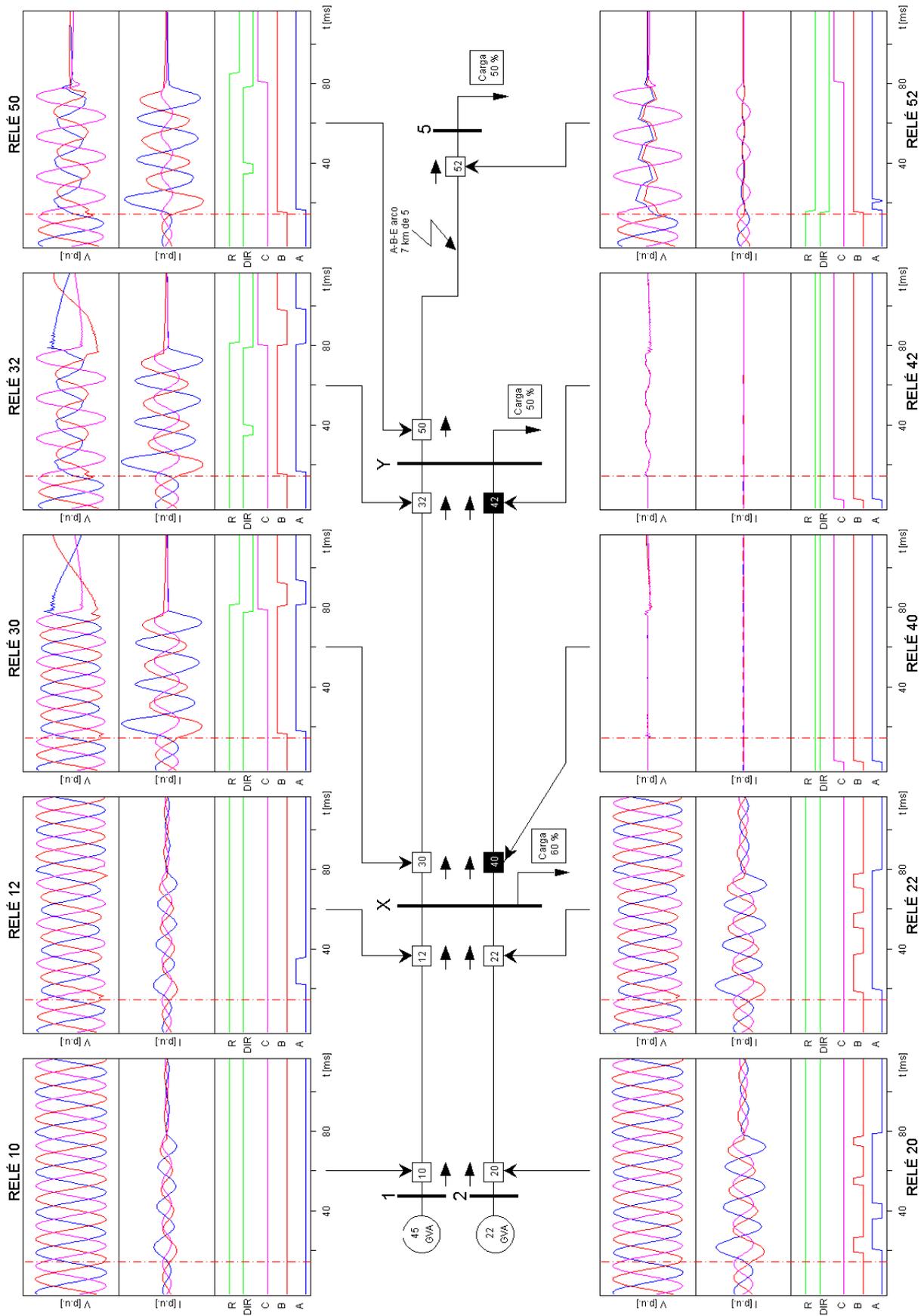


Fig. A.63 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase B a tierra en el punto de la barra X.

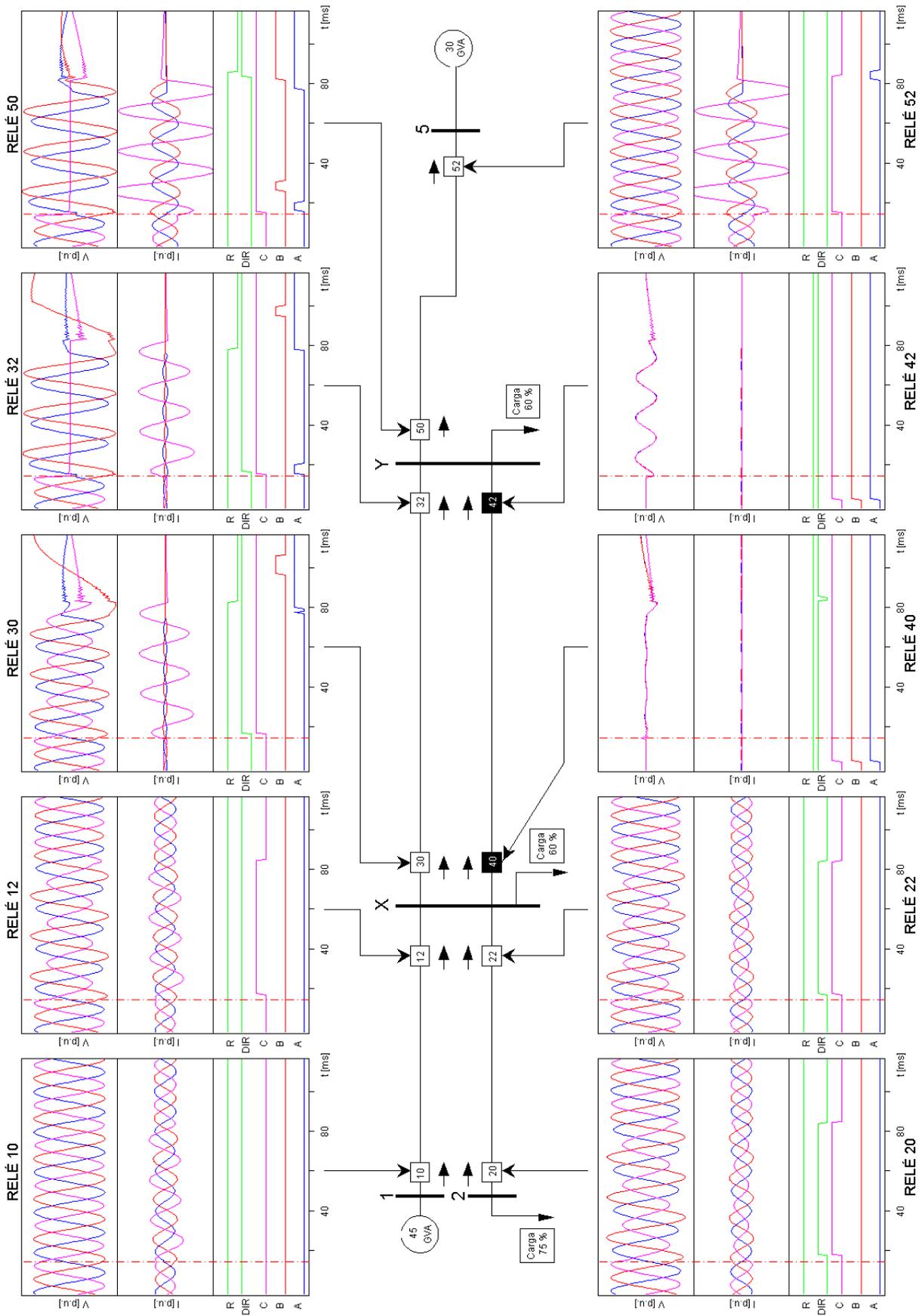


Fig. A.64 Respuesta del relé MLI-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase C a tierra en el punto de la barra Y.

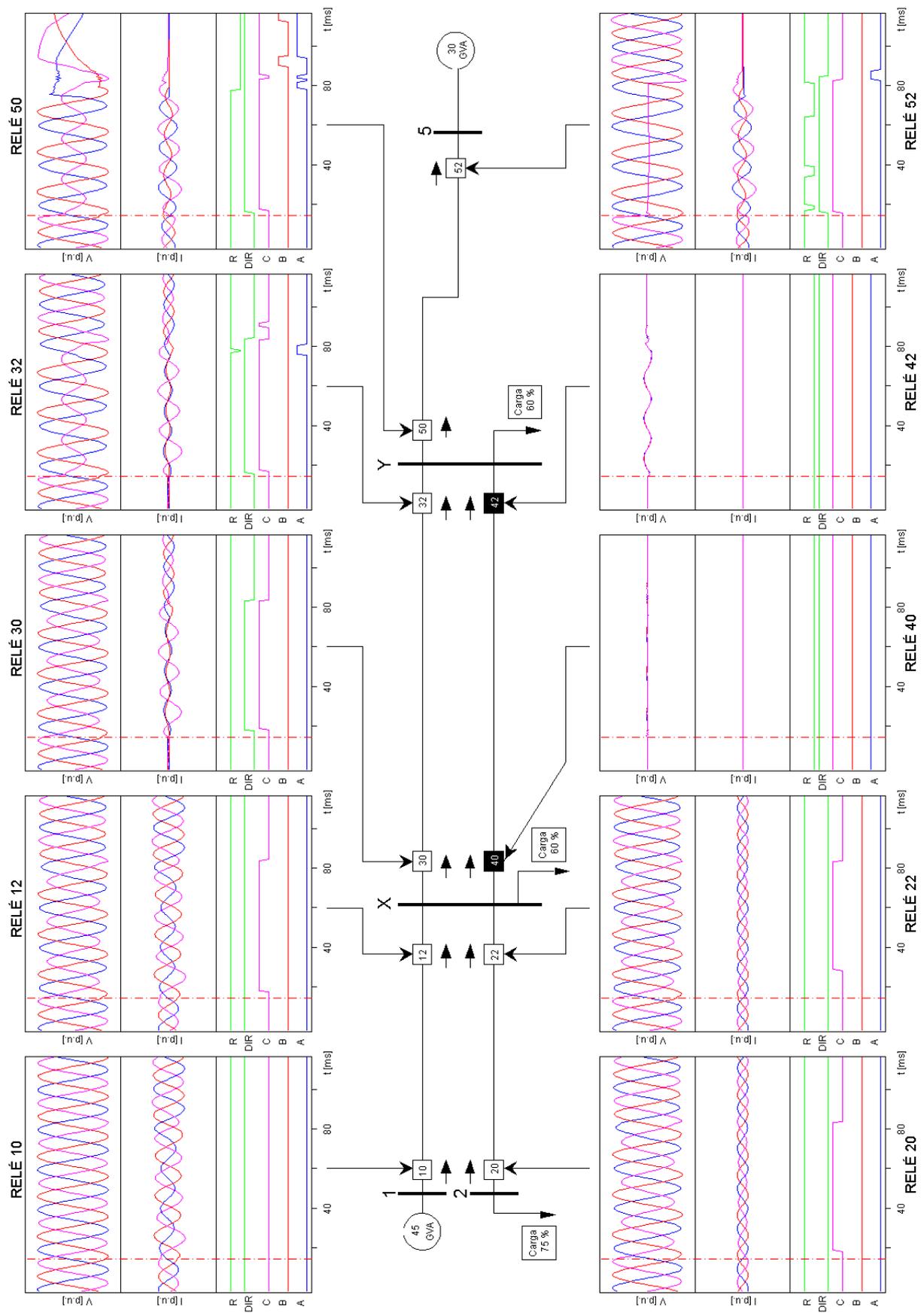


Fig. A.65 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase C a tierra en el punto de la barra 5.

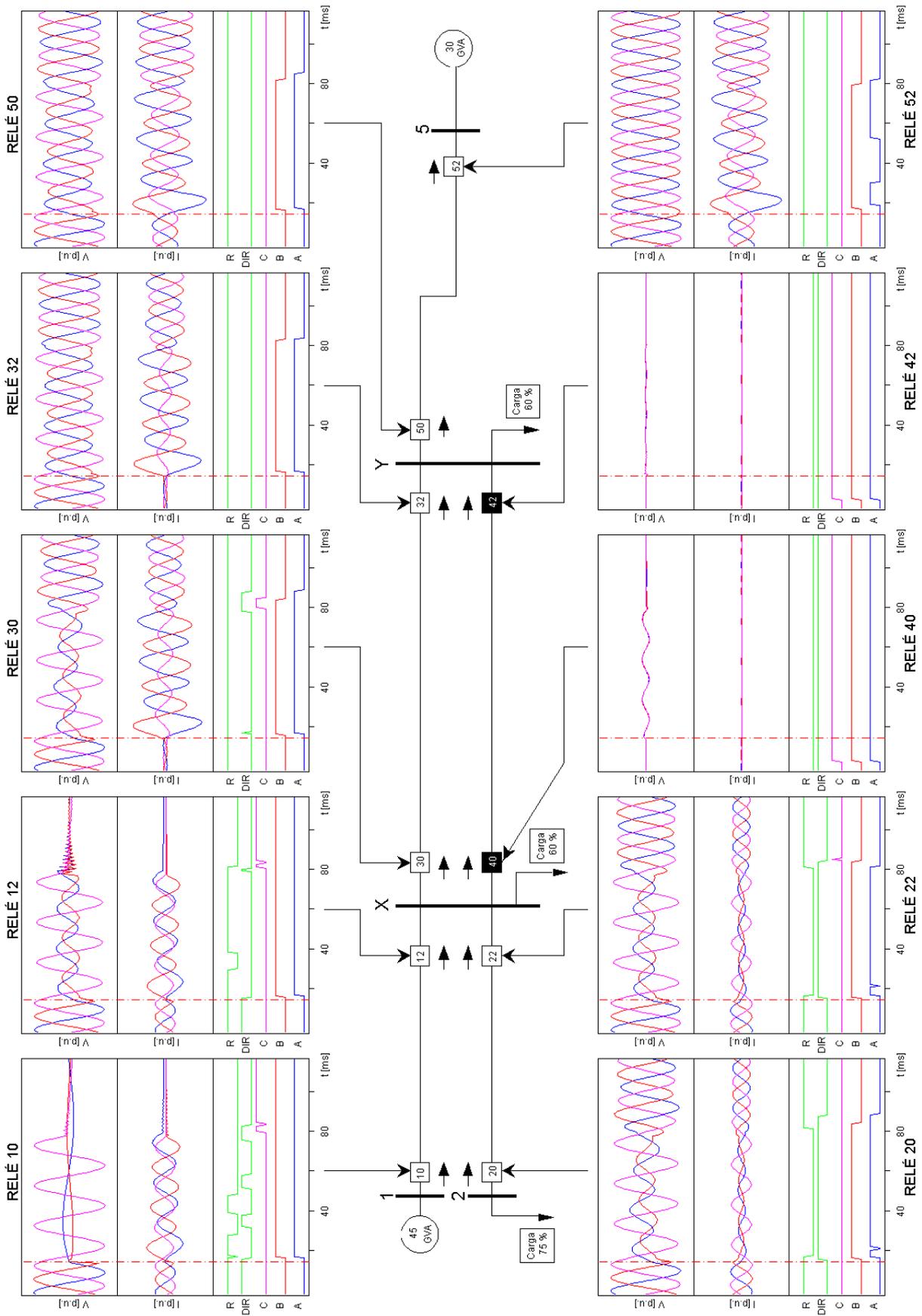


Fig. A.66 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo bifásico en el punto de la barra 1.

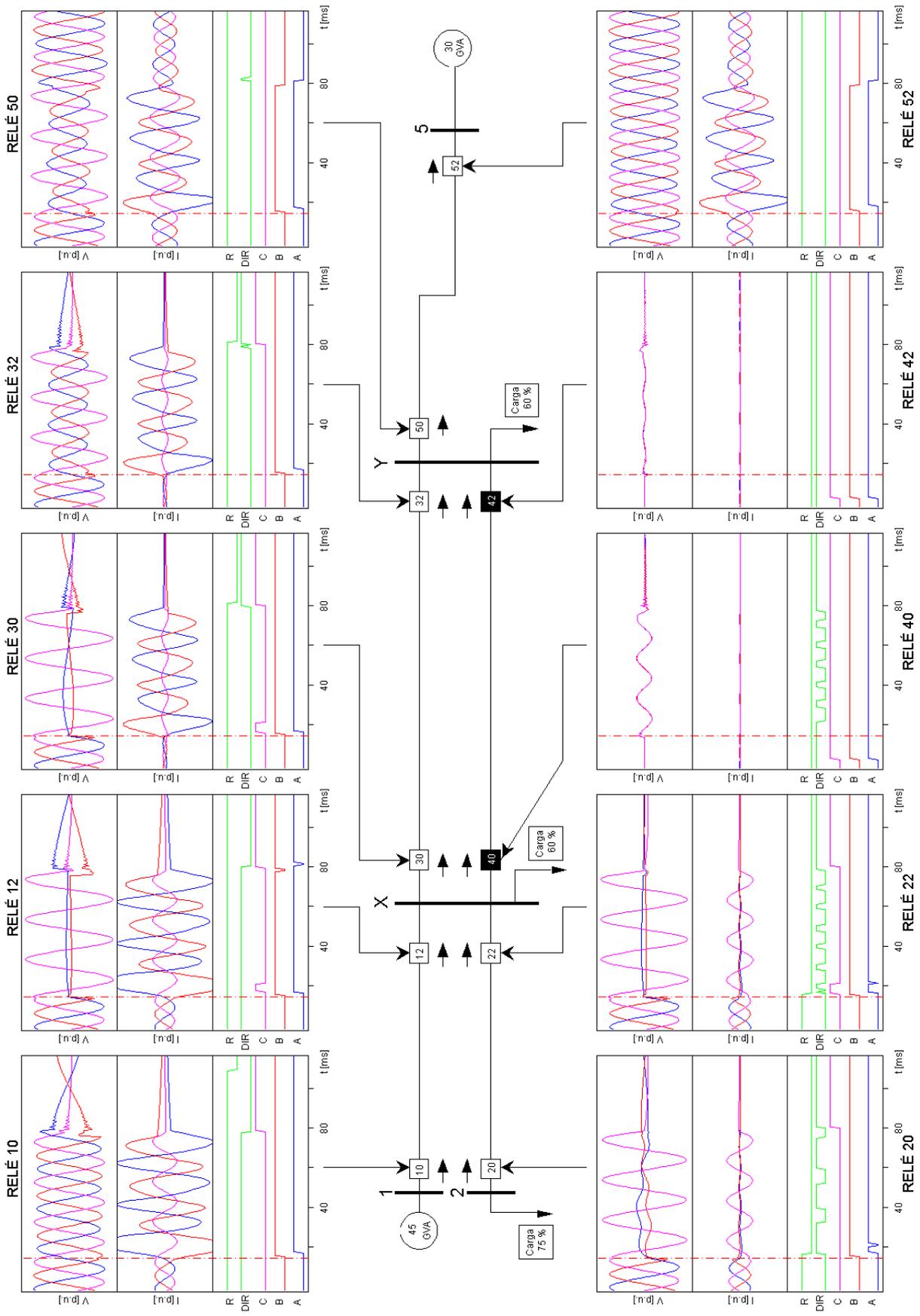


Fig. A.67 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo bifásico en el punto de la barra X.

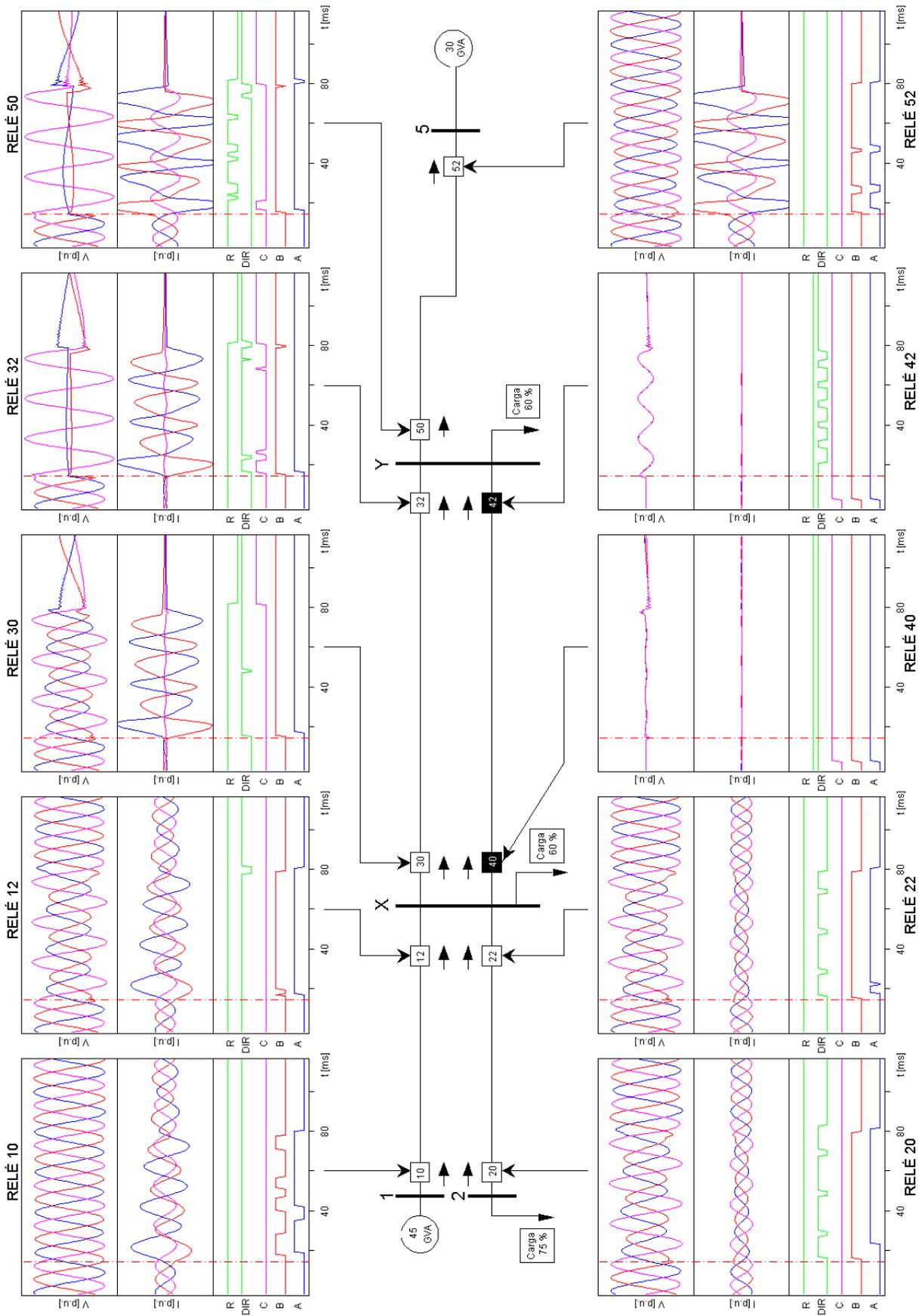


Fig. A.68 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo bifásico en el punto de la barra Y.

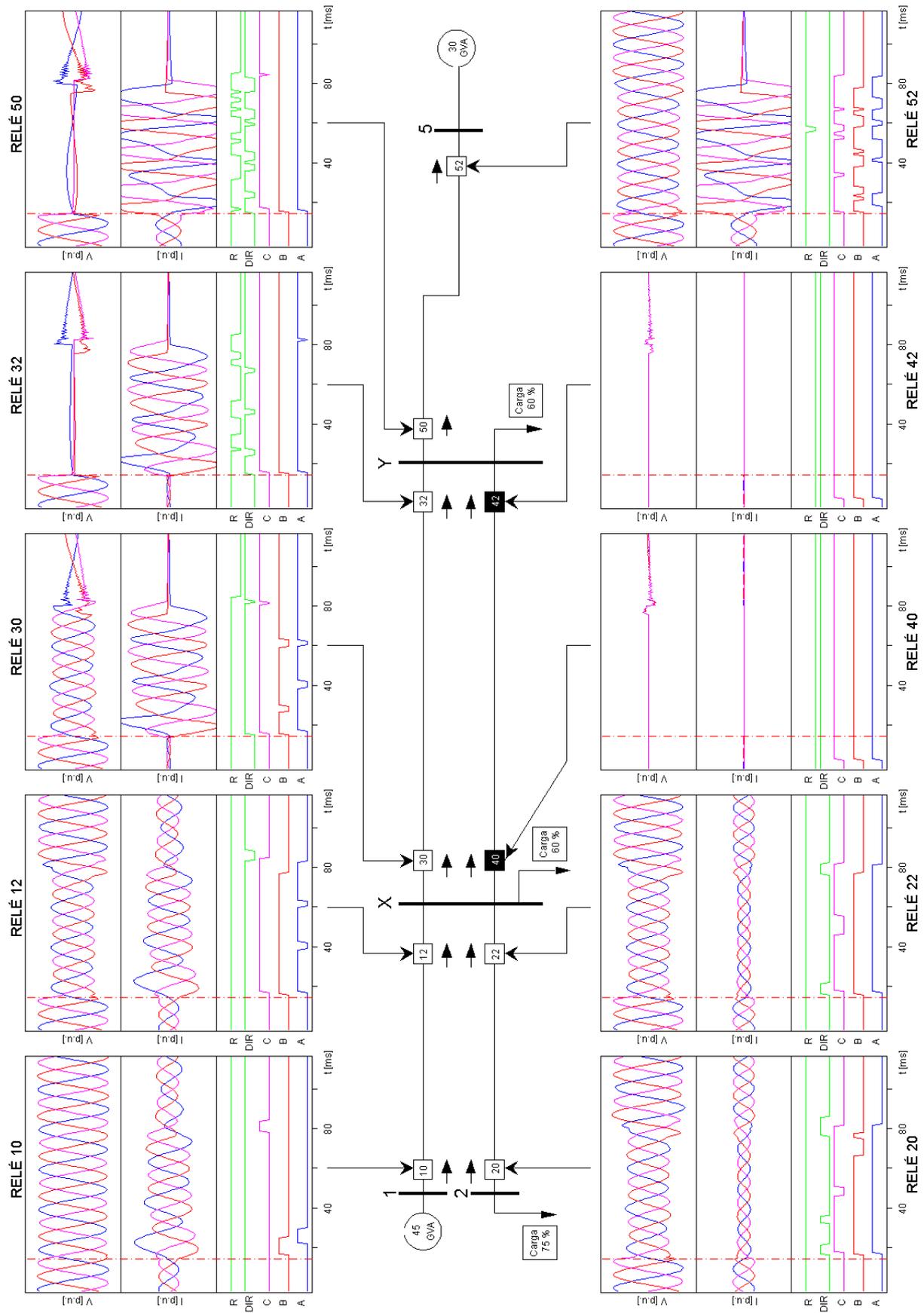


Fig. A.69 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico en el punto de la barra Y.

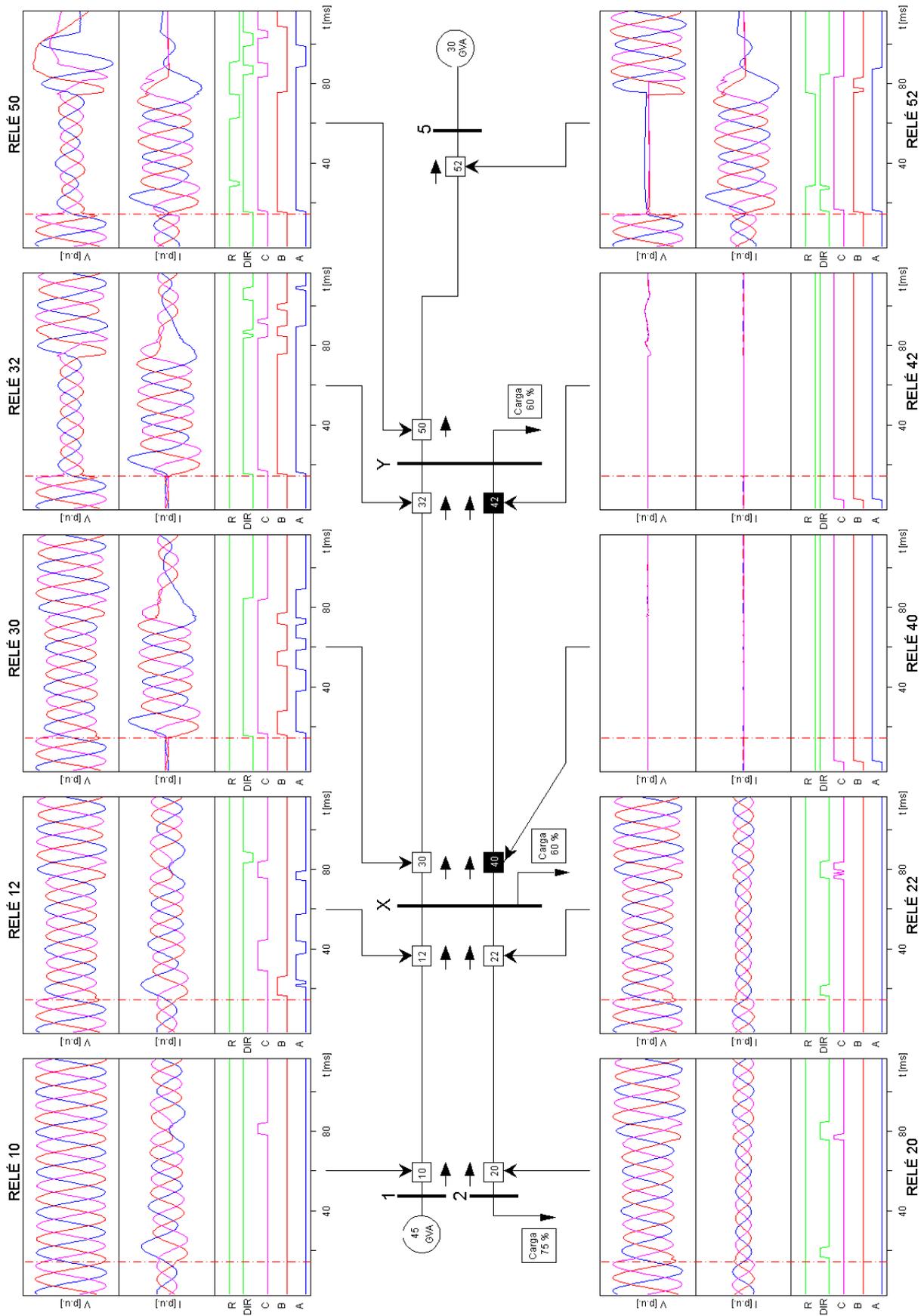


Fig. A.70 Respuesta del relé MLI-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico en el punto de la barra 5.

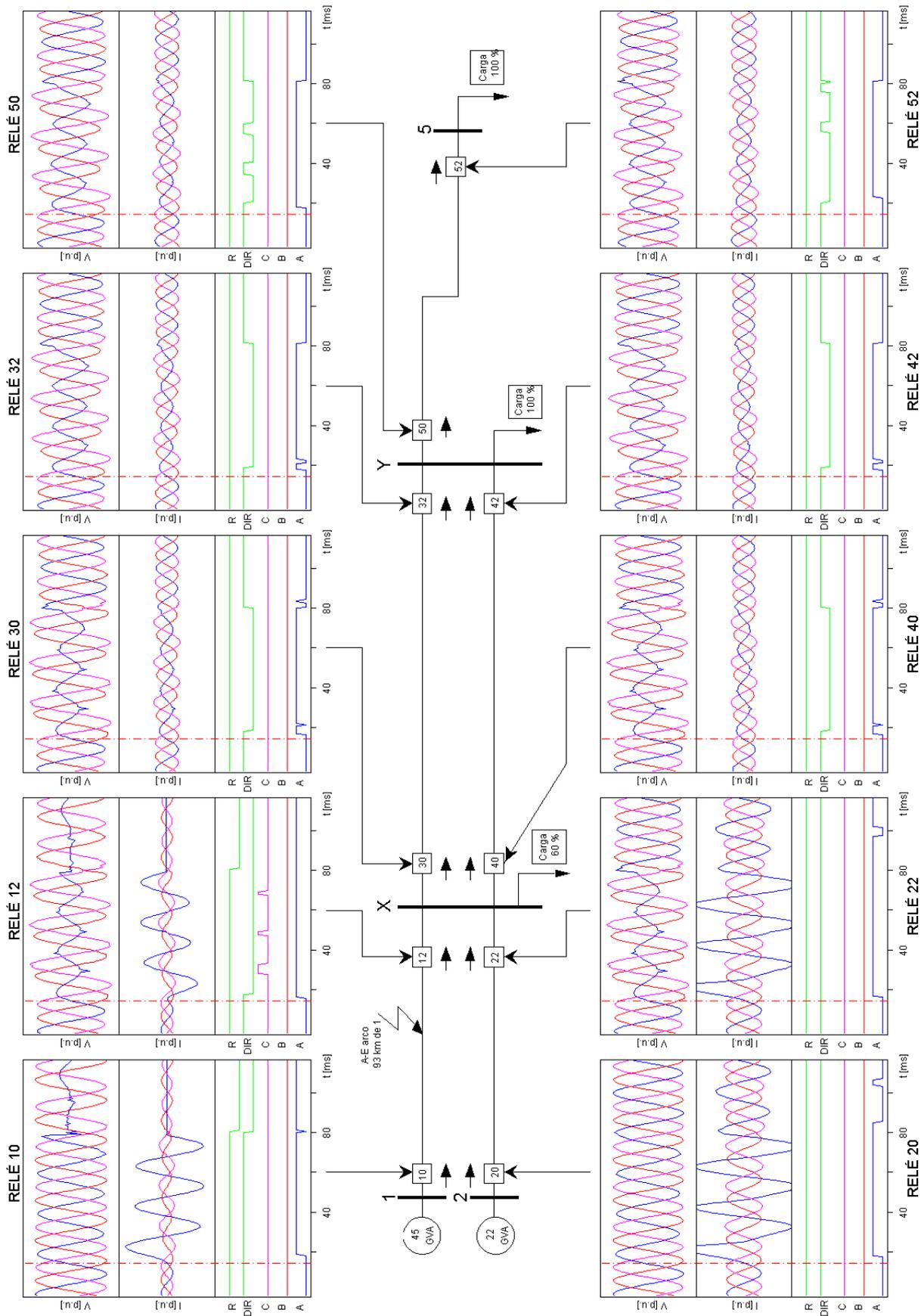


Fig. A.71 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase A a tierra con arco de 35 kV y a 93 km de la barra 1.

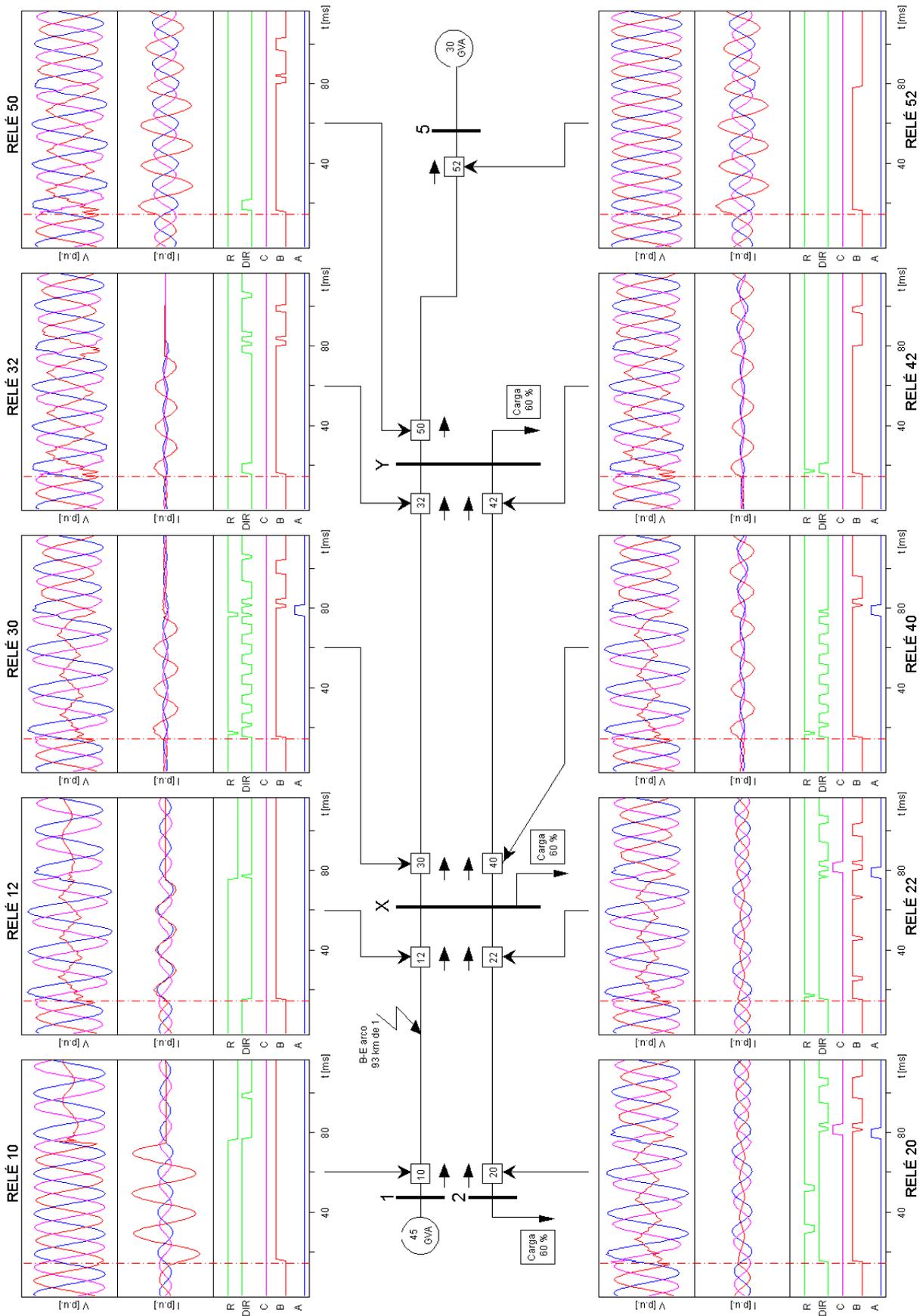


Fig. A.72 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase B a tierra con arco de 35 kV y a 93 km de la barra 1.

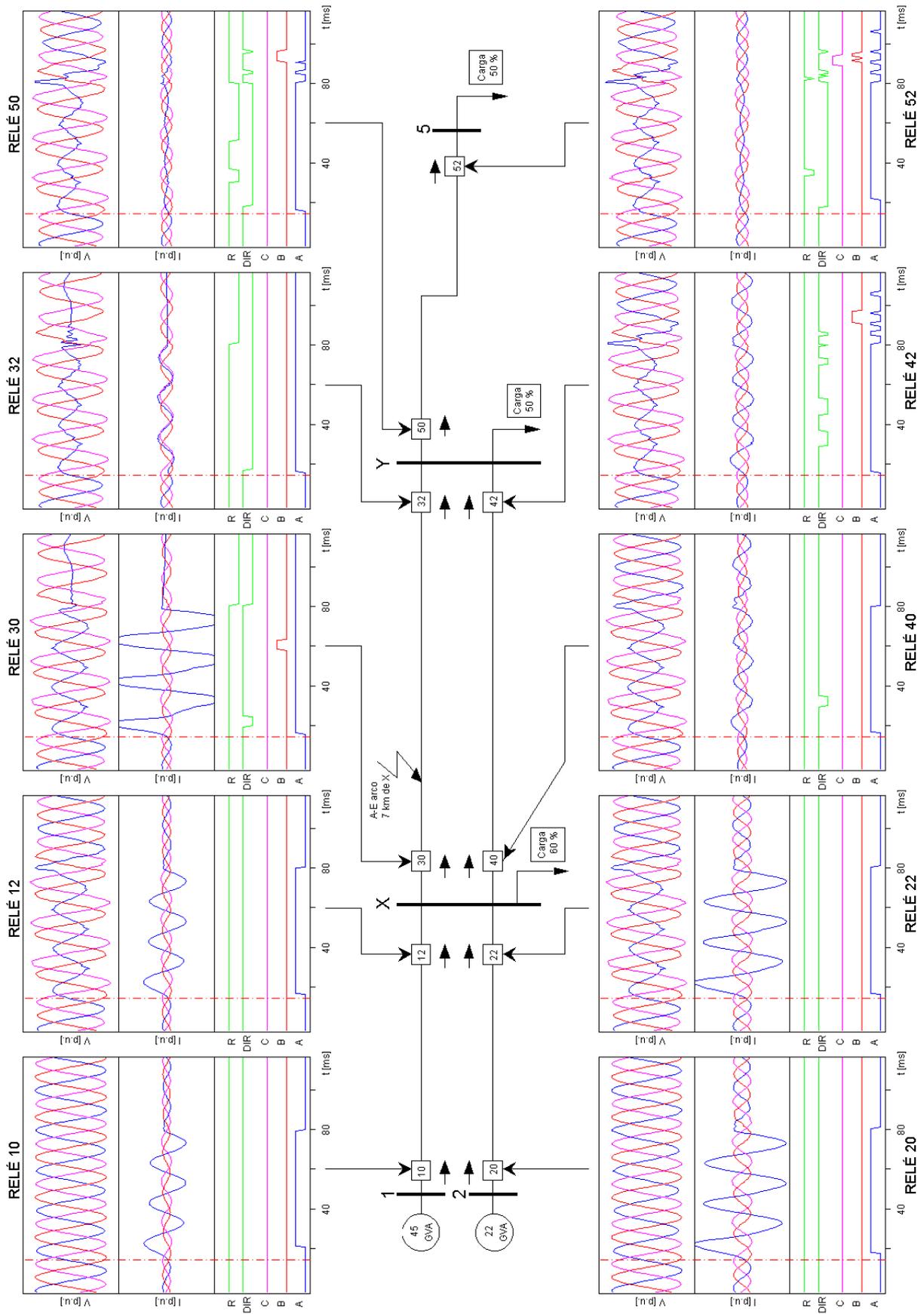


Fig. A.73 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase A a tierra con arco de 35 kV y a 7 km de la barra X.

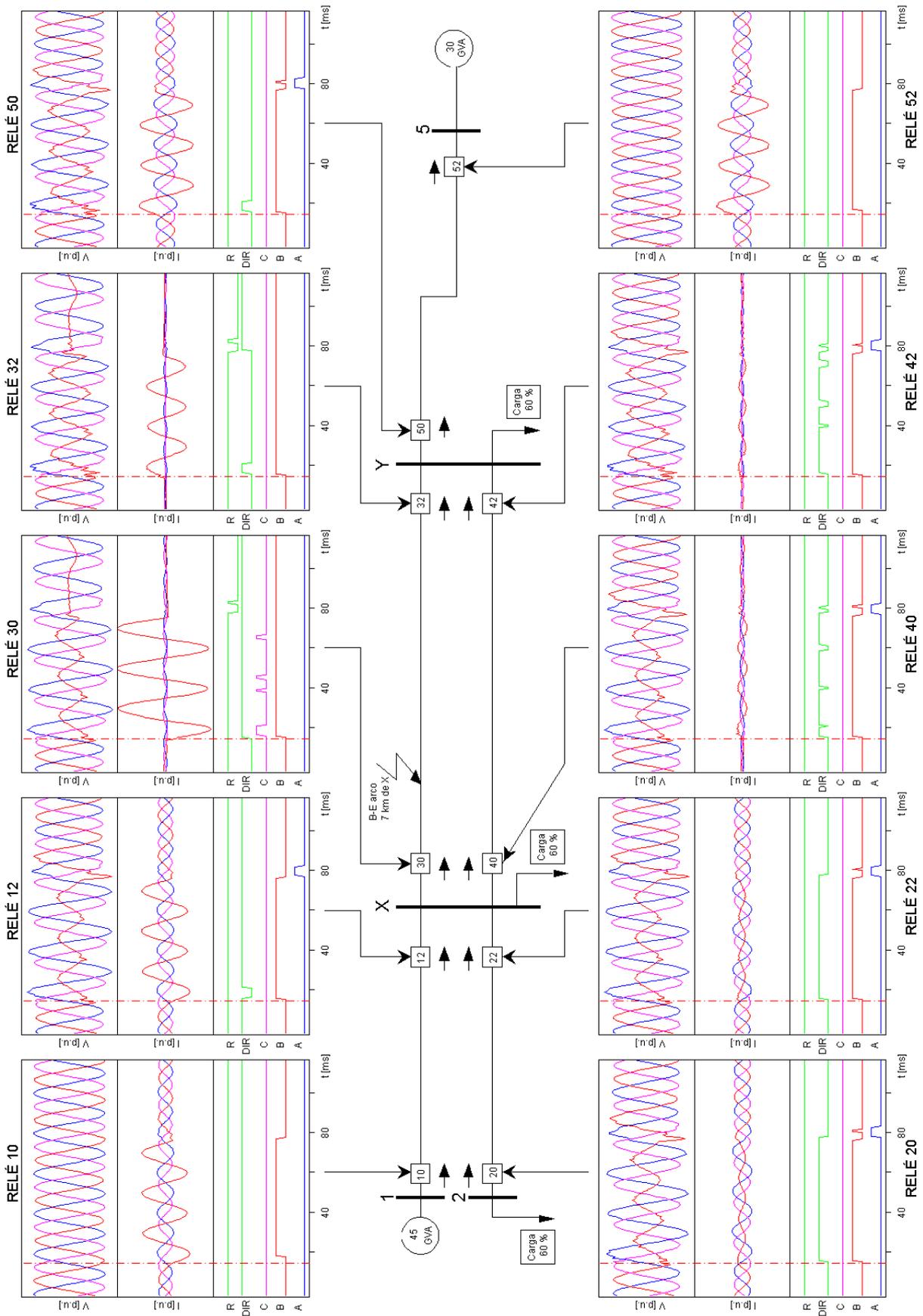


Fig. A.74 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase B a tierra con arco de 35 kV y a 7 km de la barra X.

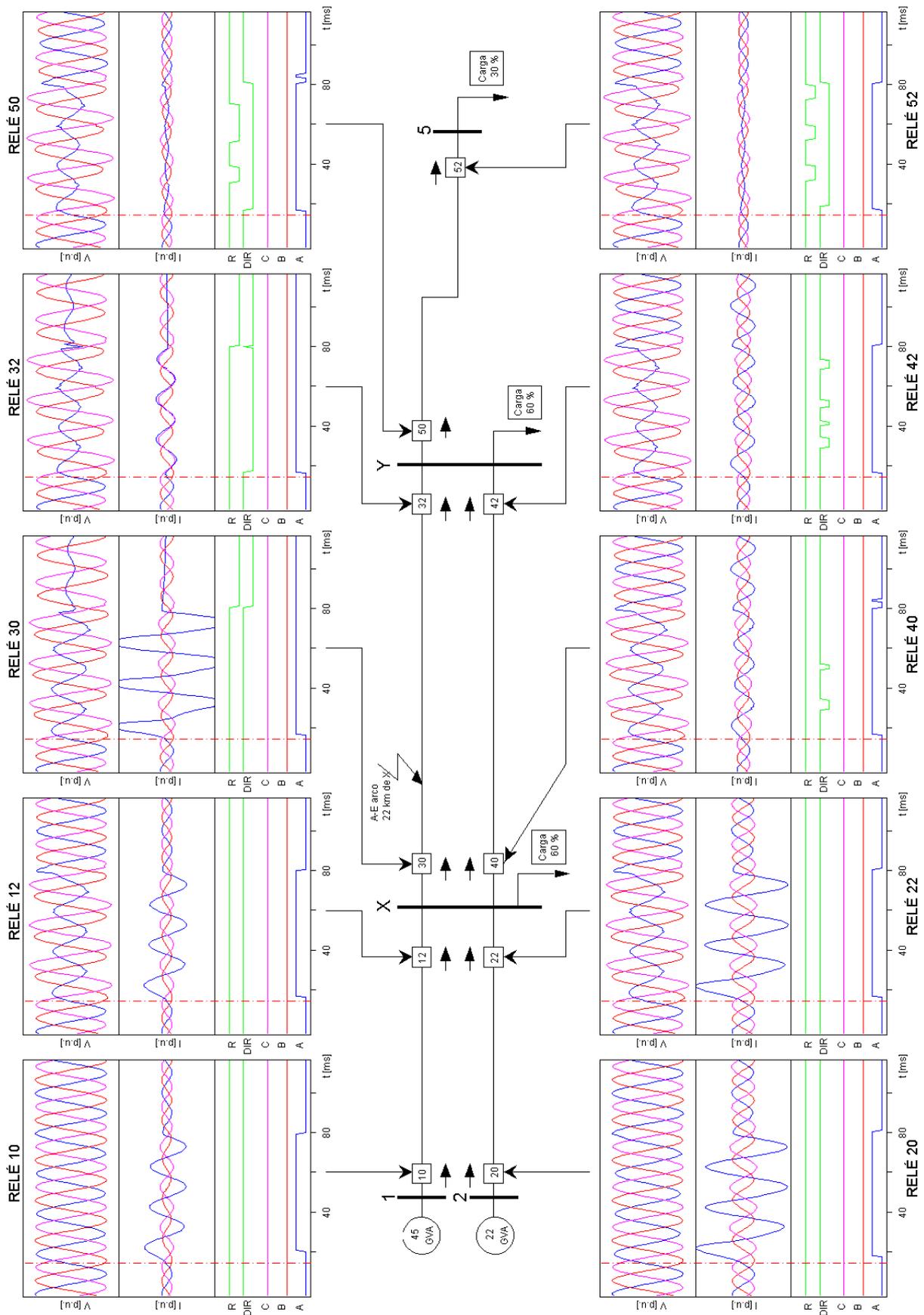


Fig. A.75 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase A a tierra con arco de 35 kV y a 22 km de la barra X.

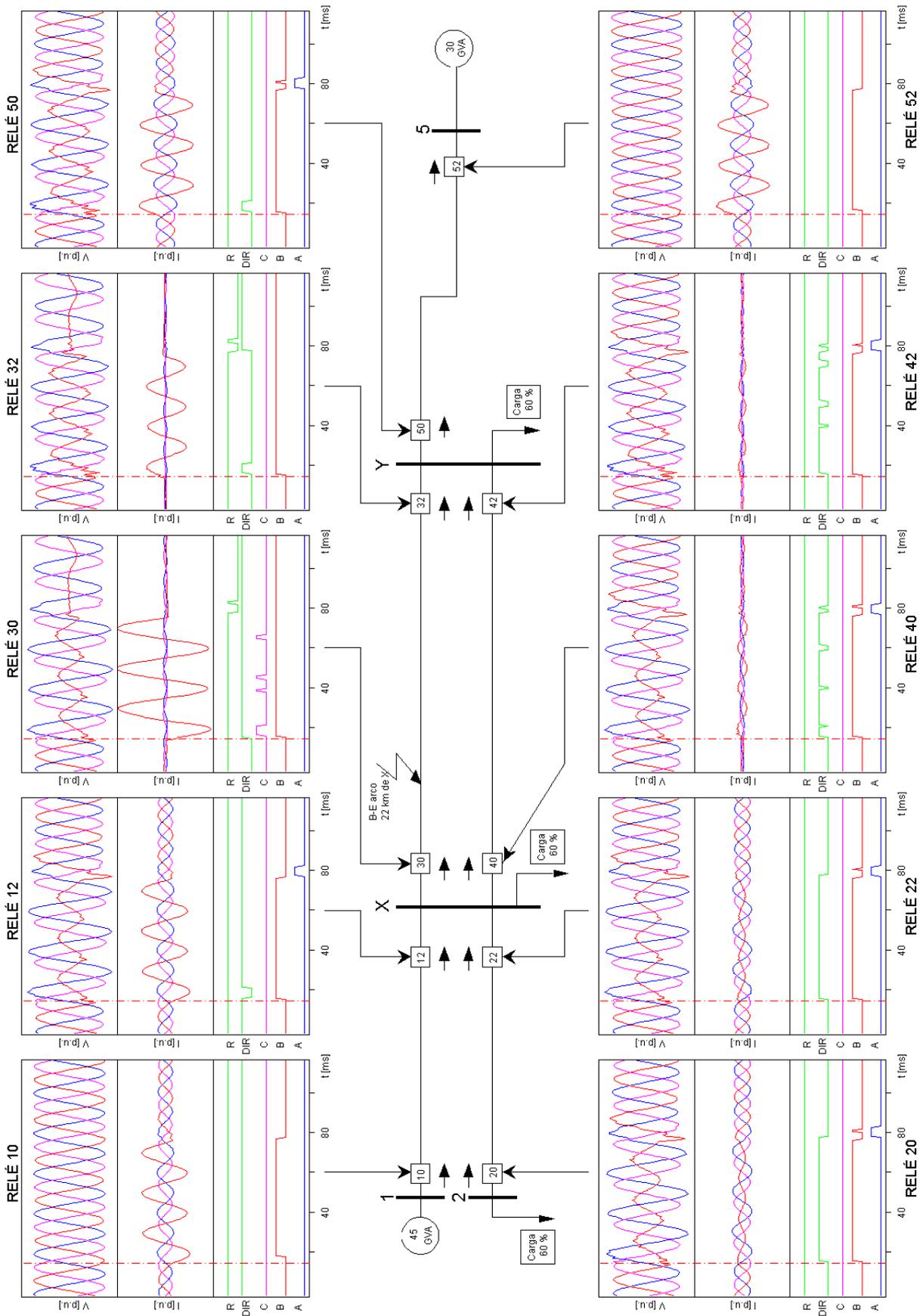


Fig. A.76 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase B a tierra con arco de 35 kV y a 22 km de la barra X.

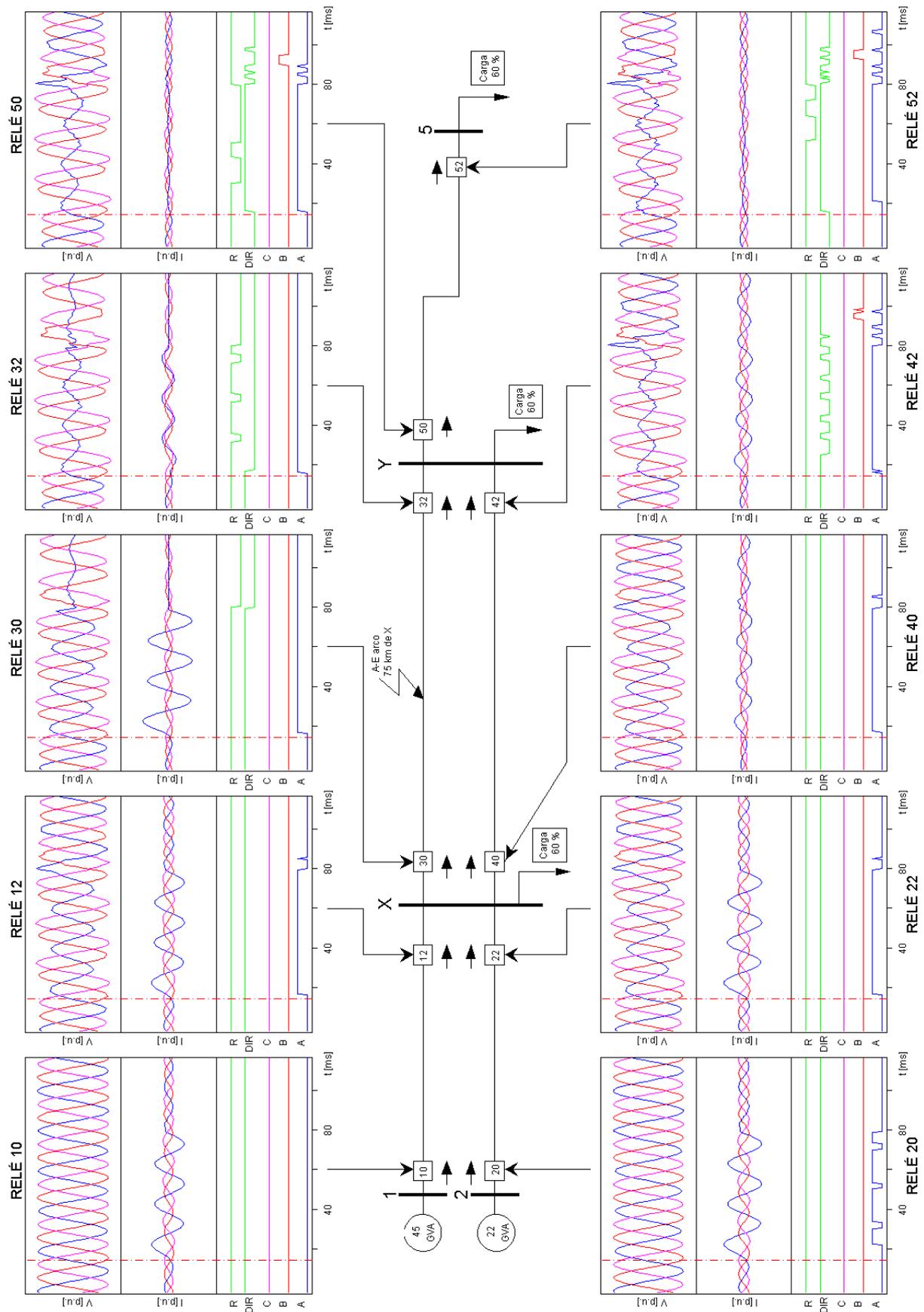


Fig. A.77 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase A a tierra con arco de 35 kV y a 75 km de la barra X.

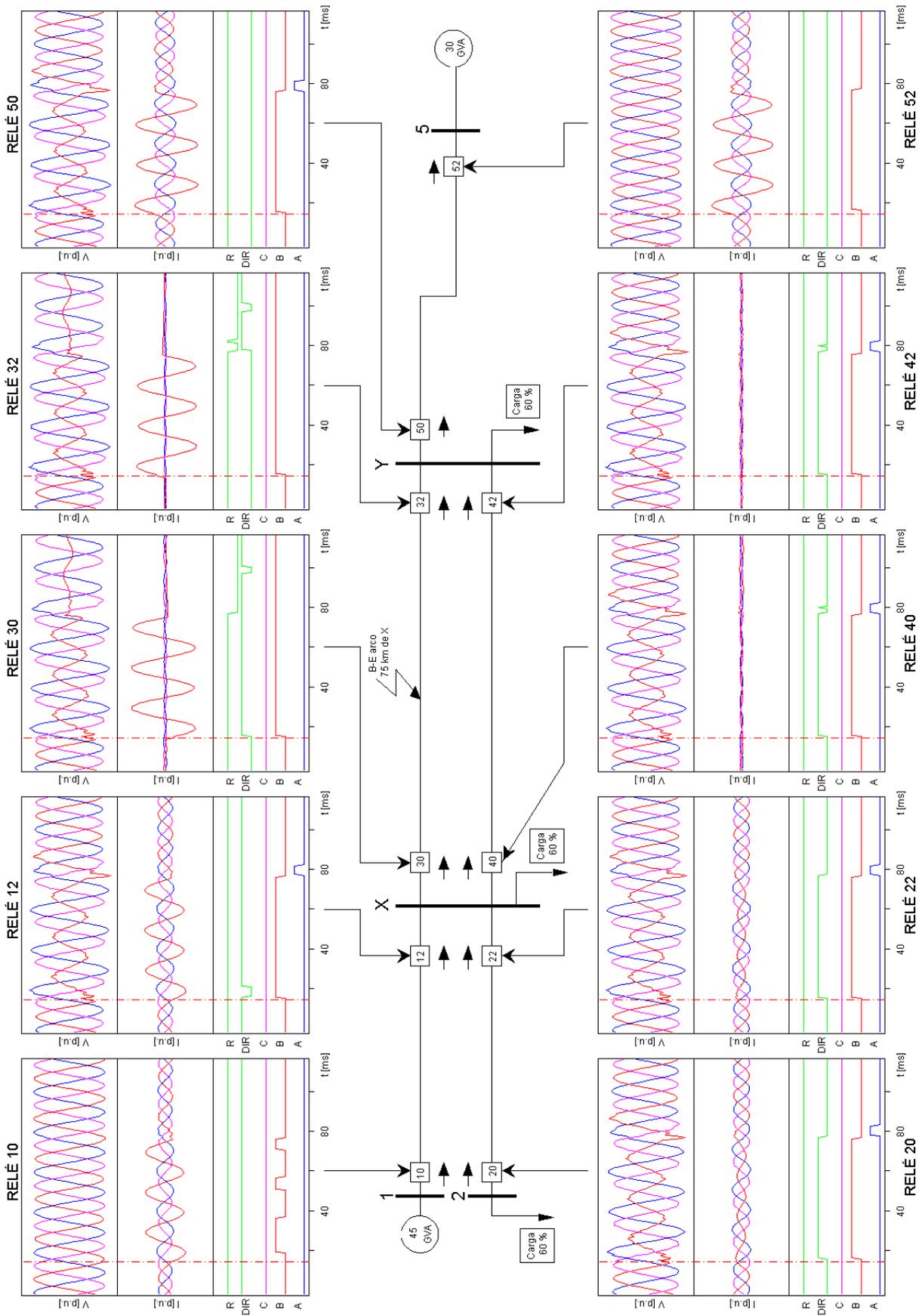


Fig. A.78 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase B a tierra con arco de 35 kV y a 75 km de la barra X.

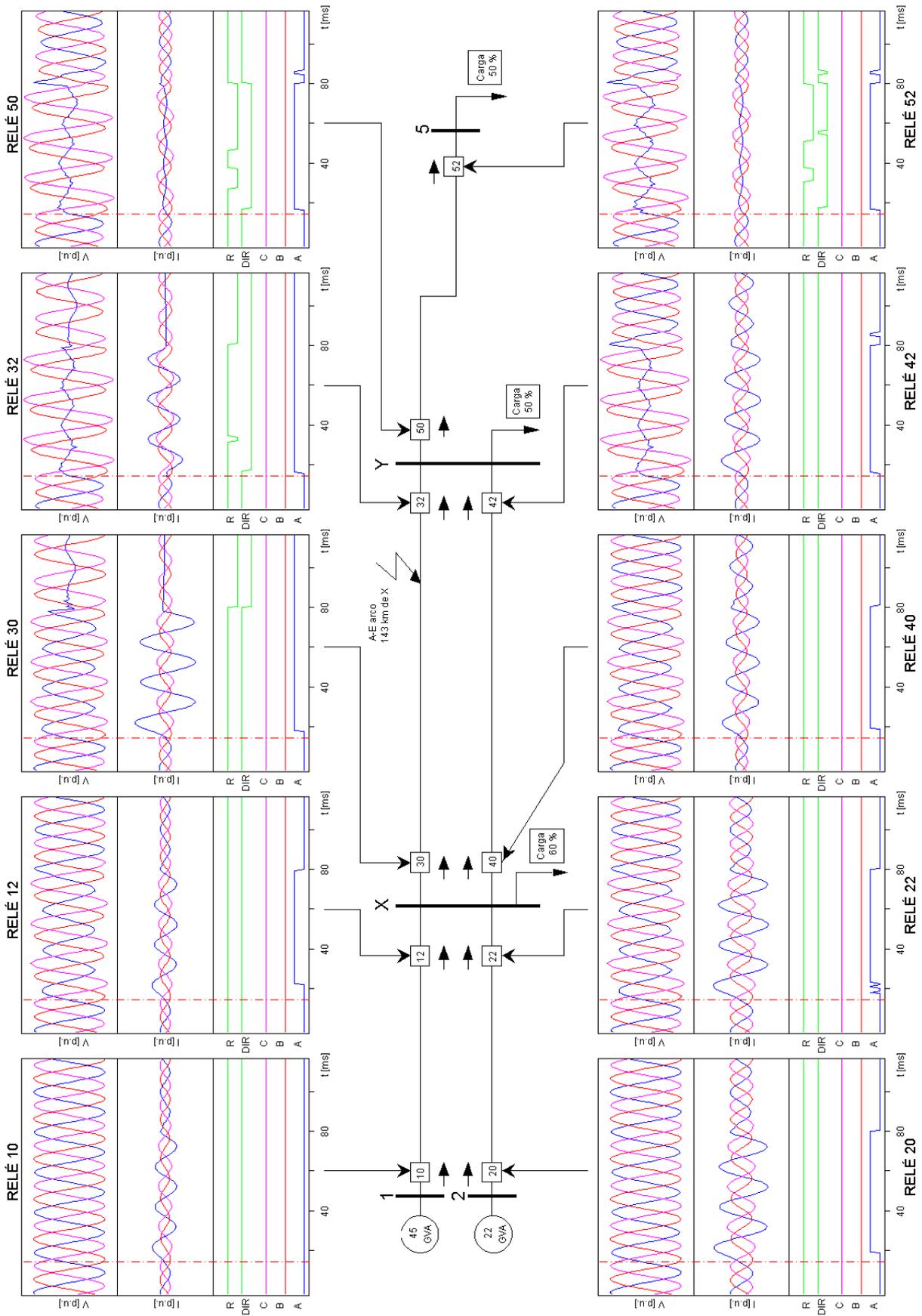


Fig. A.79 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase A a tierra con arco de 35 kV y a 143 km de la barra X.

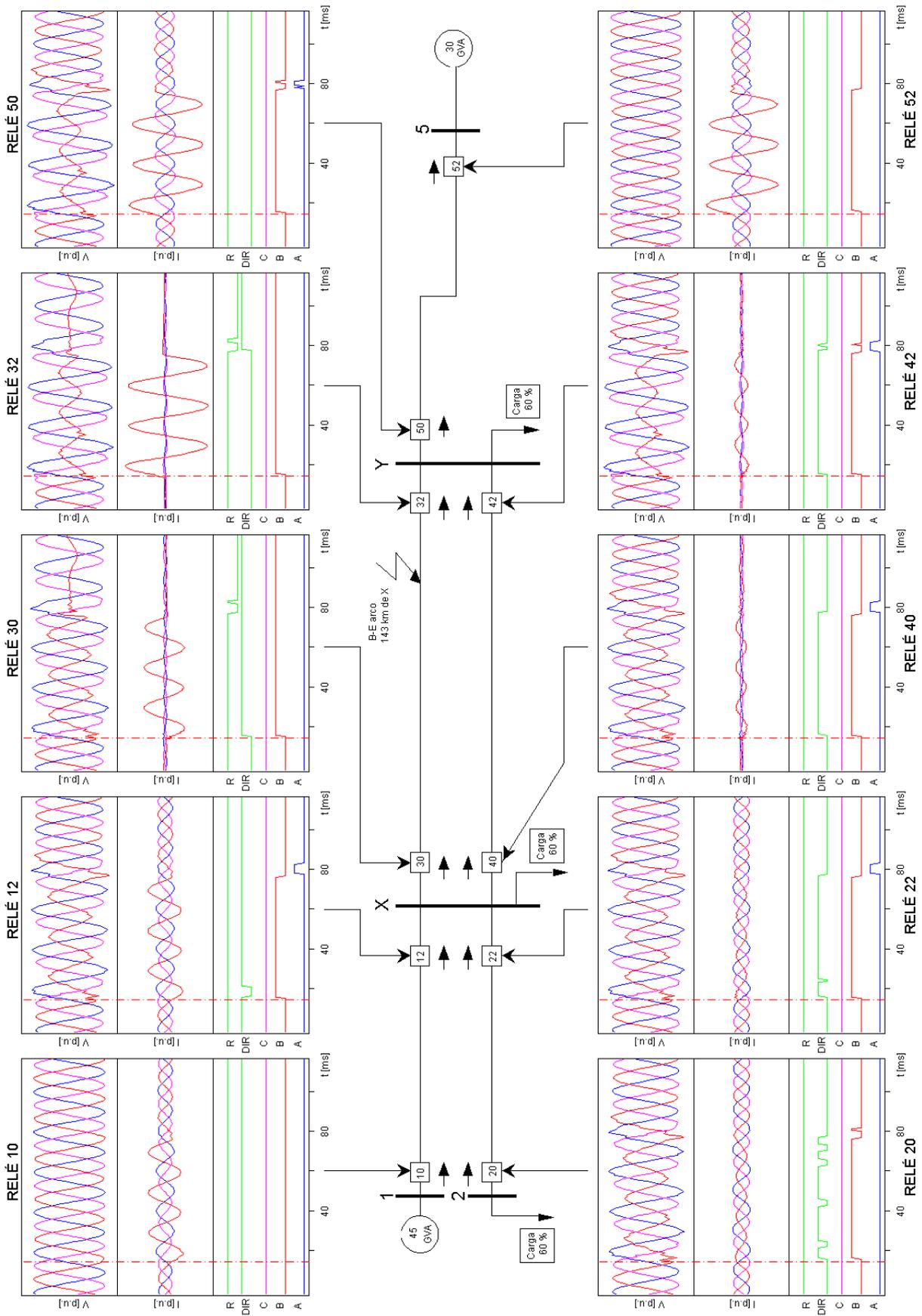


Fig. A.80 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase B a tierra con arco de 35 kV y a 143 km de la barra X.

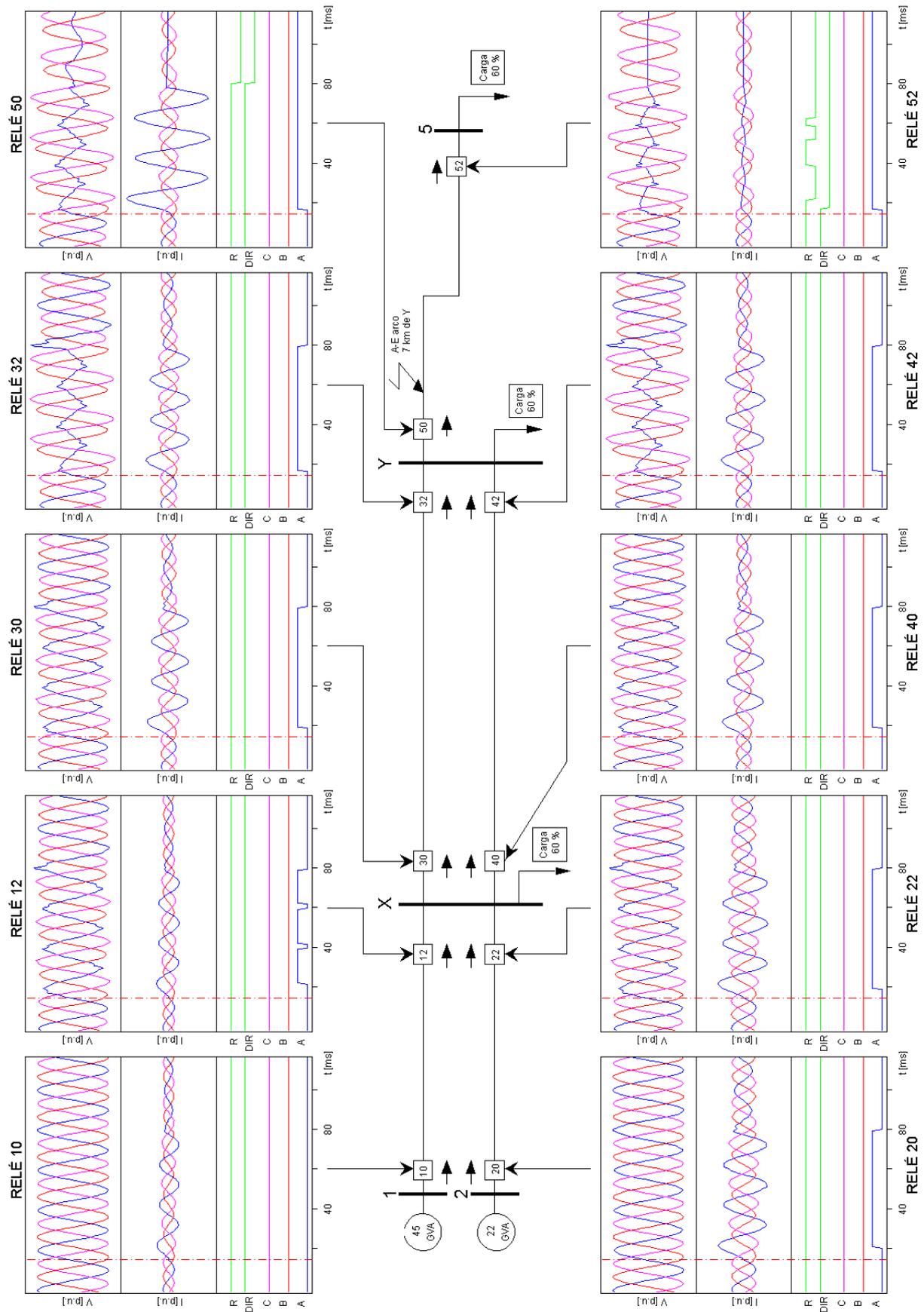


Fig. A.81 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase A y tierra con arco de 35 kV y a 7 km de la barra Y.

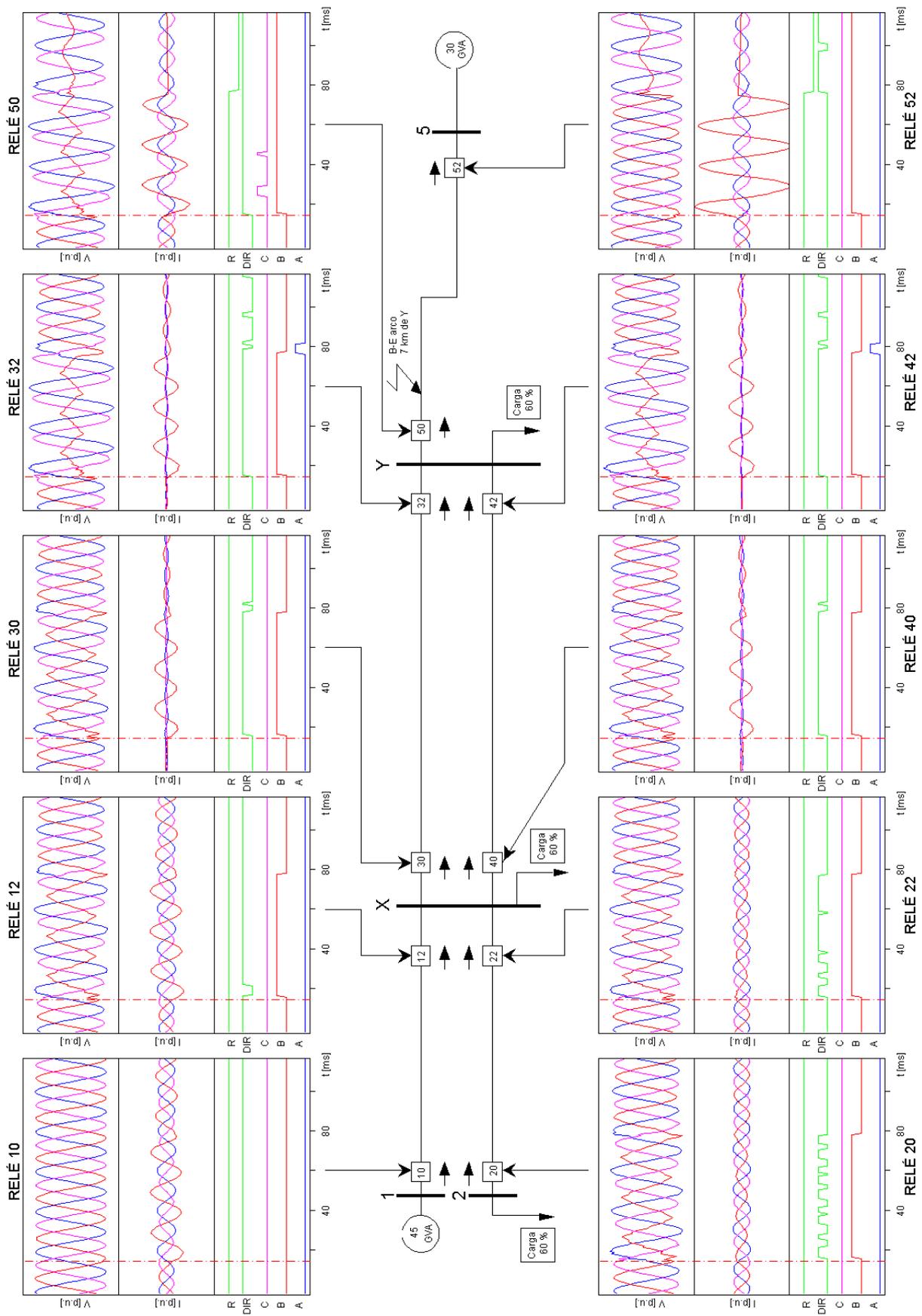


Fig. A.82 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo de la fase B a tierra con arco de 35 kV y a 7 km de la barra Y.

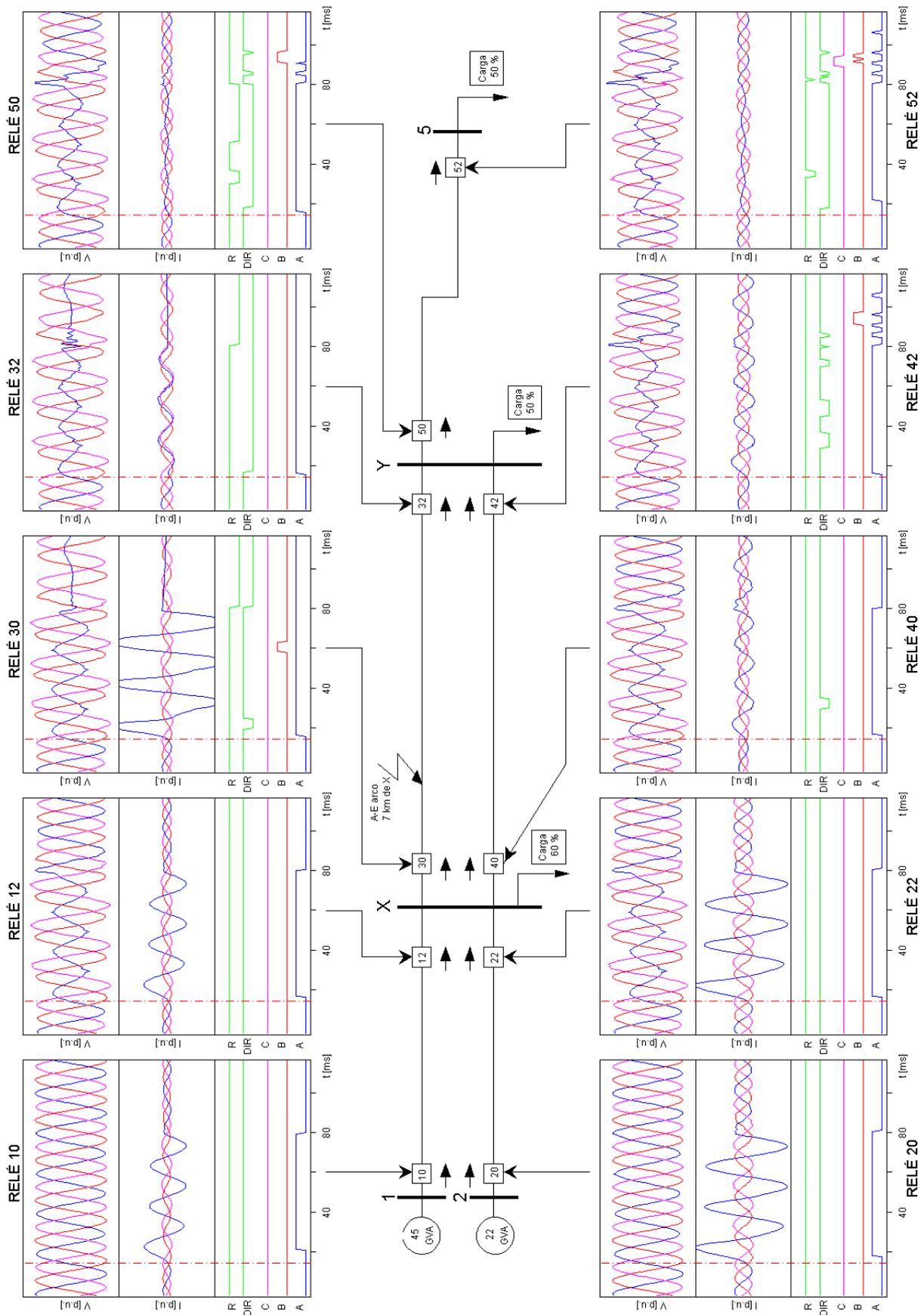


Fig. A.83 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A y B, y a 93 km de la barra 1.

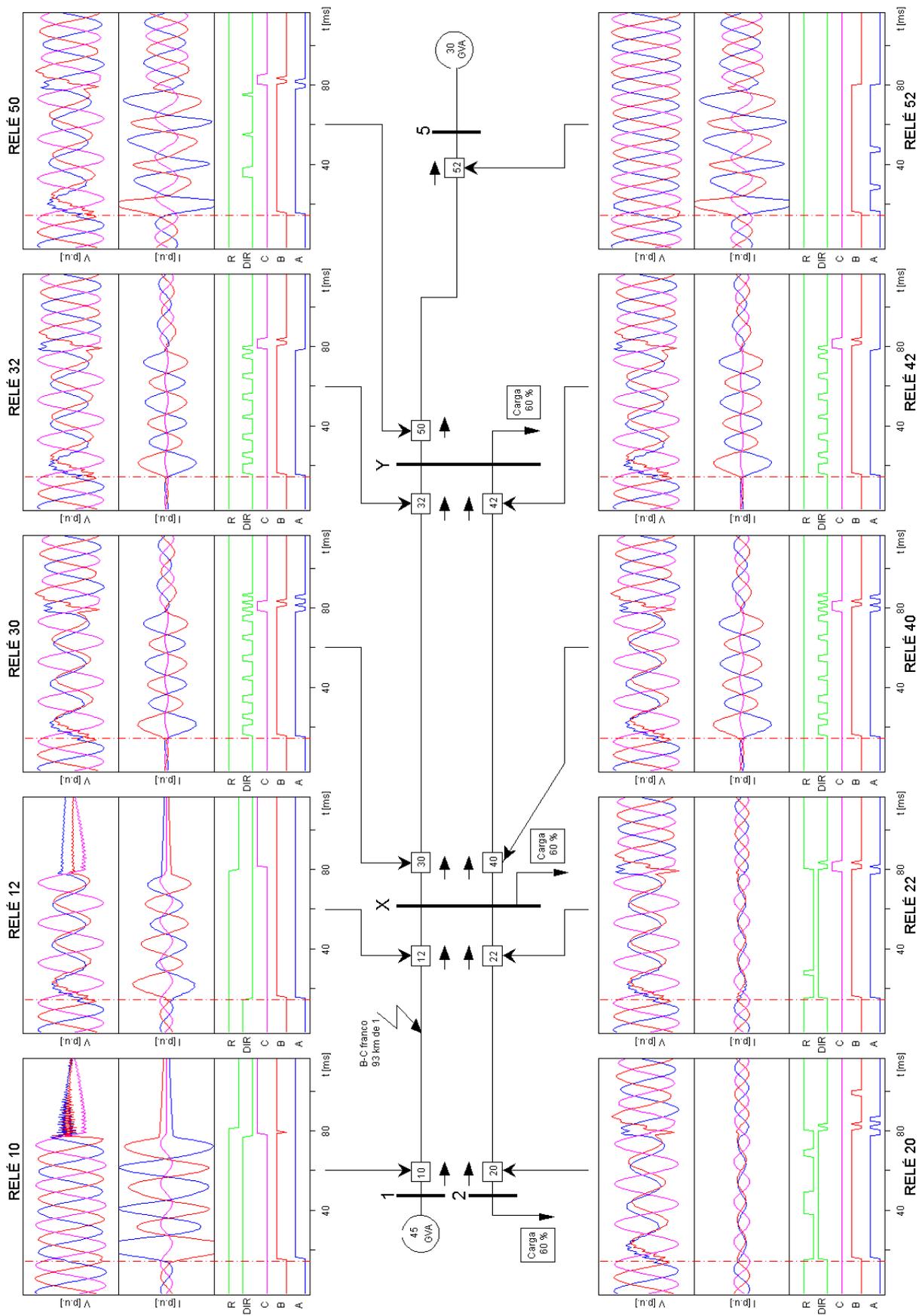


Fig. A.84 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases B y C, y a 93 km de la barra 1.

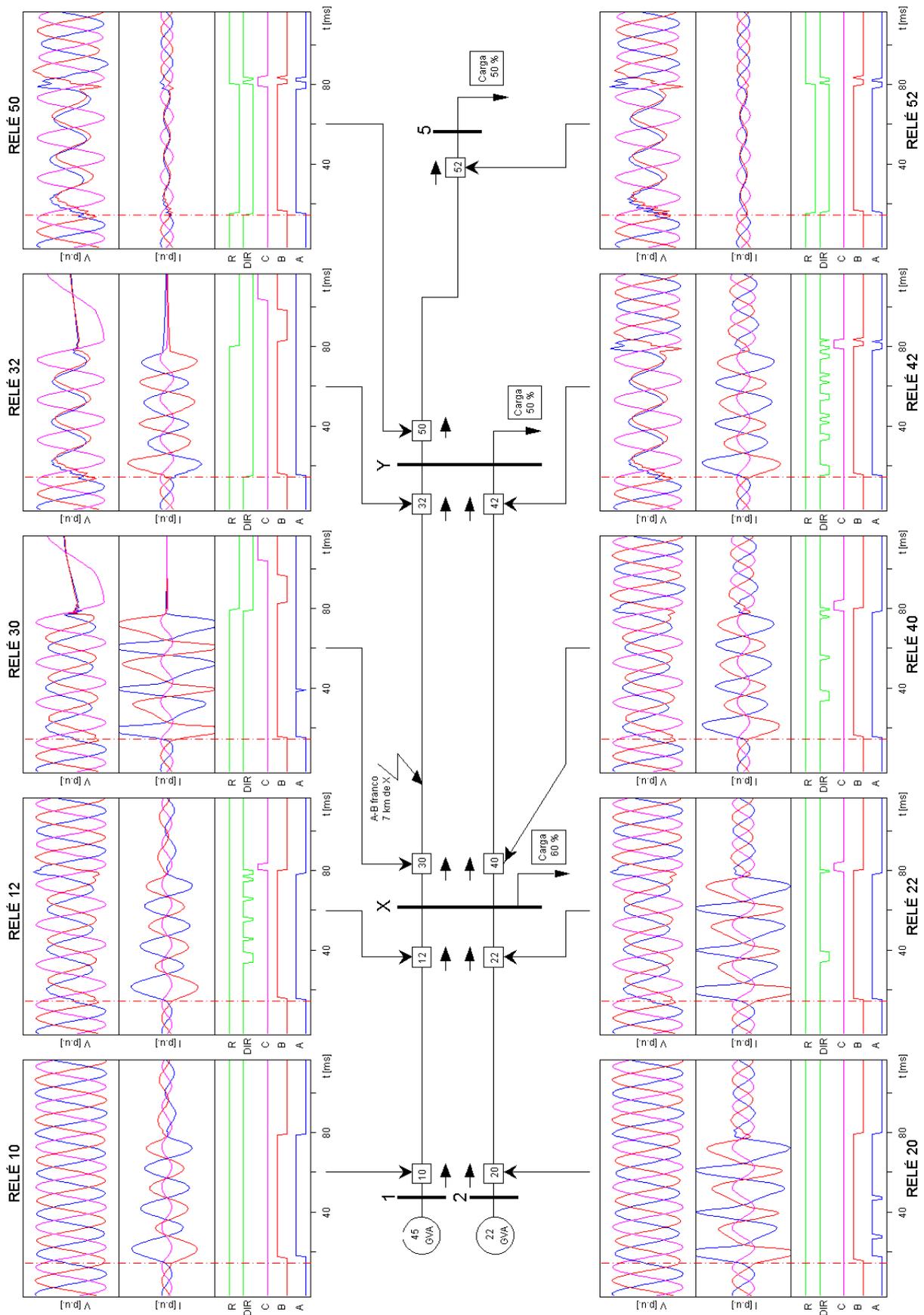


Fig. A.85 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A y B, y a 7 km de la barra X.

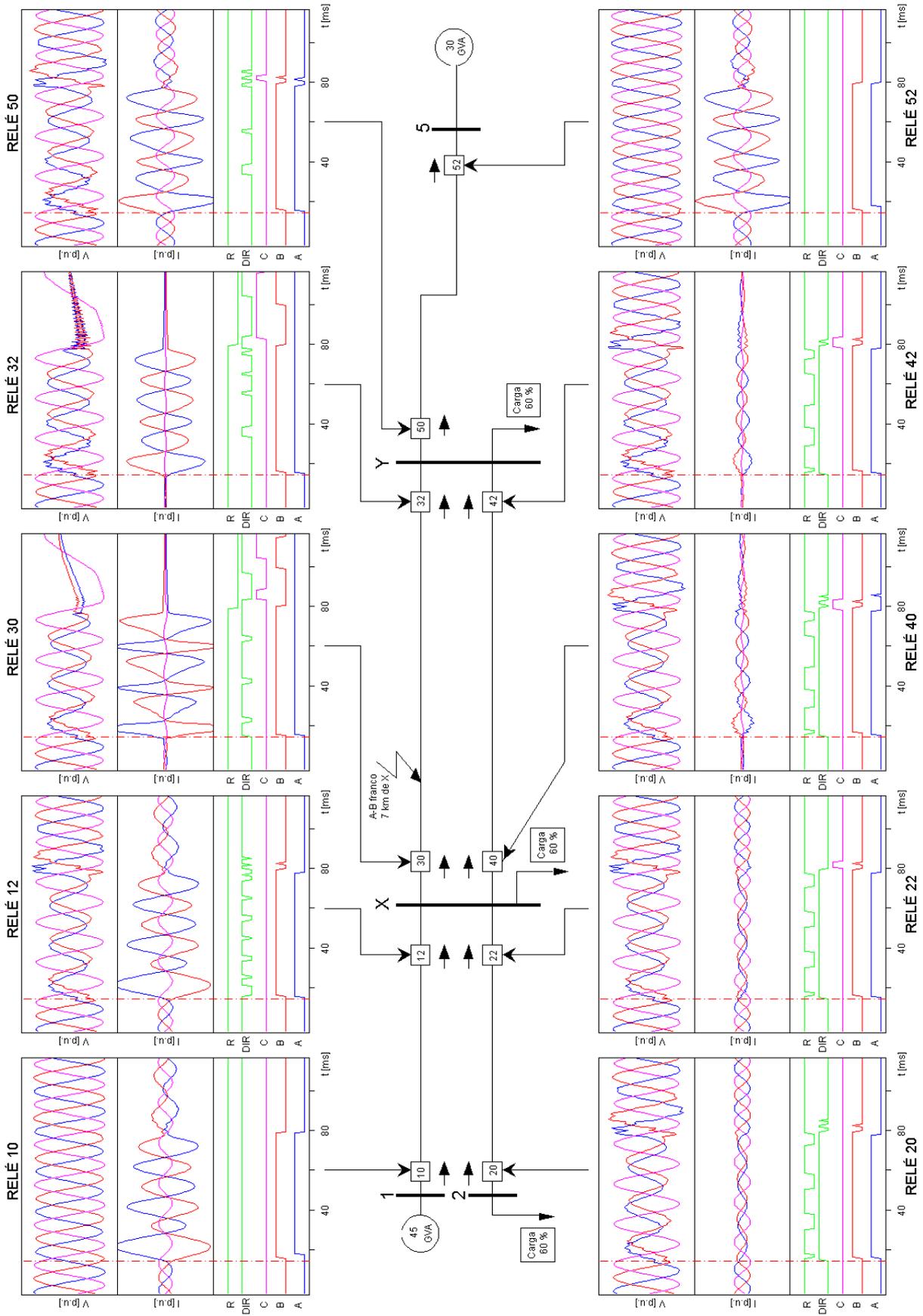


Fig. A.86 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases B y C, y a 7 km de la barra X.

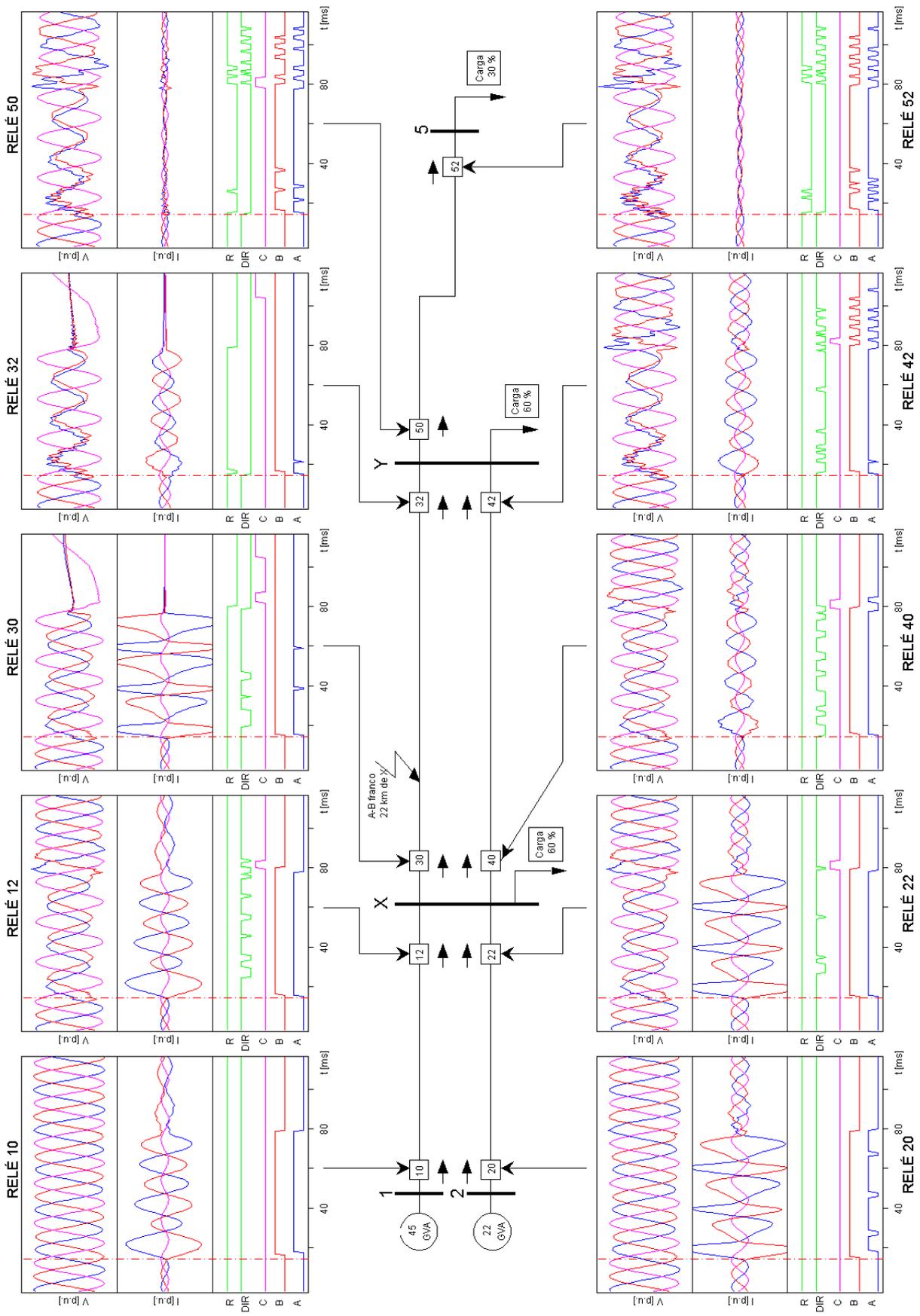


Fig. A.87 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A y B, y a 22 km de la barra X.

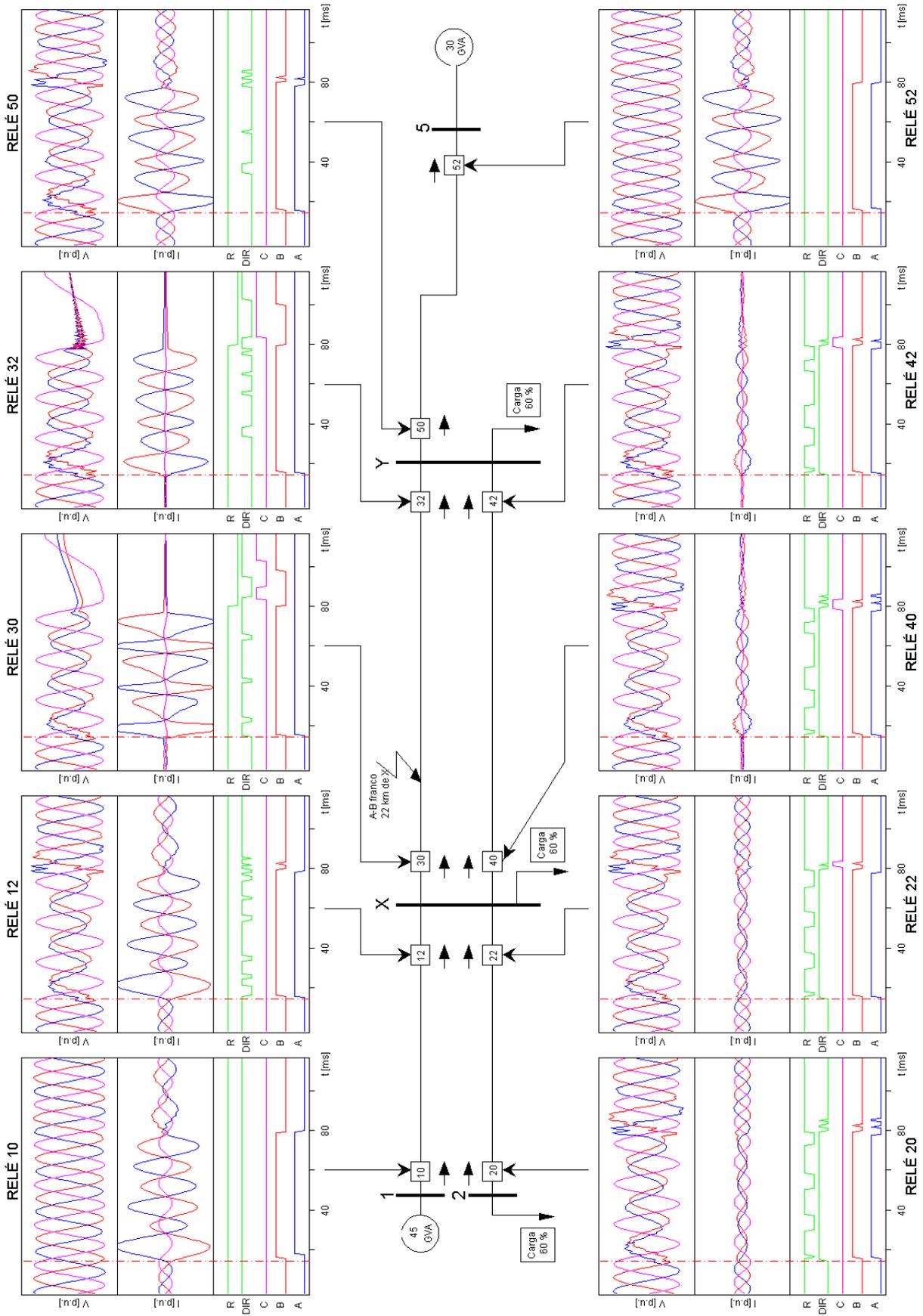


Fig. A.88 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A y B, y a 22 km de la barra X.

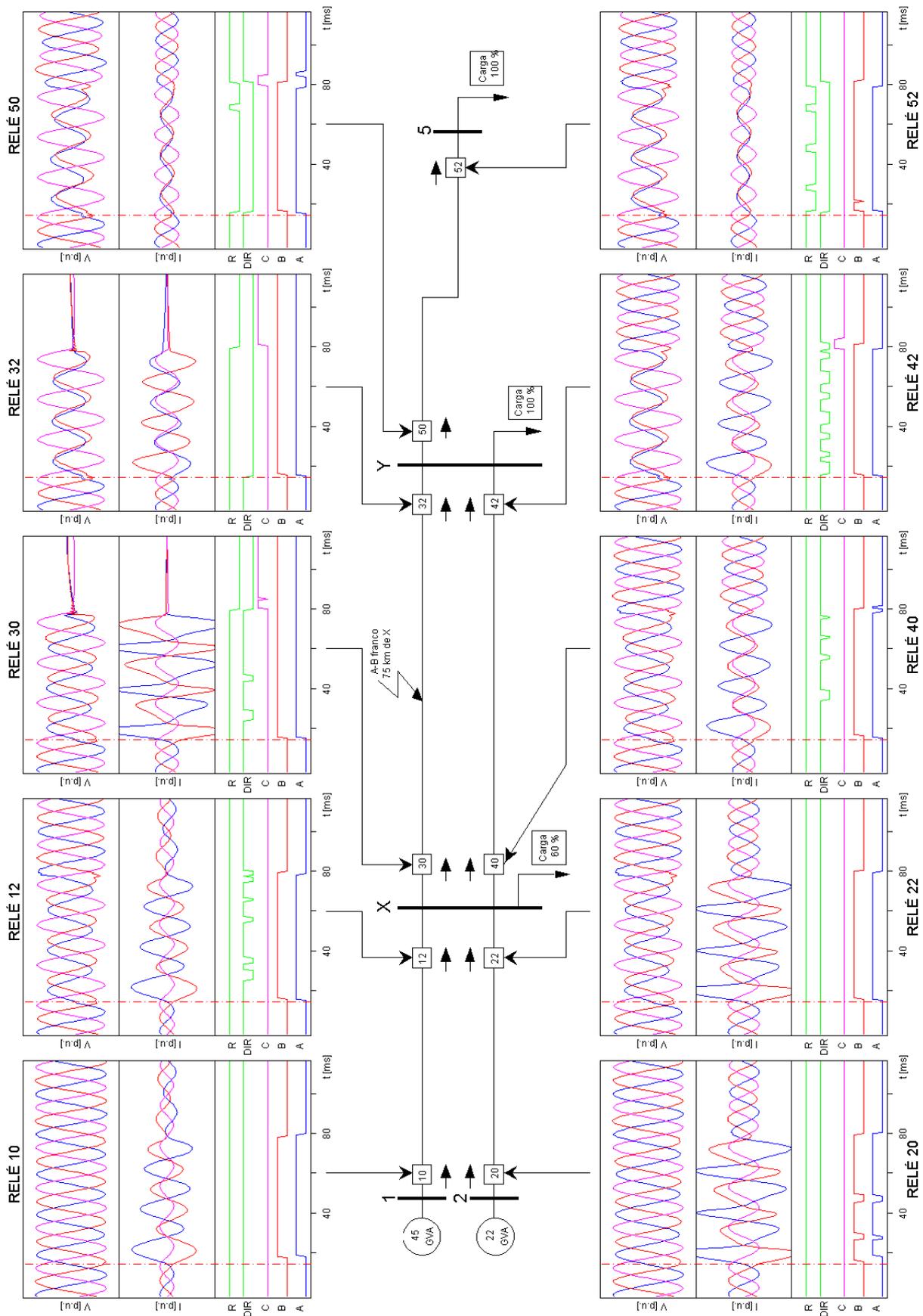


Fig. A.89 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A y B, y a 75 km de la barra X.

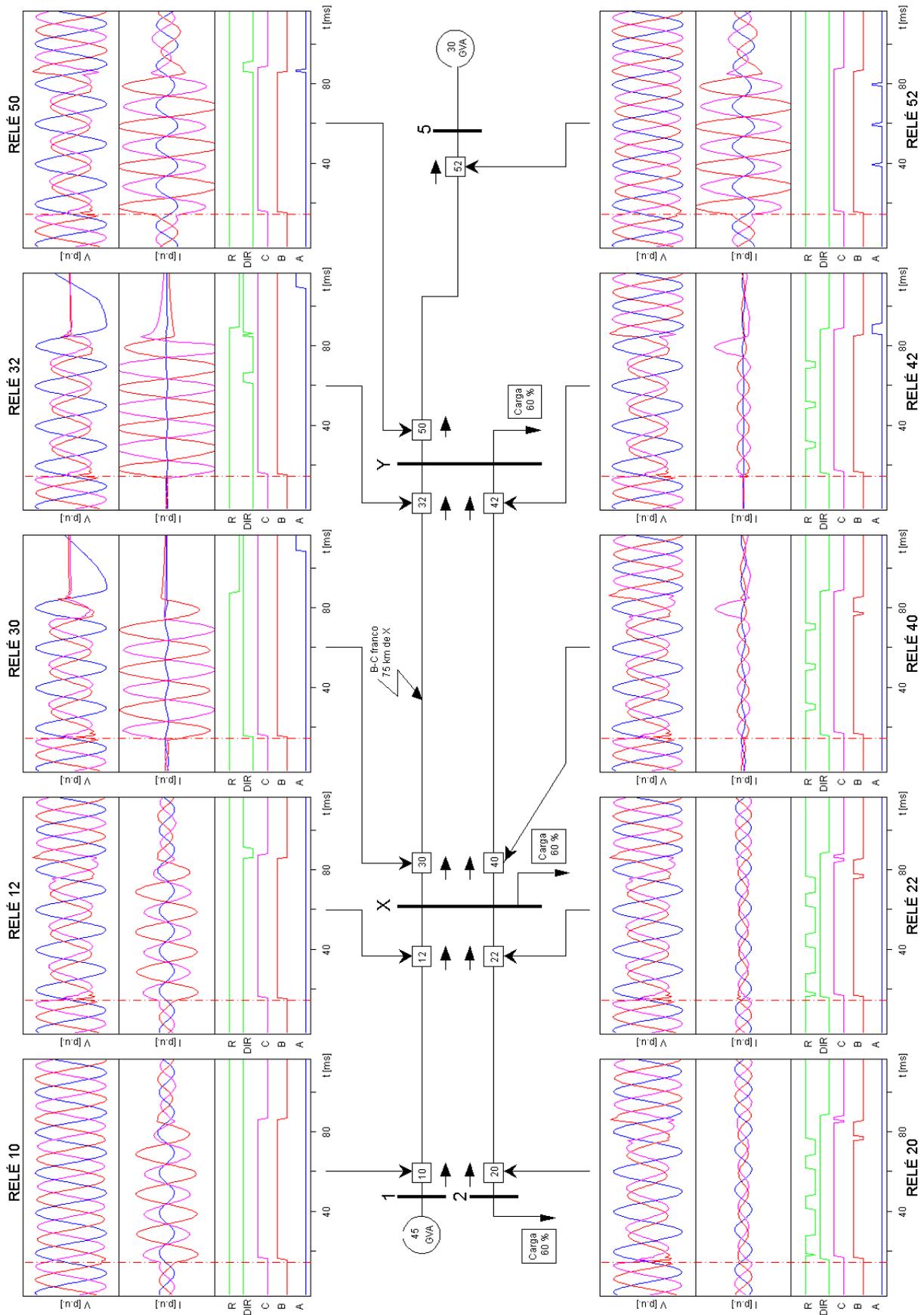


Fig. A.90 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases B y C, y a 75 km de la barra X.

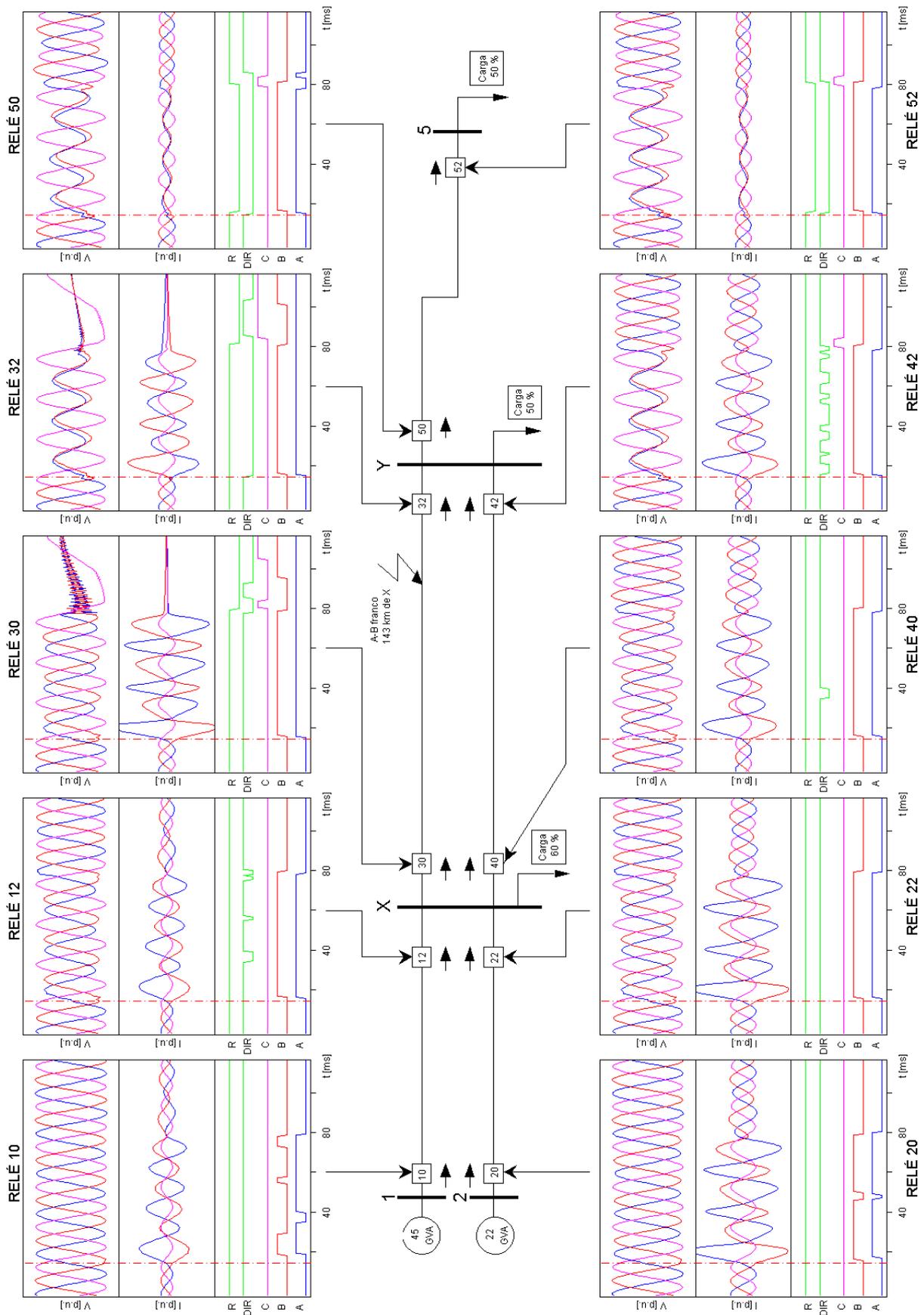


Fig. A.91 Respuesta del relé MWF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A y B, y a 143 km de la barra X.

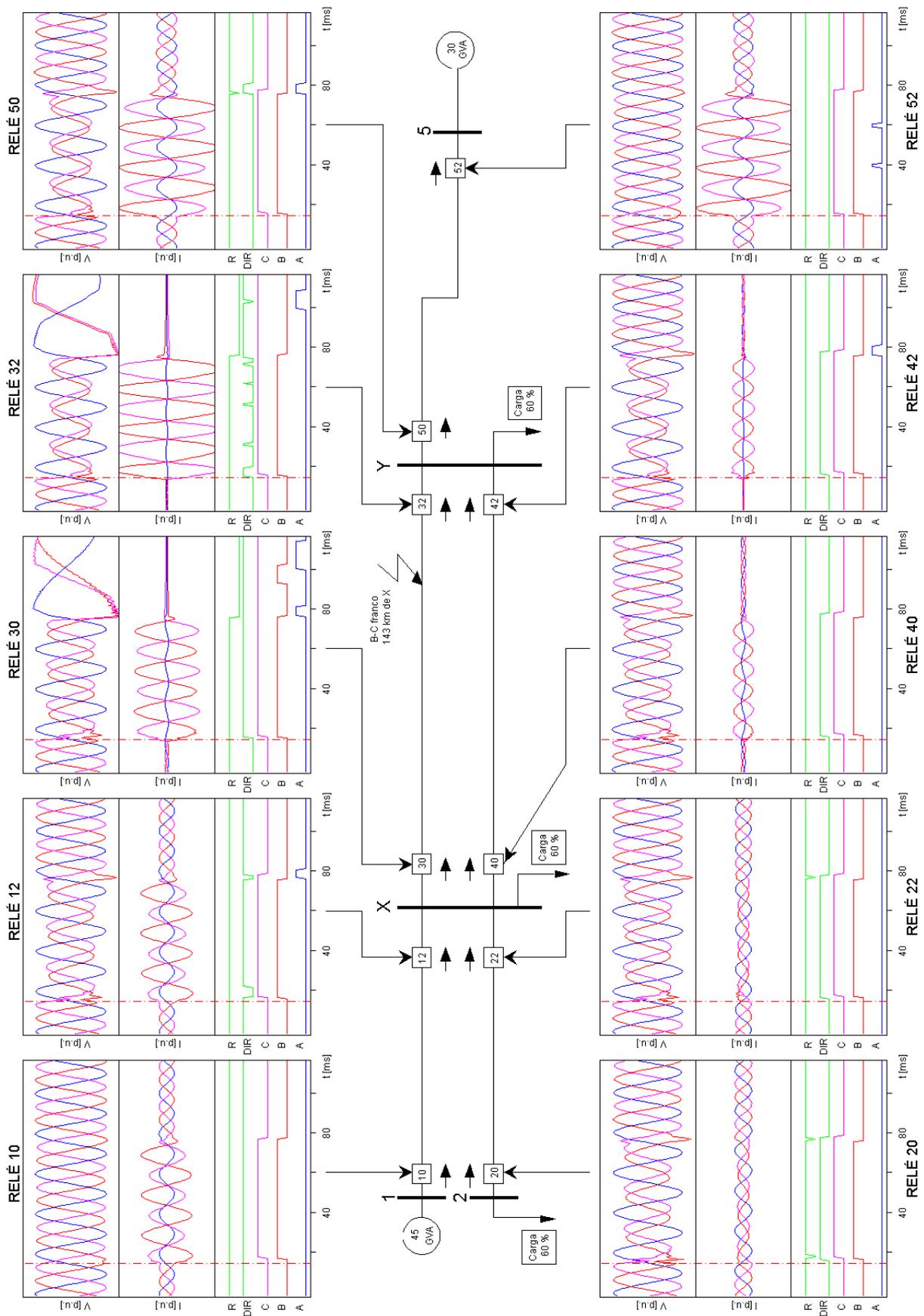


Fig. A.92 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases B y C, y a 143 km de la barra X.

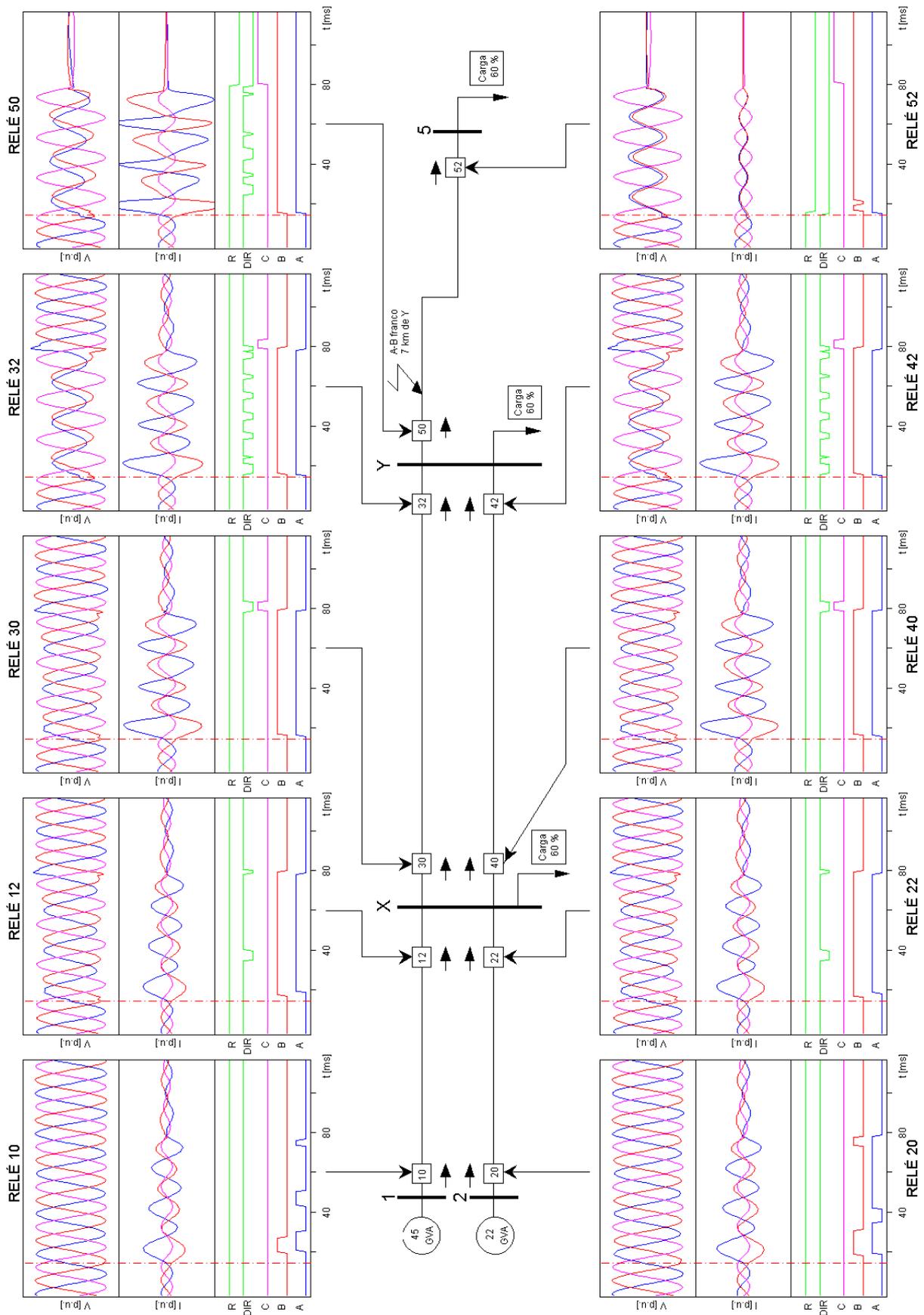


Fig. A.93 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A y B, y a 7 km de la barra Y.

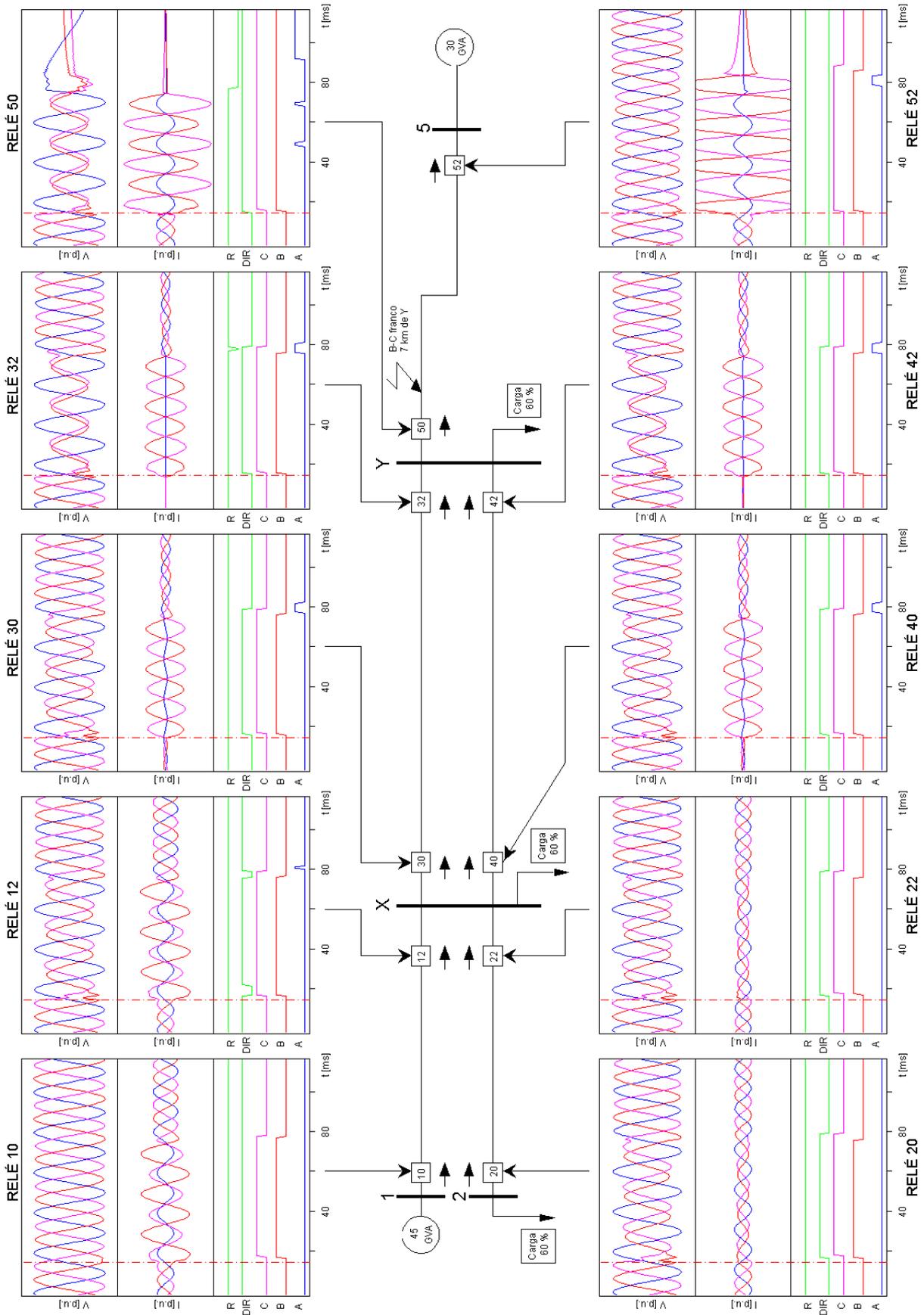


Fig. A.94 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases B y C, y a 7 km de la barra Y.

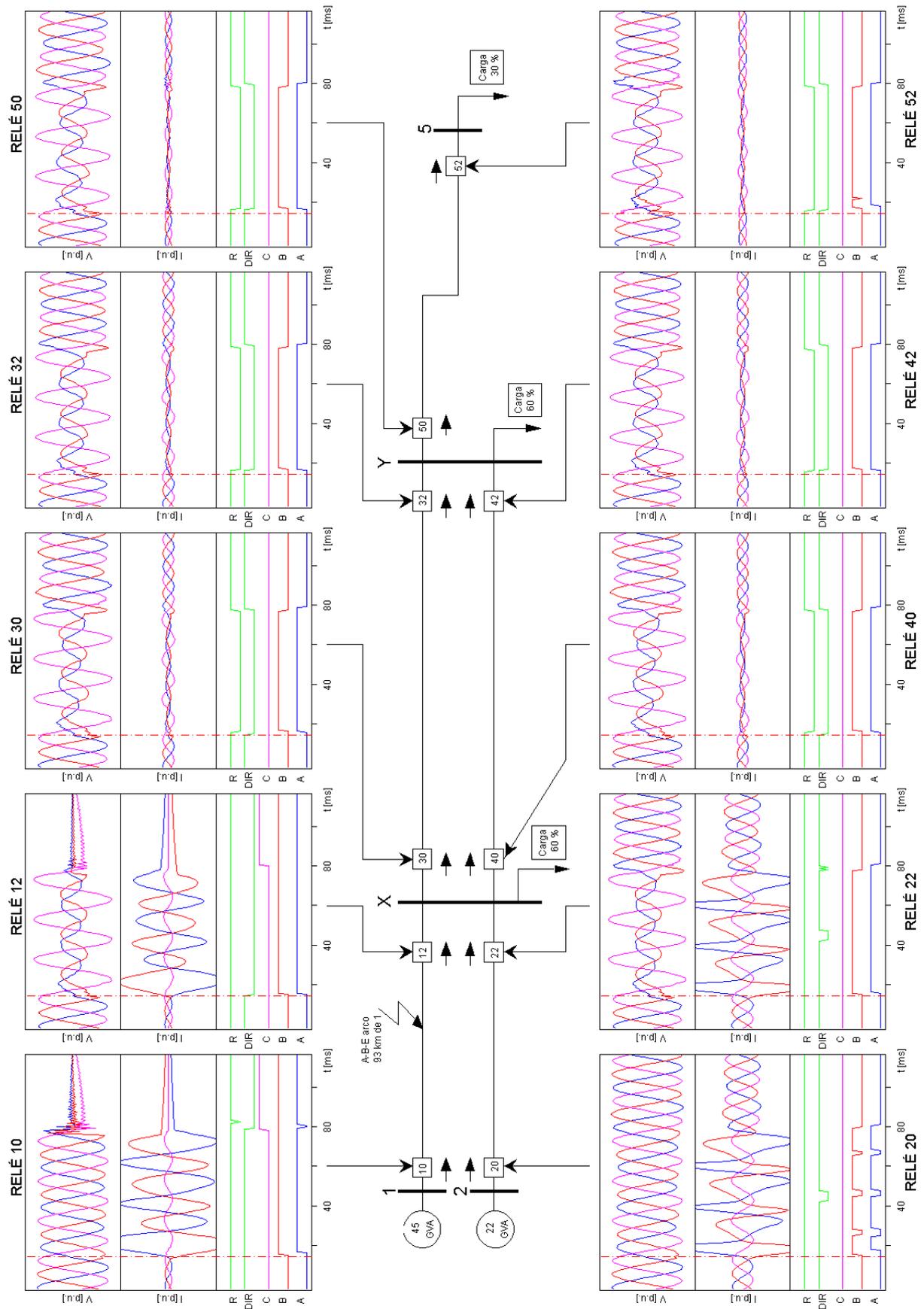


Fig. A.95 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A y B, y tierra con arco de 35 kV y a 93 km de la barra 1.

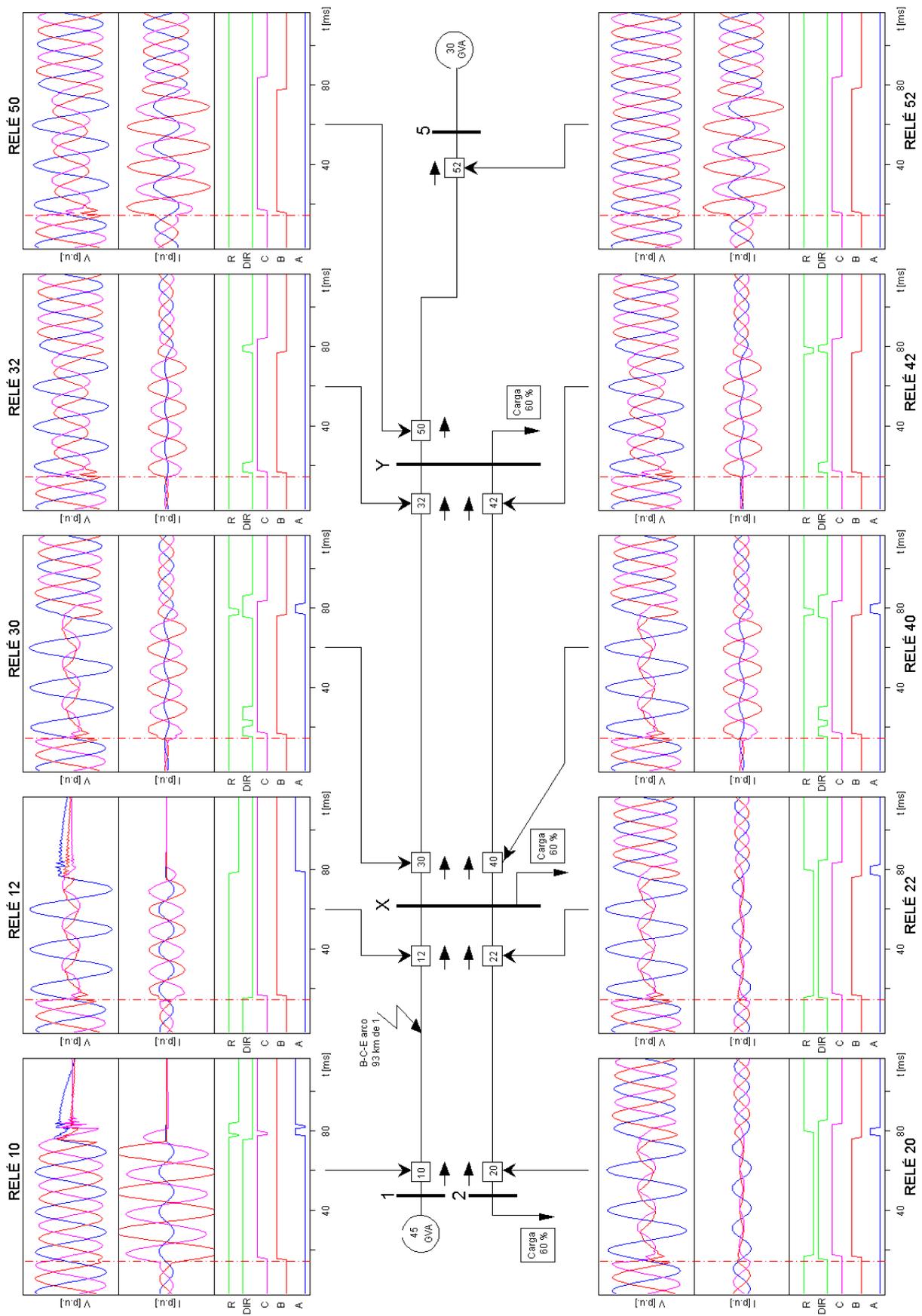


Fig. A.96 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases B, C y tierra con arco de 35 kV y a 93 km de la barra 1.

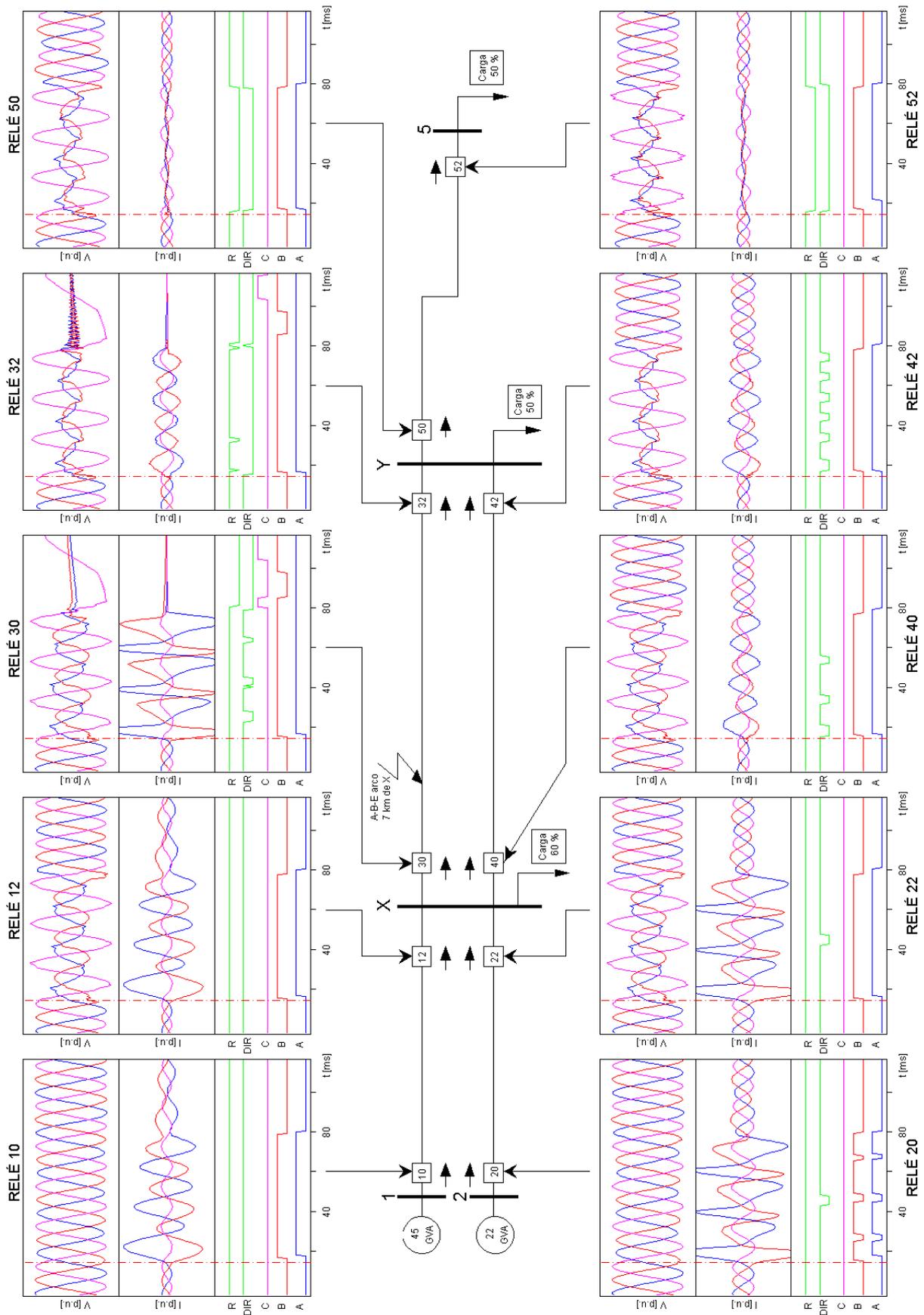


Fig. A.97 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases B, C y tierra con arco de 35 kV y a 7 km de la barra X.

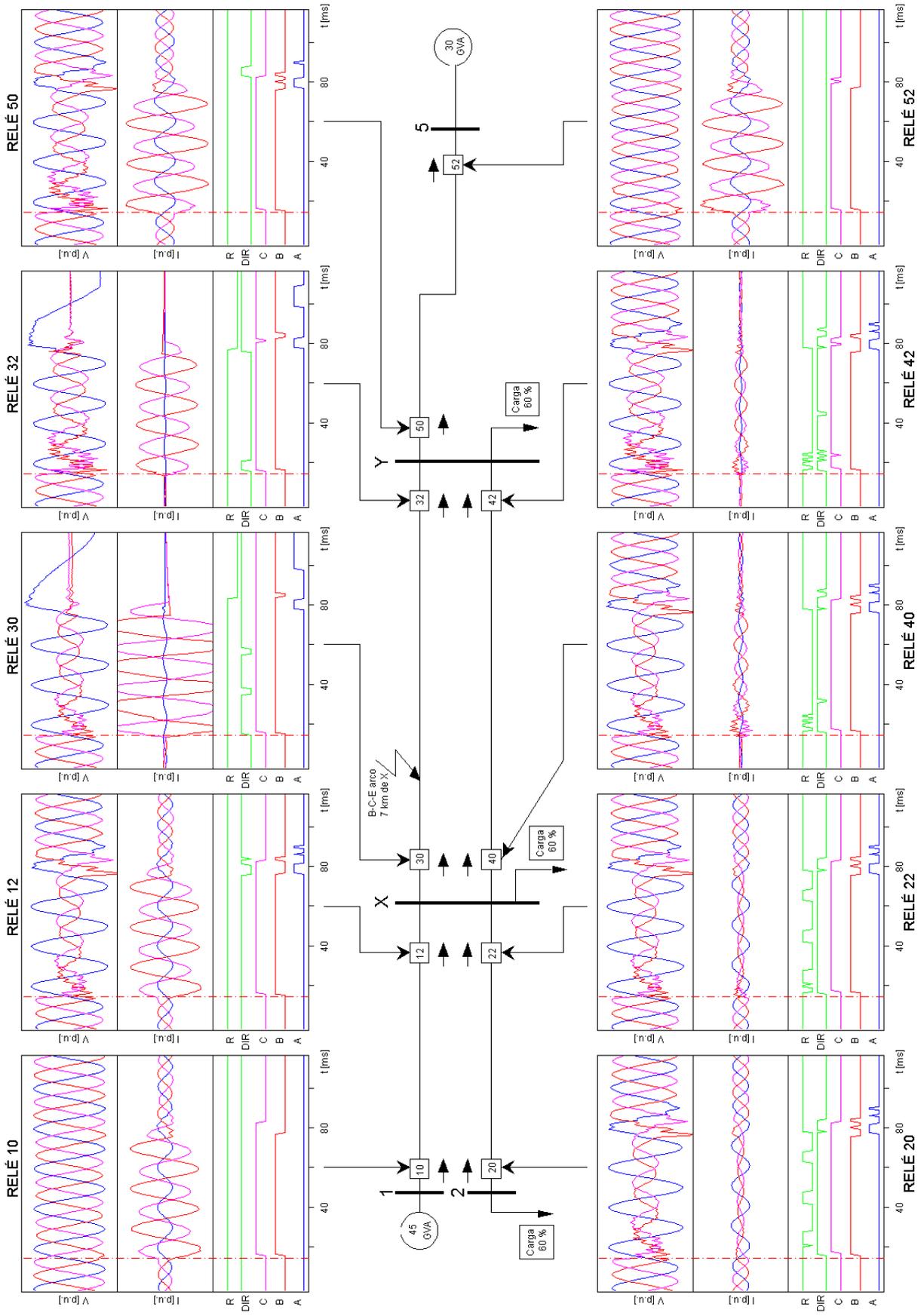


Fig. A.98 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases B, C y tierra con arco de 35 kV y a 7 km de la barra X.

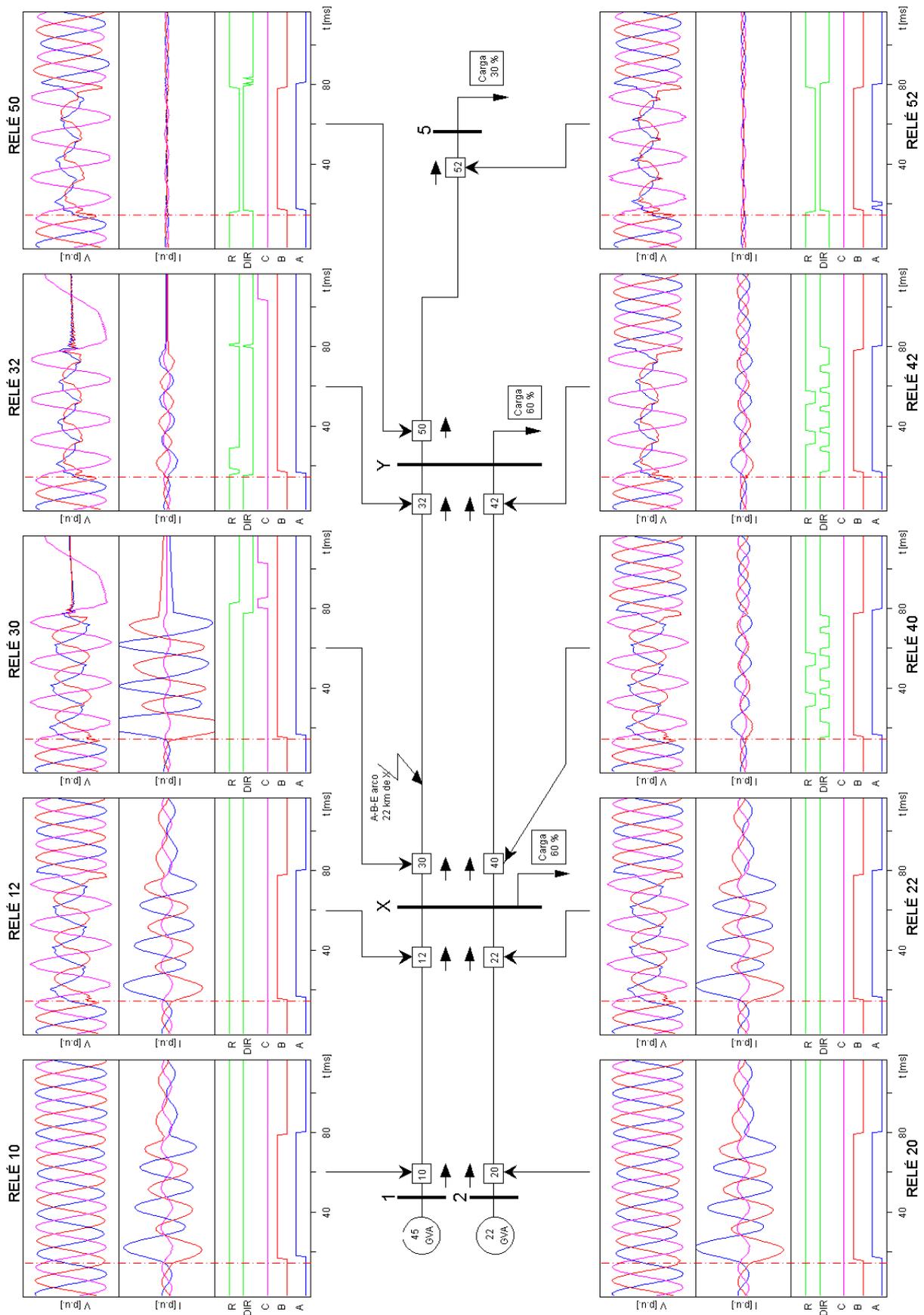


Fig. A.99 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A, B y tierra con arco de 35 kV y a 22 km de la barra X.

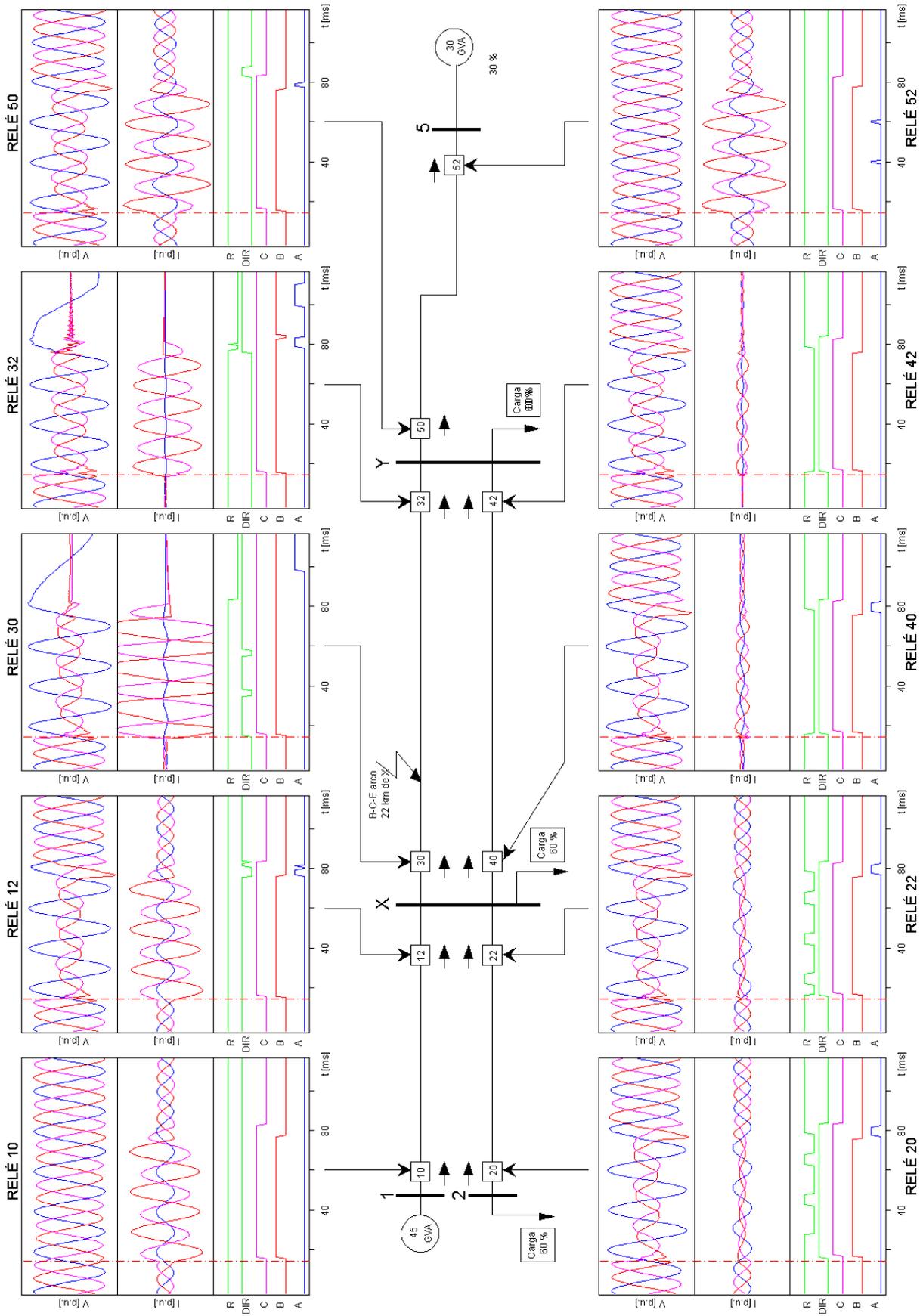


Fig. A.100 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases B, C y tierra con arco de 35 kV y a 22 km de la barra X.

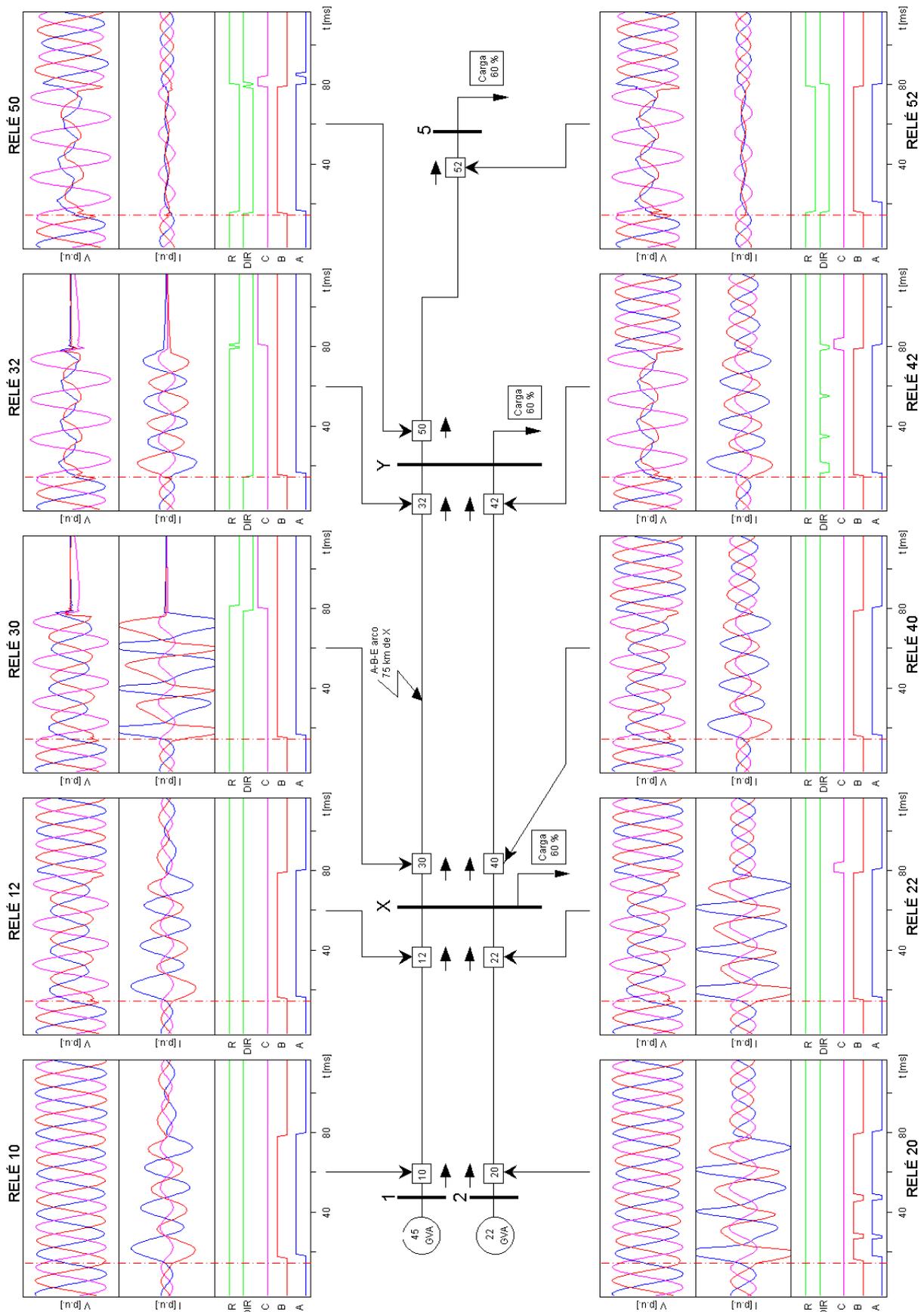


Fig. A.101 Respuesta del relé MWF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases B, C y tierra con arco de 35 kV y a 75 km de la barra X.

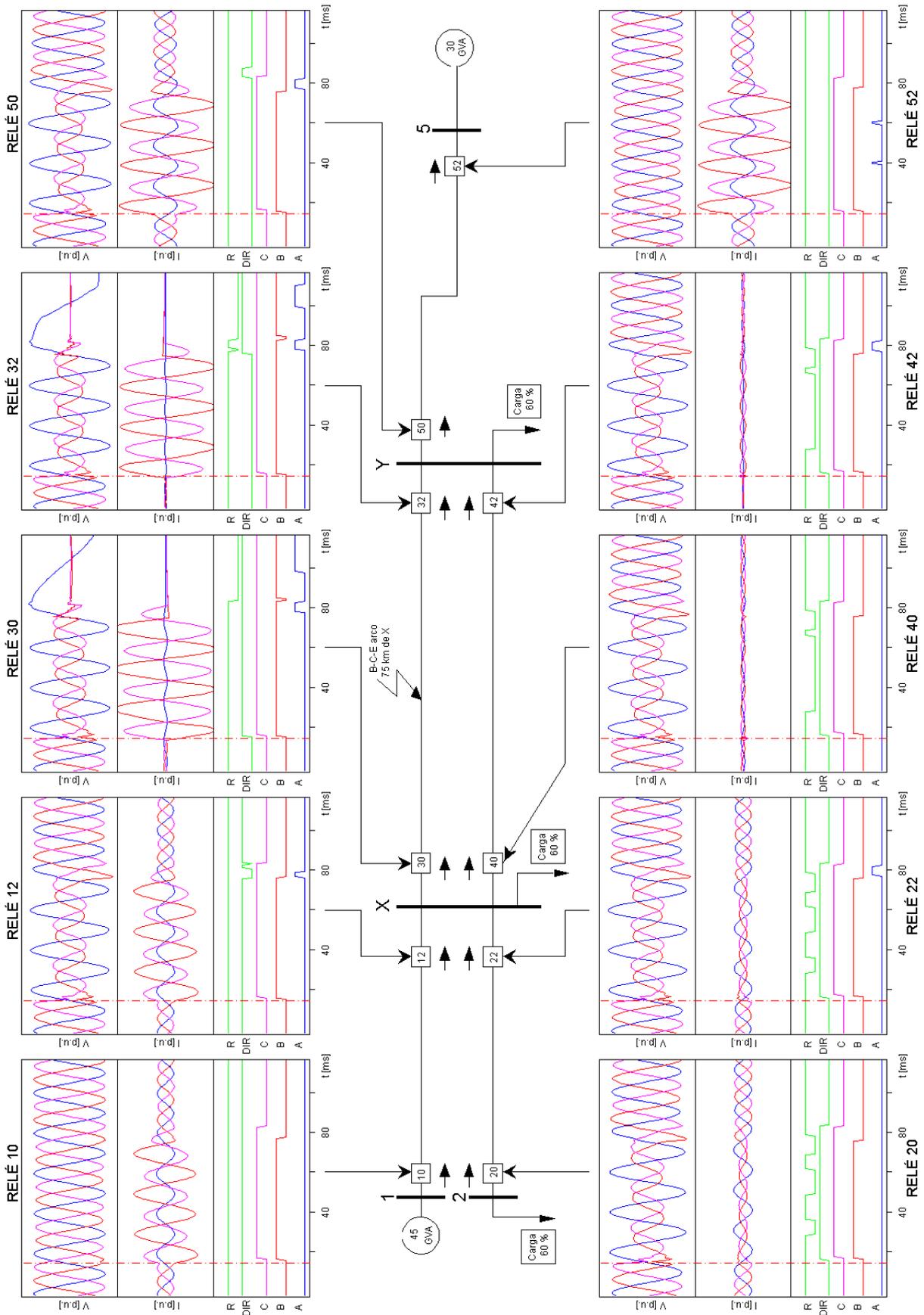


Fig. A.102 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases B, C y tierra con arco de 35 kV y a 75 km de la barra X.

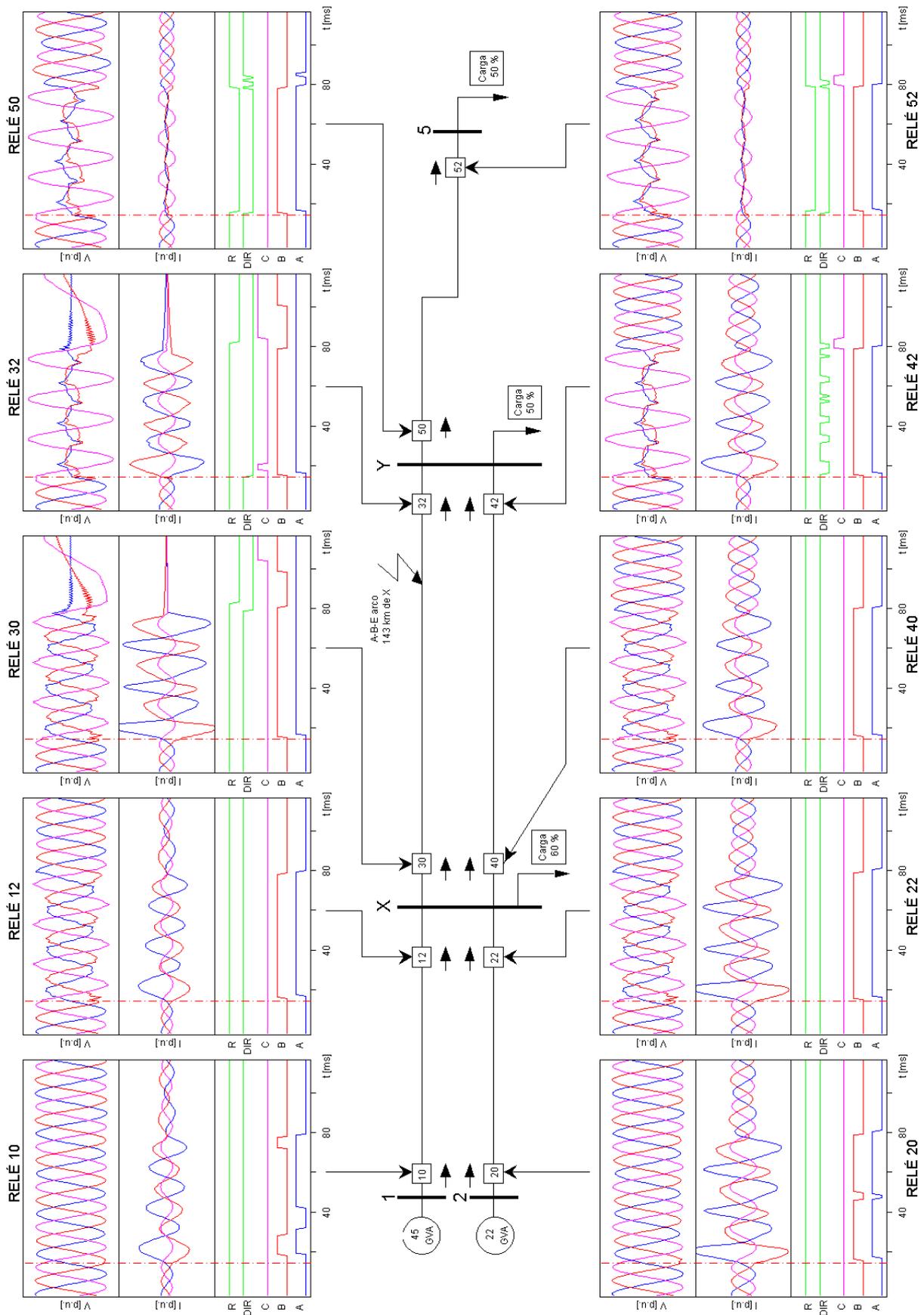


Fig. A.103 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A, B y tierra con arco de 35 kV y a 143 km de la barra X.

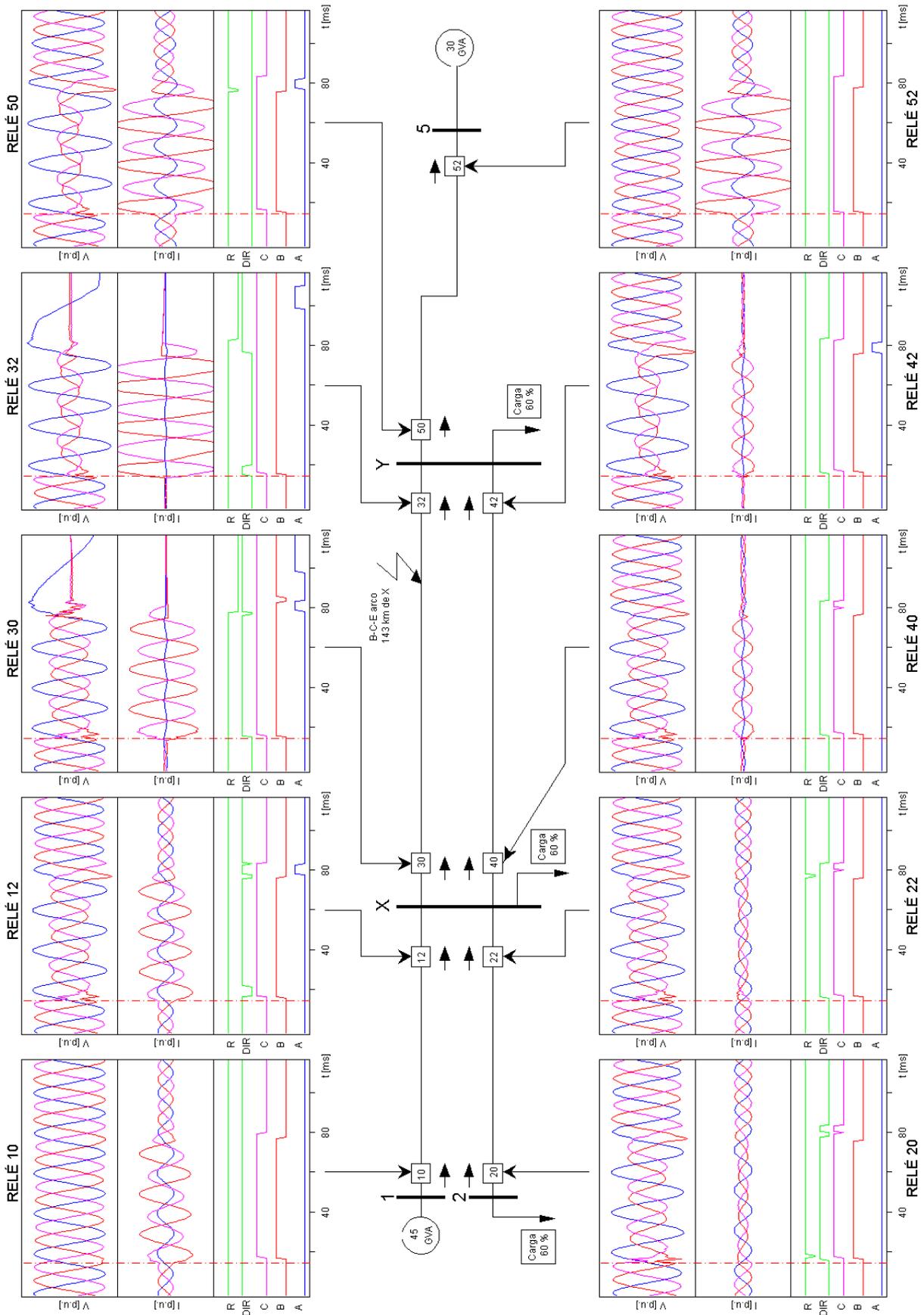


Fig. A.104 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases B, C y tierra con arco de 35 kV y a 143 km de la barra X.

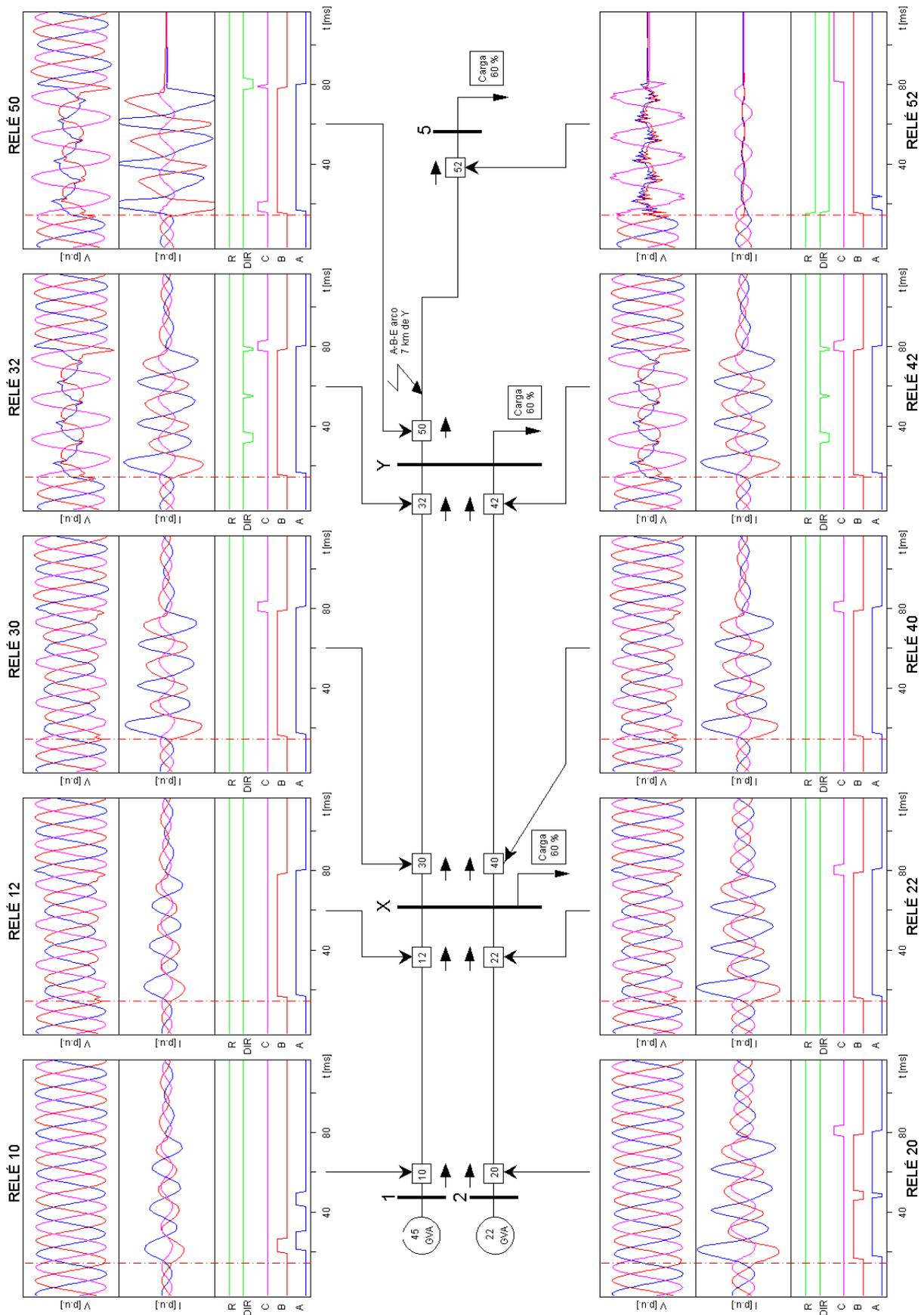


Fig. A.105 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases A, B y tierra con arco de 35 kV y a 7 km de la barra Y.

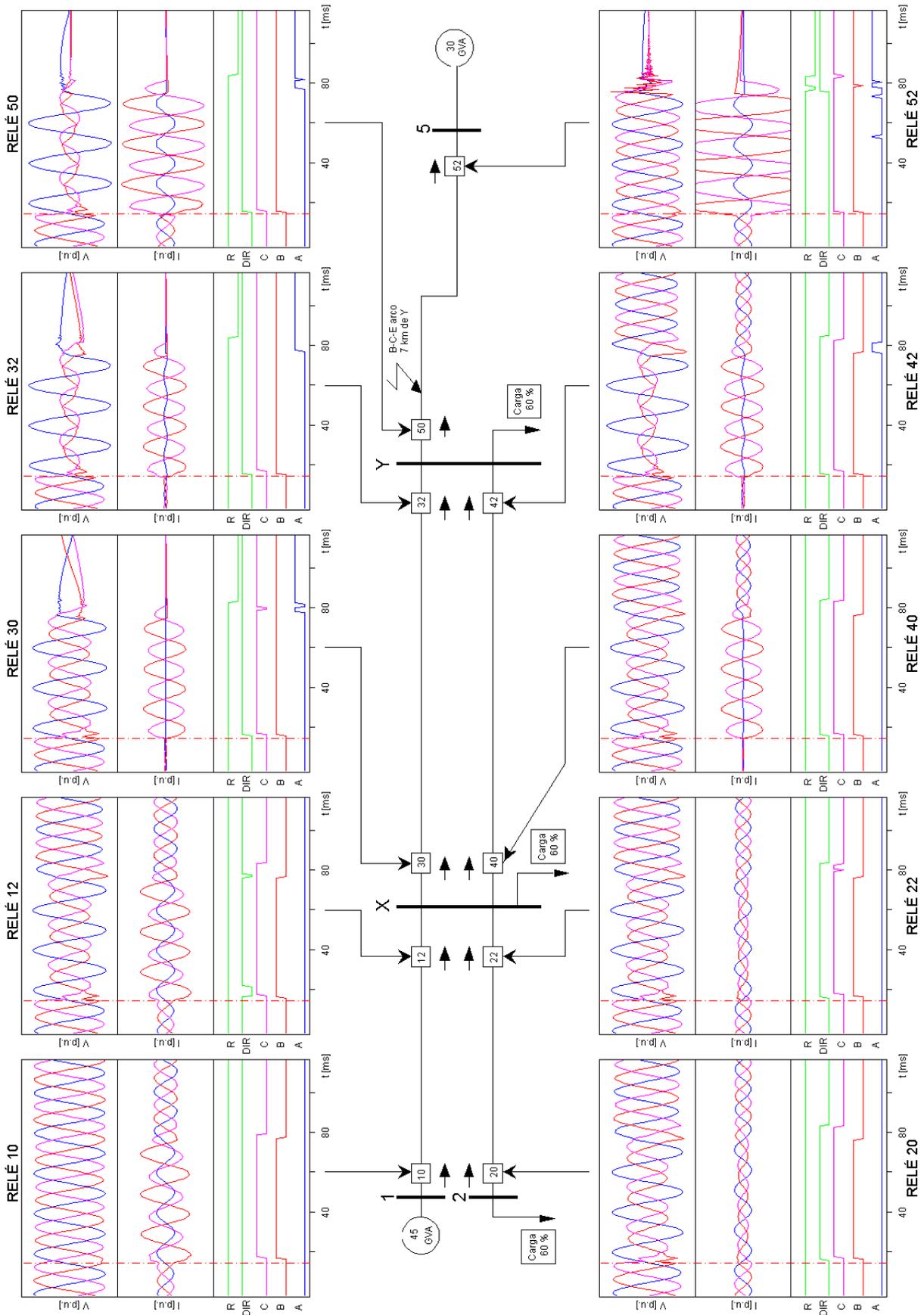


Fig. A.106 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo entre las fases B, C y tierra con arco de 35 kV y a 7 km de la barra Y.

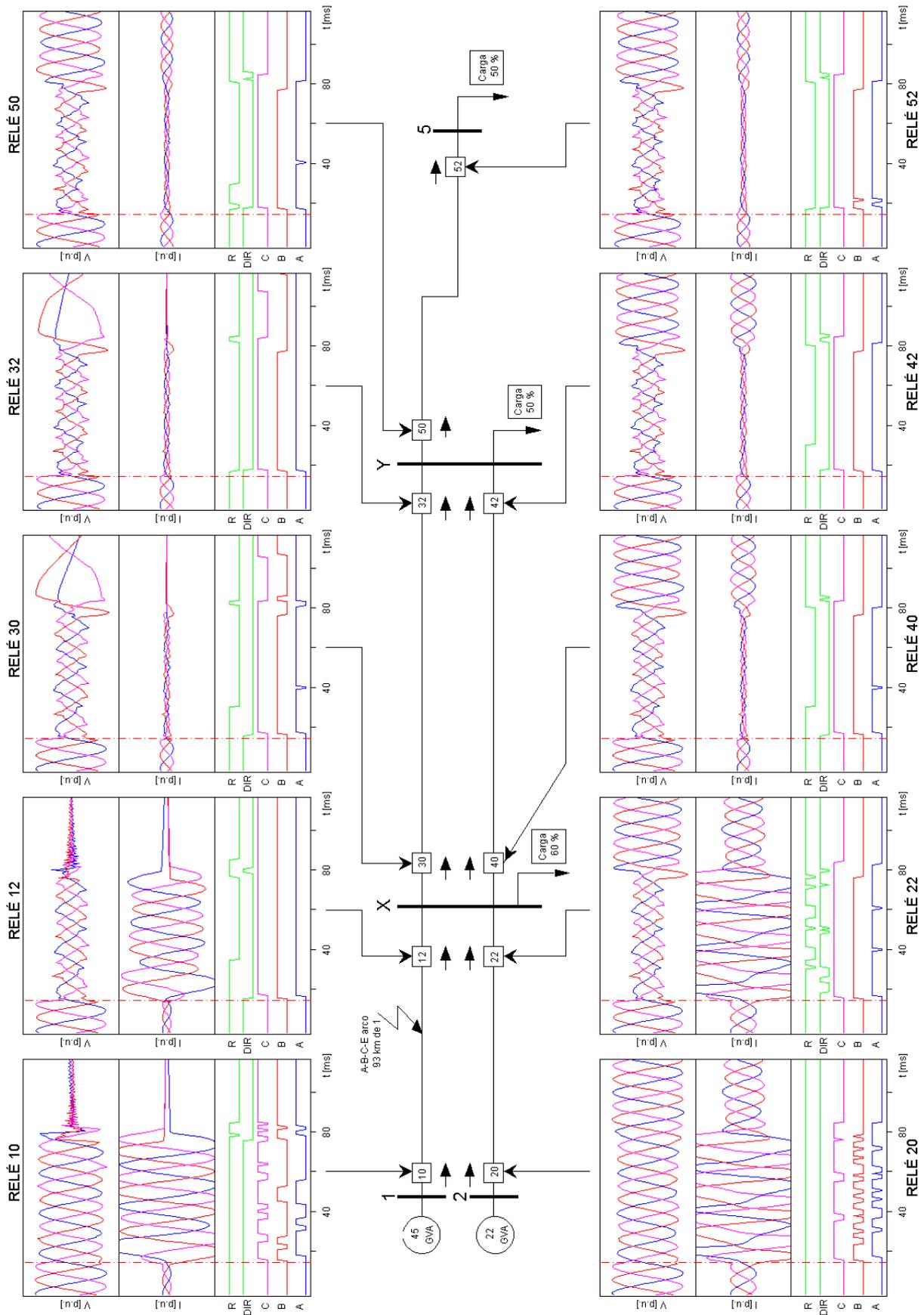


Fig. A.107 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra, con arco de 35 kV y a 93 km de la barra 1.

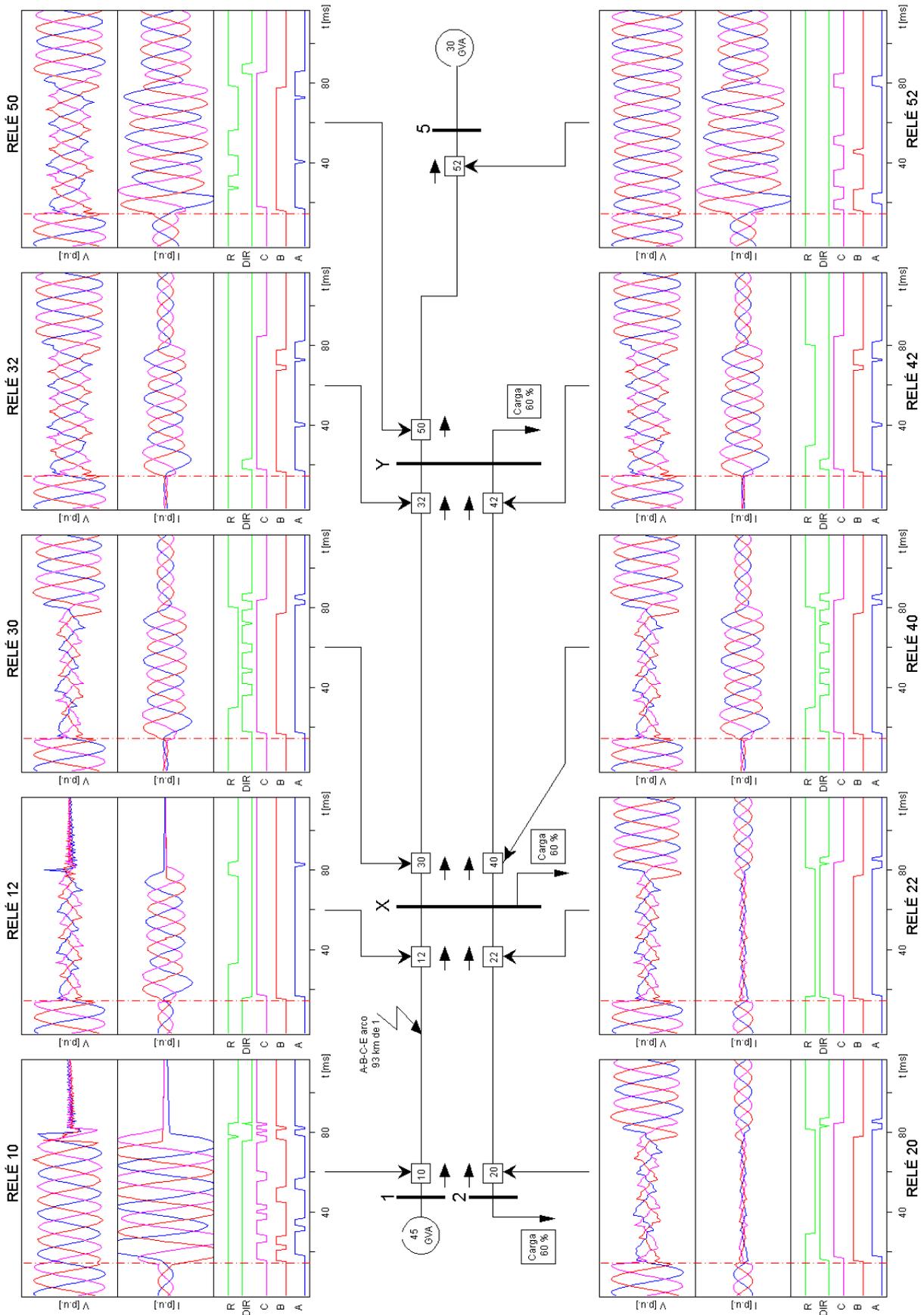


Fig. A.108 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra, con arco de 35 kV y a 93 km de la barra 1.

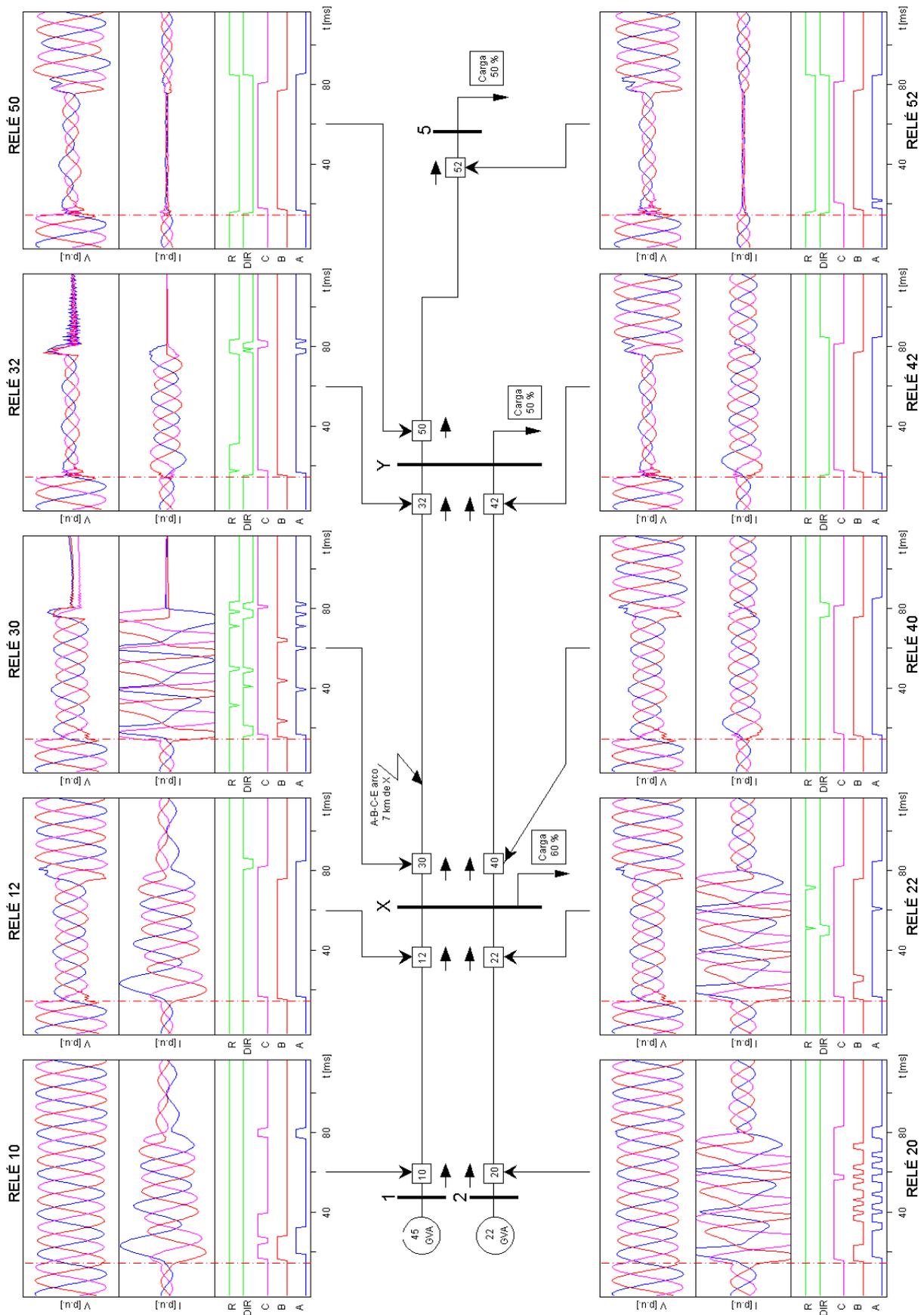


Fig. A.109 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra, con arco de 35 kV y a 7 km de la barra X.

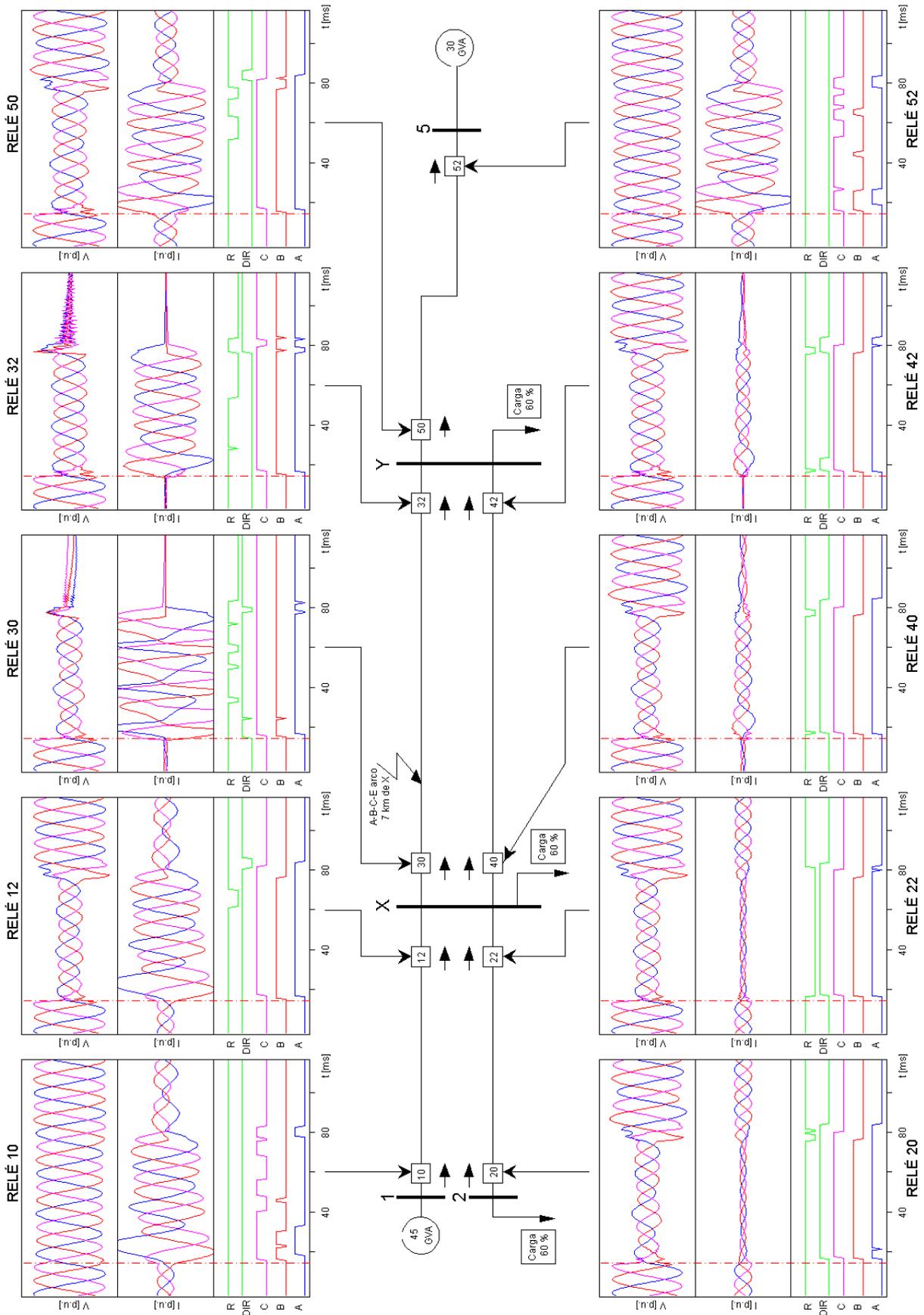


Fig. A.110 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra, con arco de 35 kV y a 7 km de la barra X.

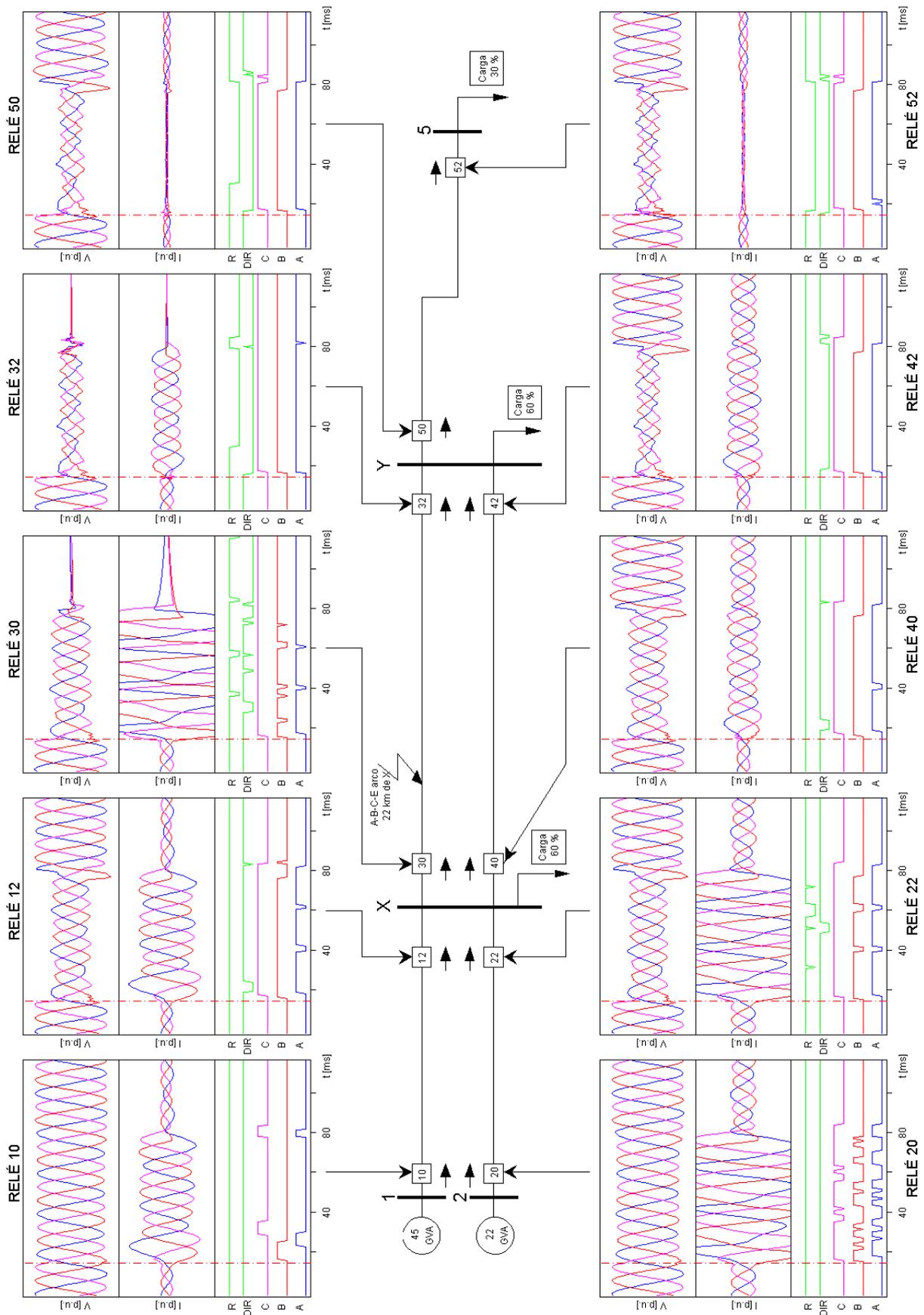


Fig. A.111 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra, con arco de 35 kV y a 22 km de la barra X.

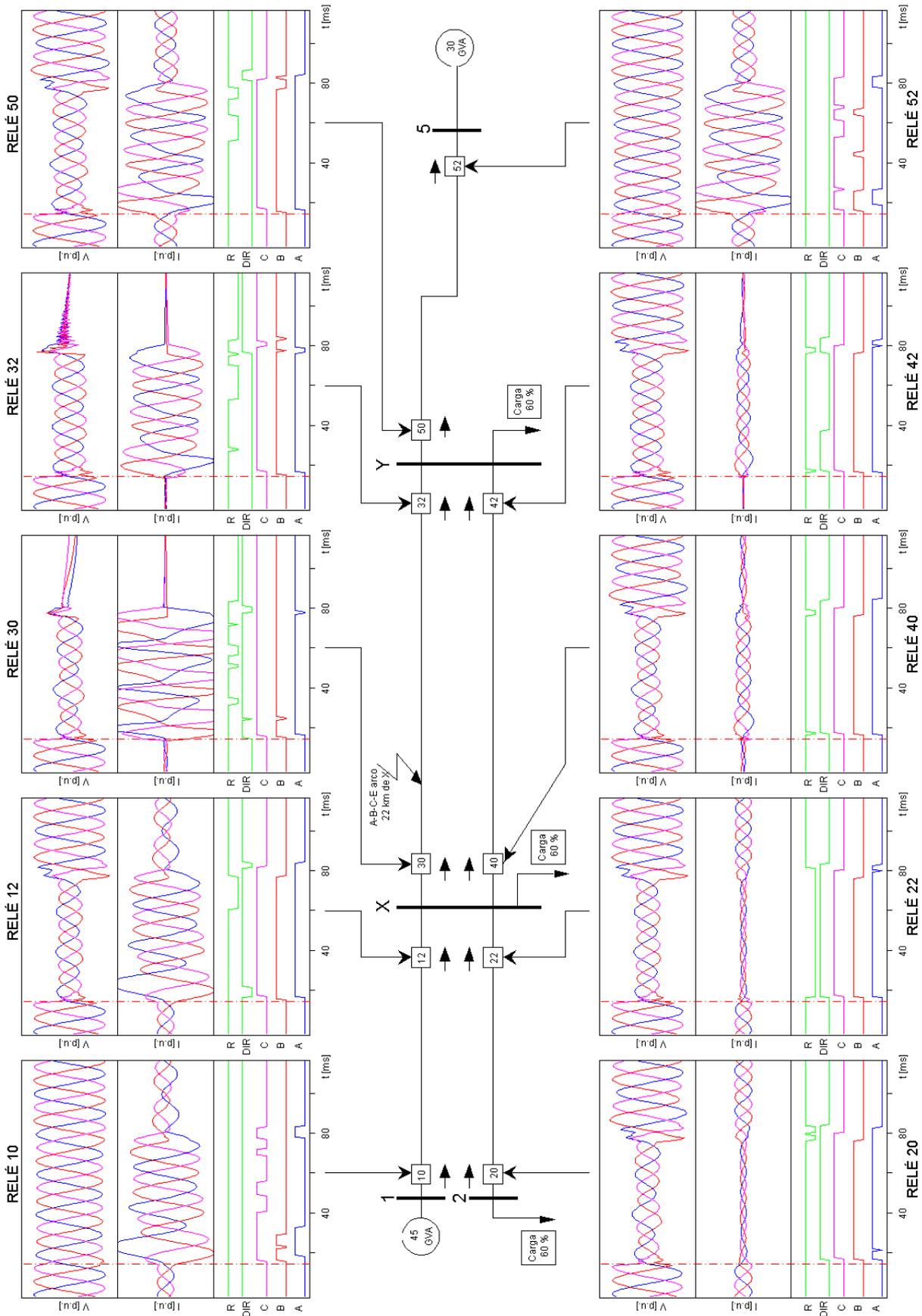


Fig. A.112 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra, con arco de 35 kV y a 22 km de la barra X.

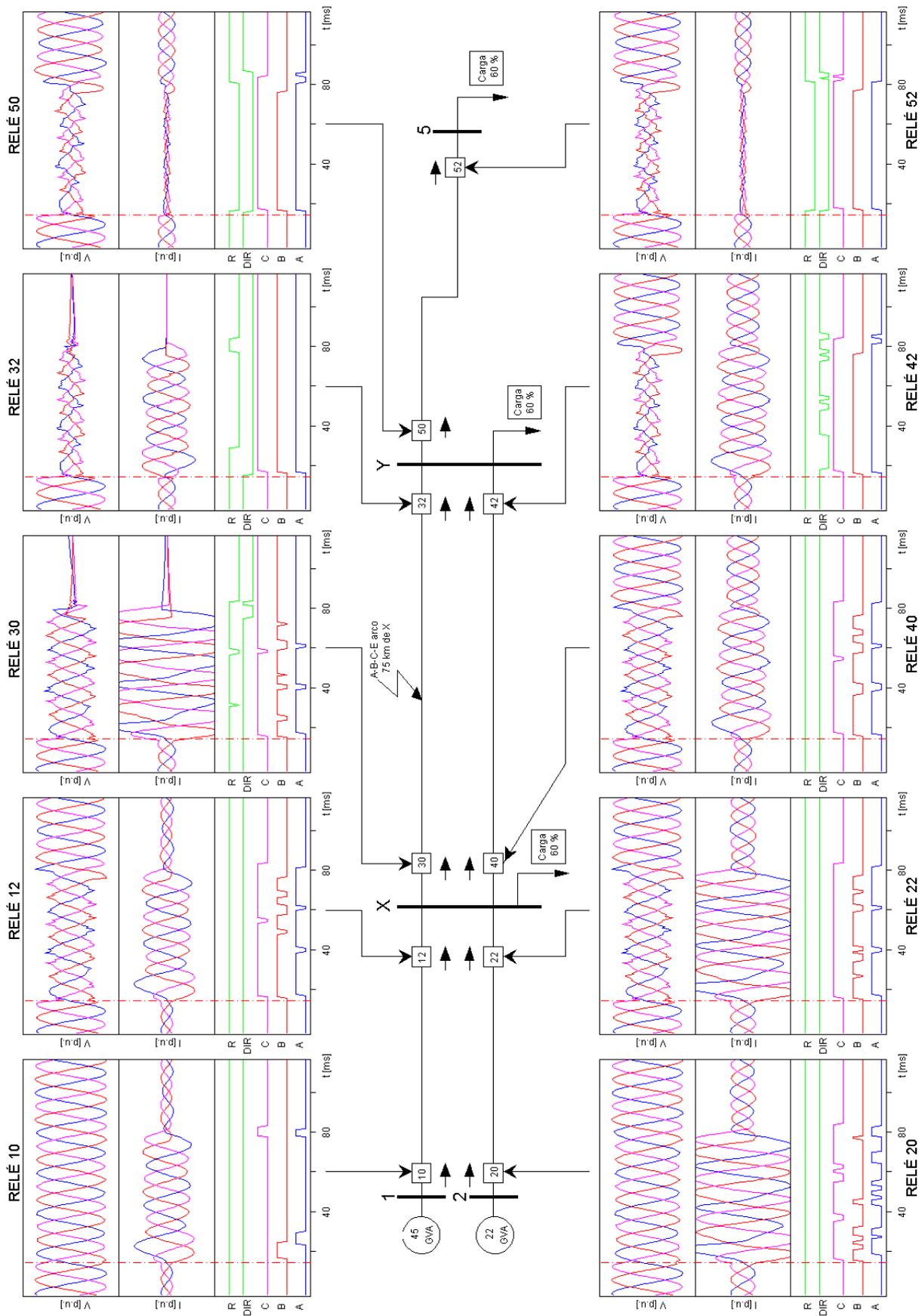


Fig. A.113 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra, con arco de 35 kV y a 75 km de la barra X.

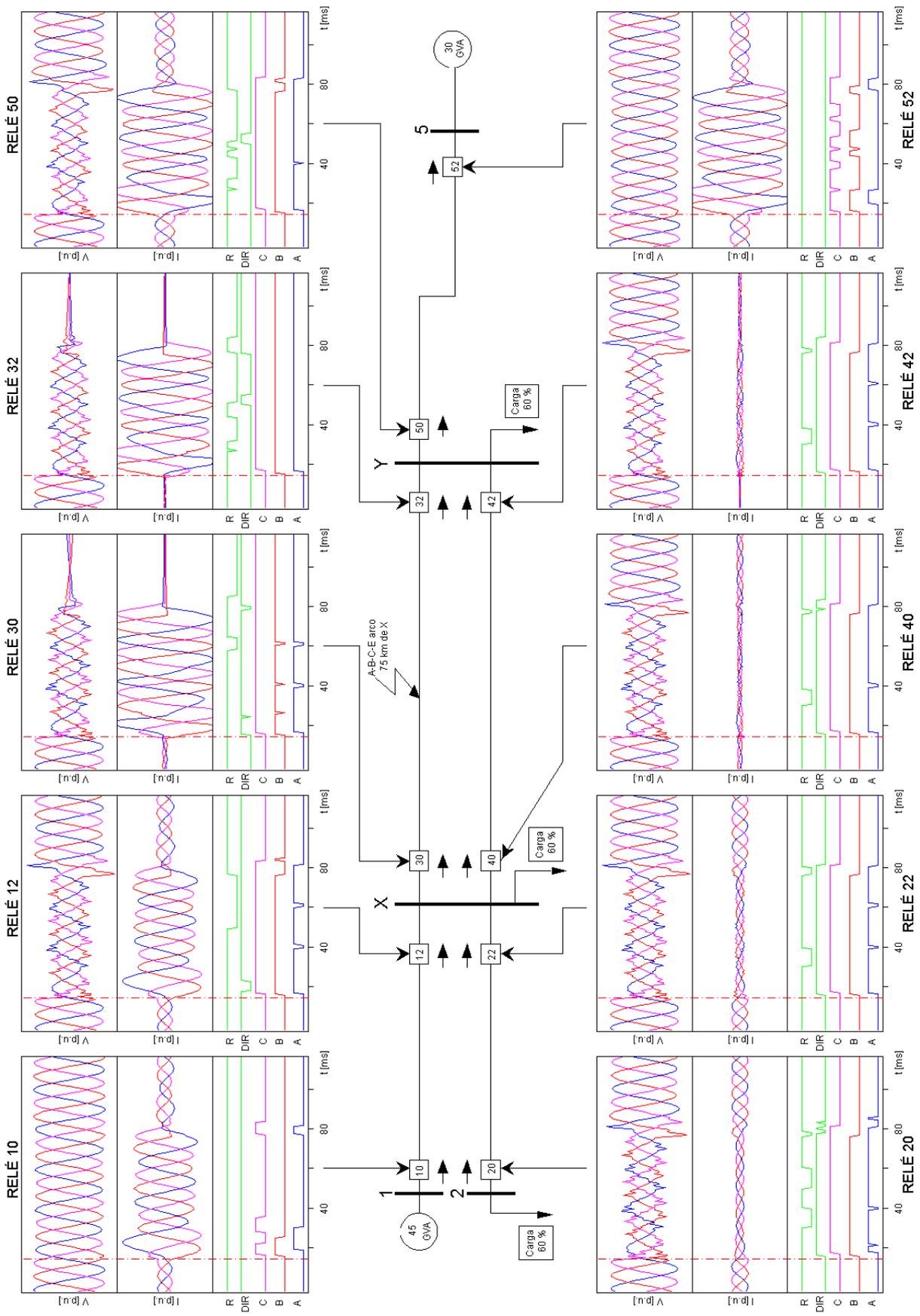


Fig. A.114 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra, con arco de 35 kV y a 75 km de la barra X.

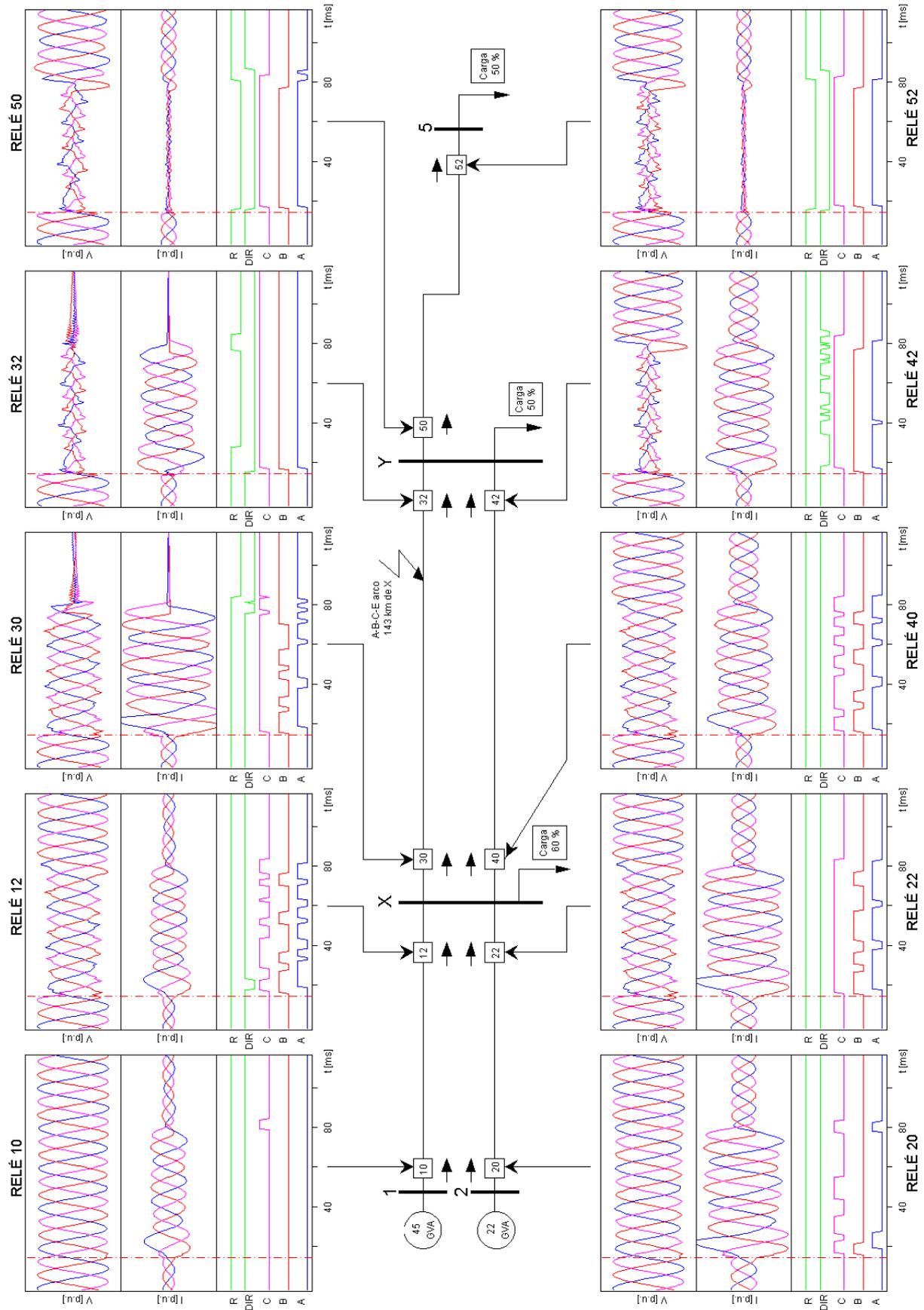


Fig. A.115 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra, con arco de 35 kV y a 143 km de la barra X.

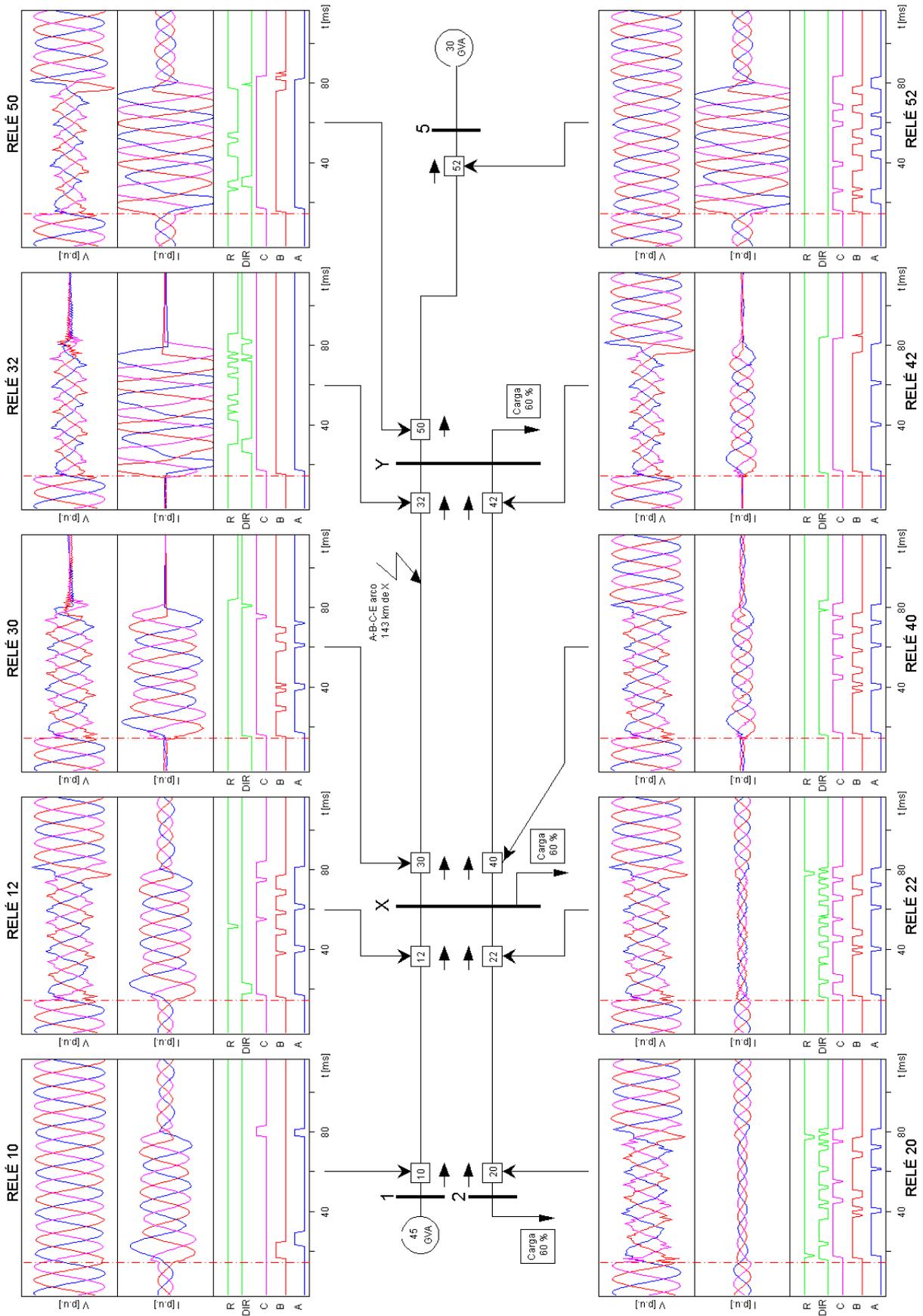


Fig. A.116 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra, con arco de 35 kV y a 143 km de la barra X.

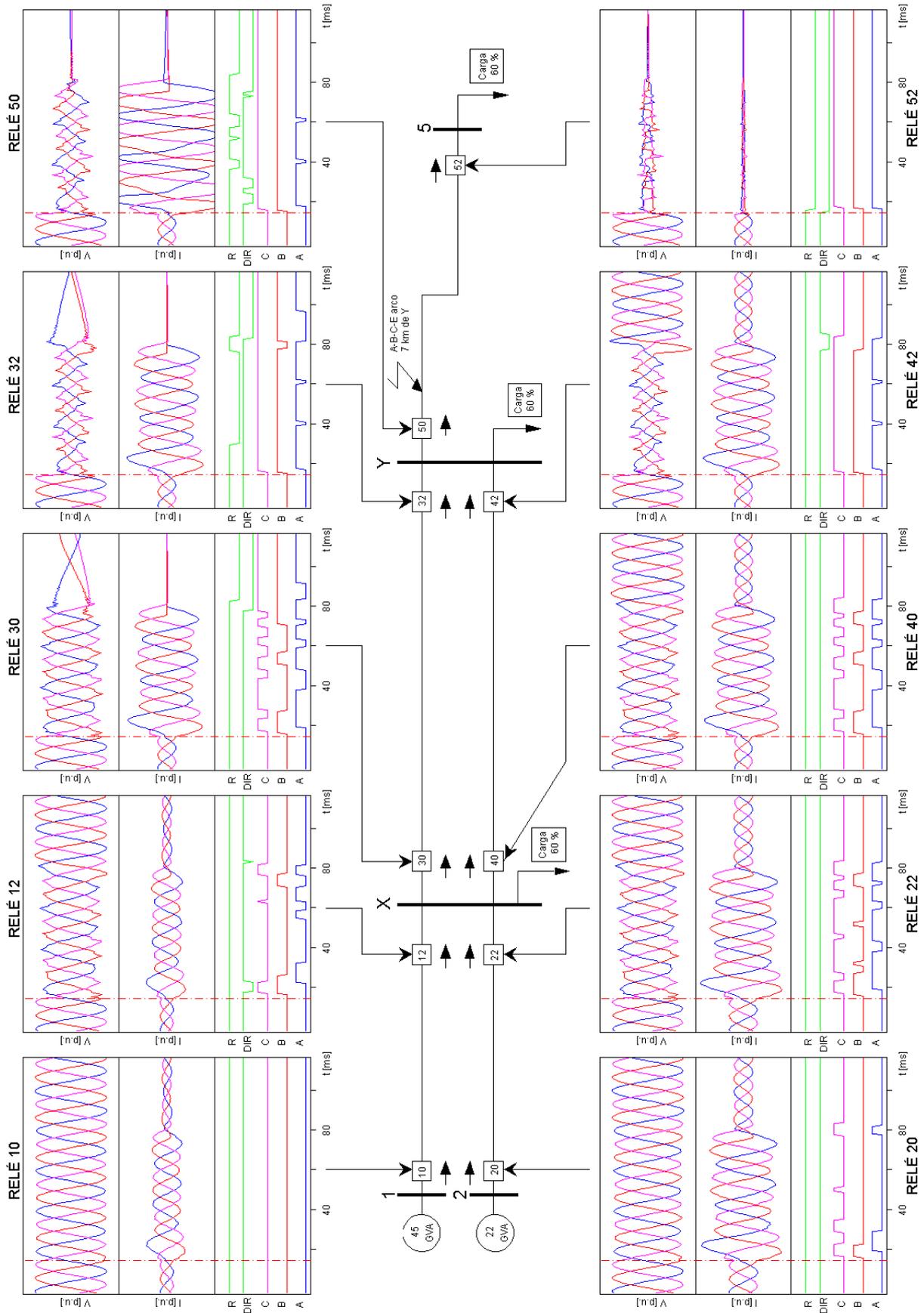


Fig. A.117 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra, con arco de 35 kV y a 7 km de la barra Y.

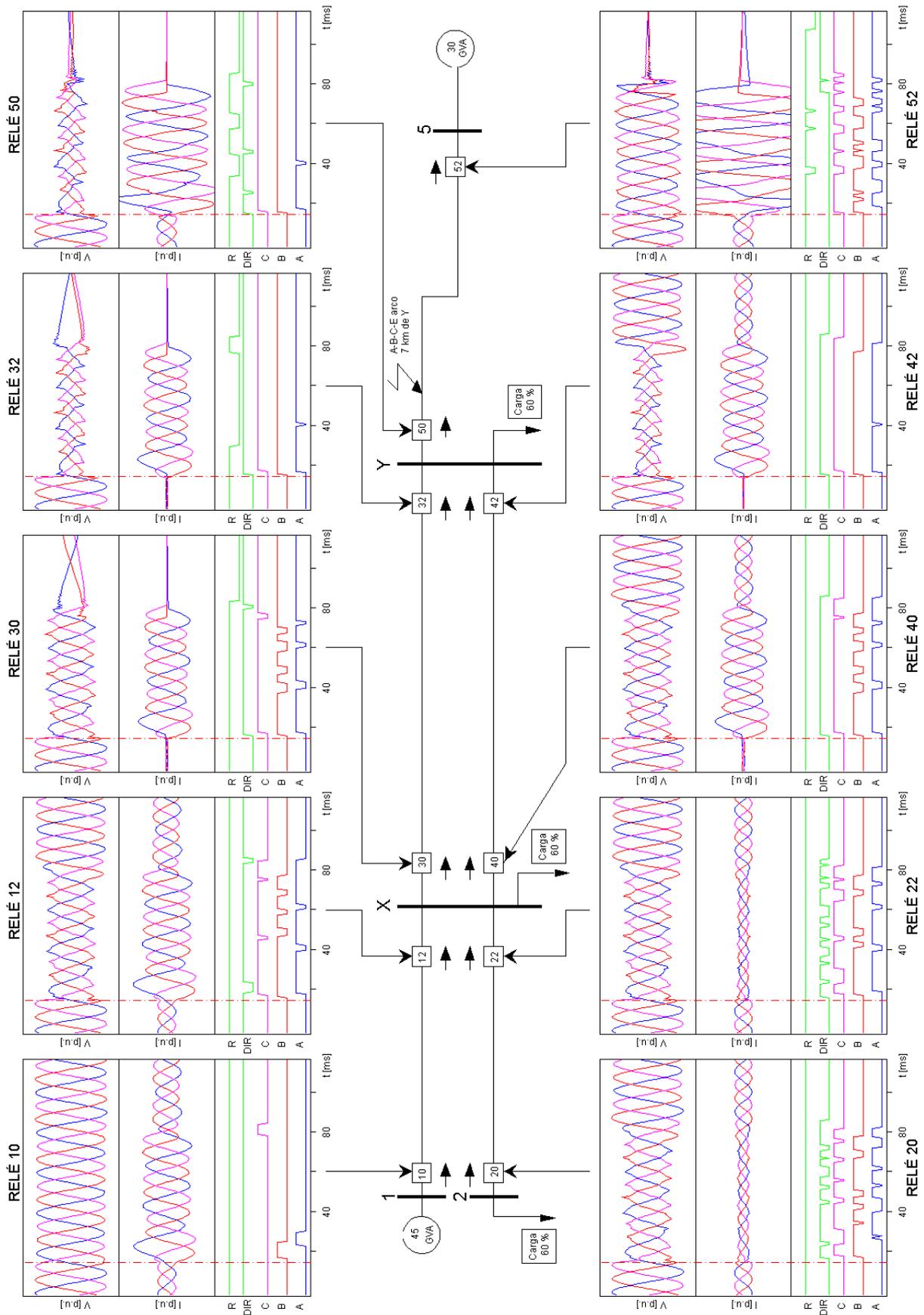


Fig. A.118 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para un fallo trifásico a tierra, con arco de 35 kV y a 7 km de la barra Y.

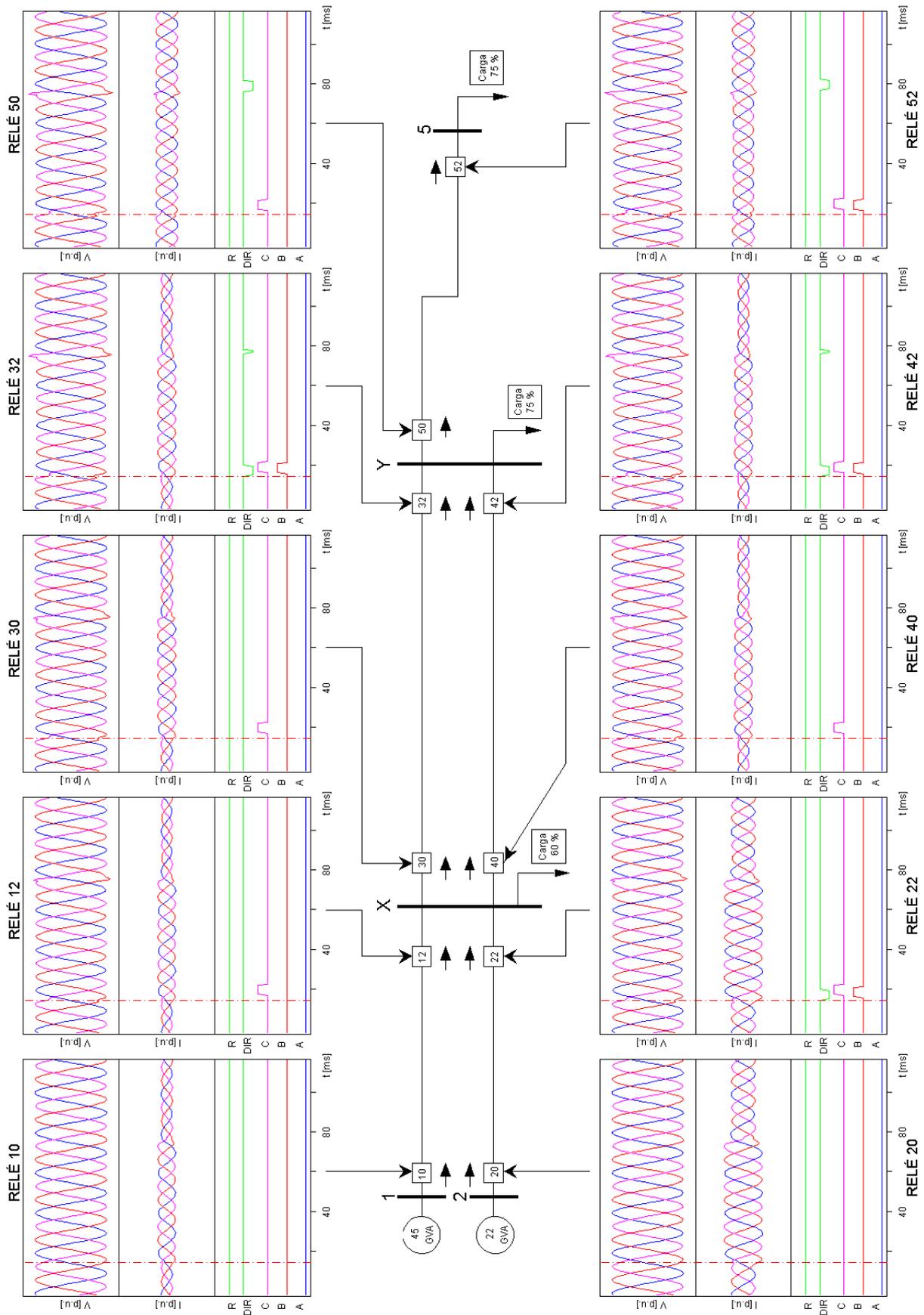


Fig. A.119 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para una conexión de 346 MVA en las barras X e Y.

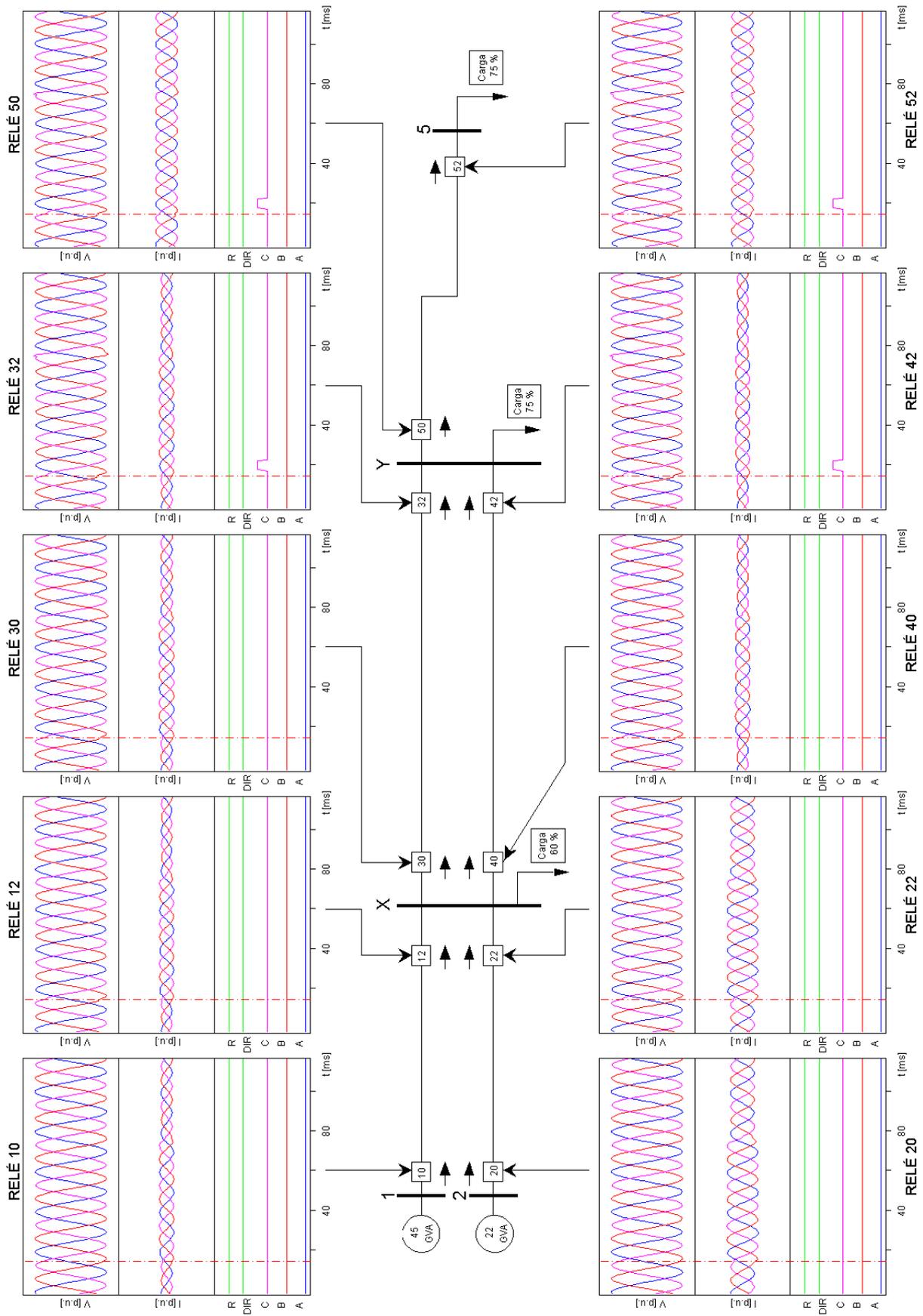


Fig. A.120 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para una conexión de 173 MVA en las barras X e Y.

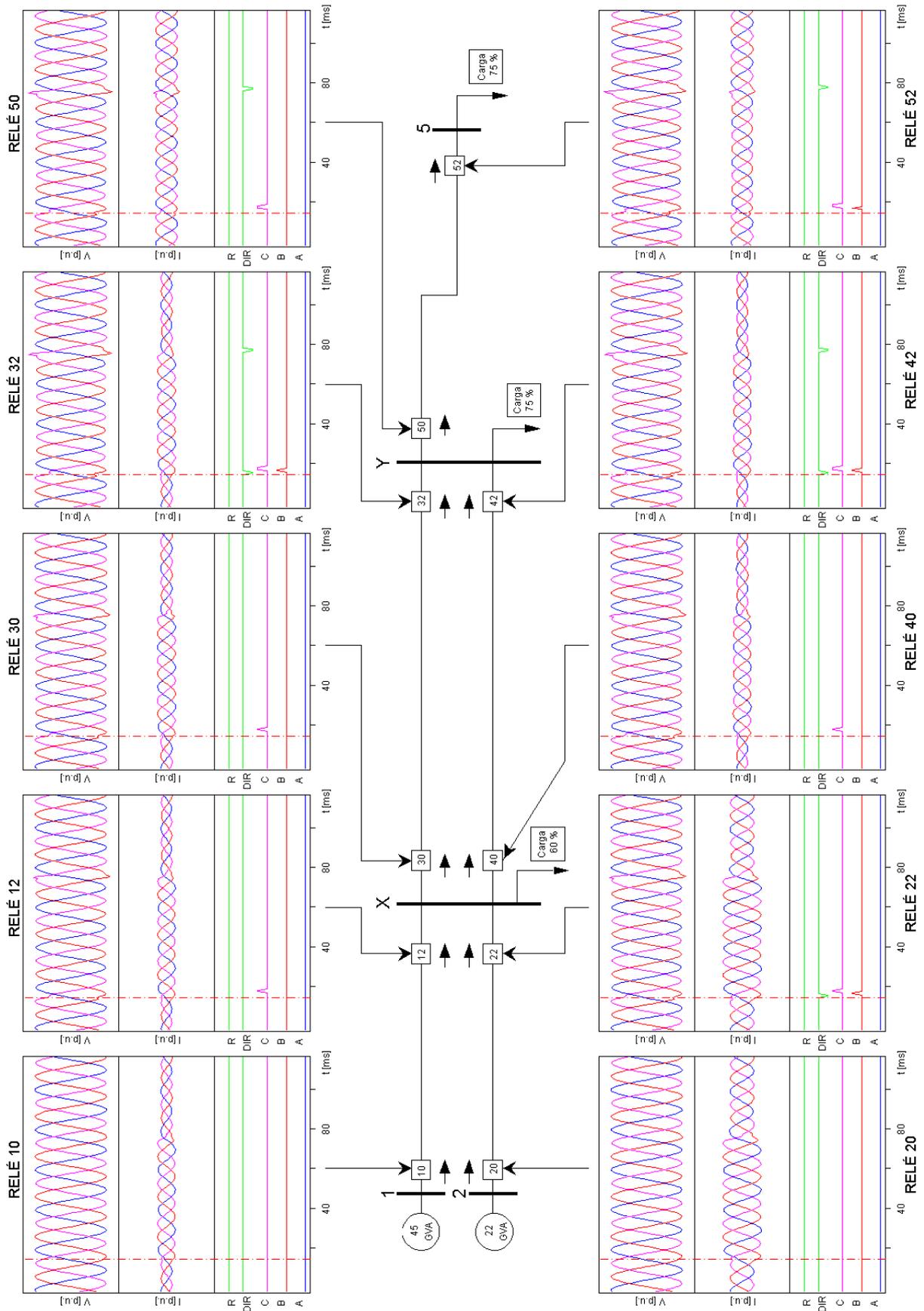


Fig. A.121 Respuesta del relé MLF situado en diez posiciones diferentes de la red para una conexión de 346 MVA en las barras X e Y.

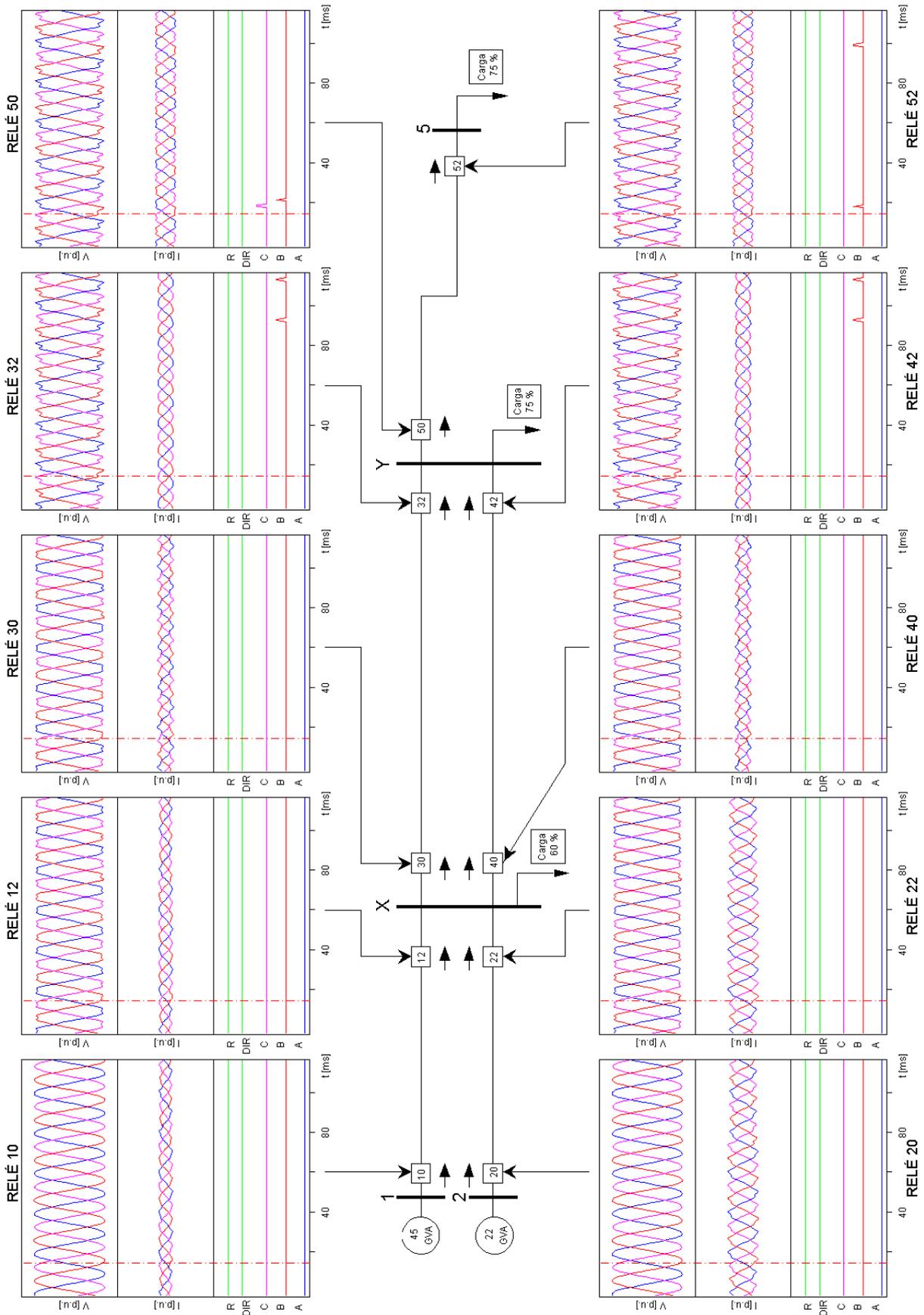


Fig. A.122 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para una carga distorsionadora en la barra Y.

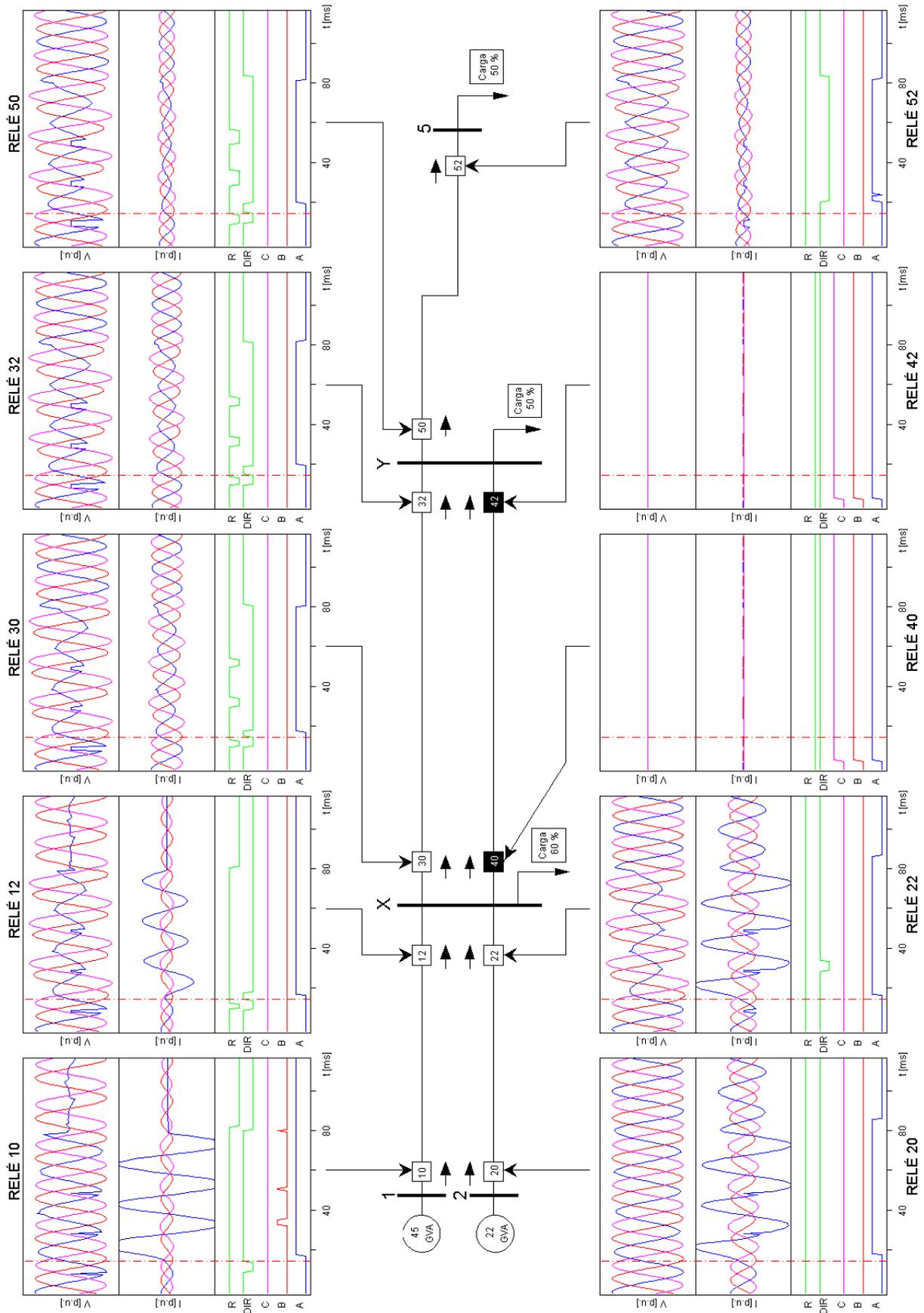


Fig. A.123 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para casos con pérdida de datos.

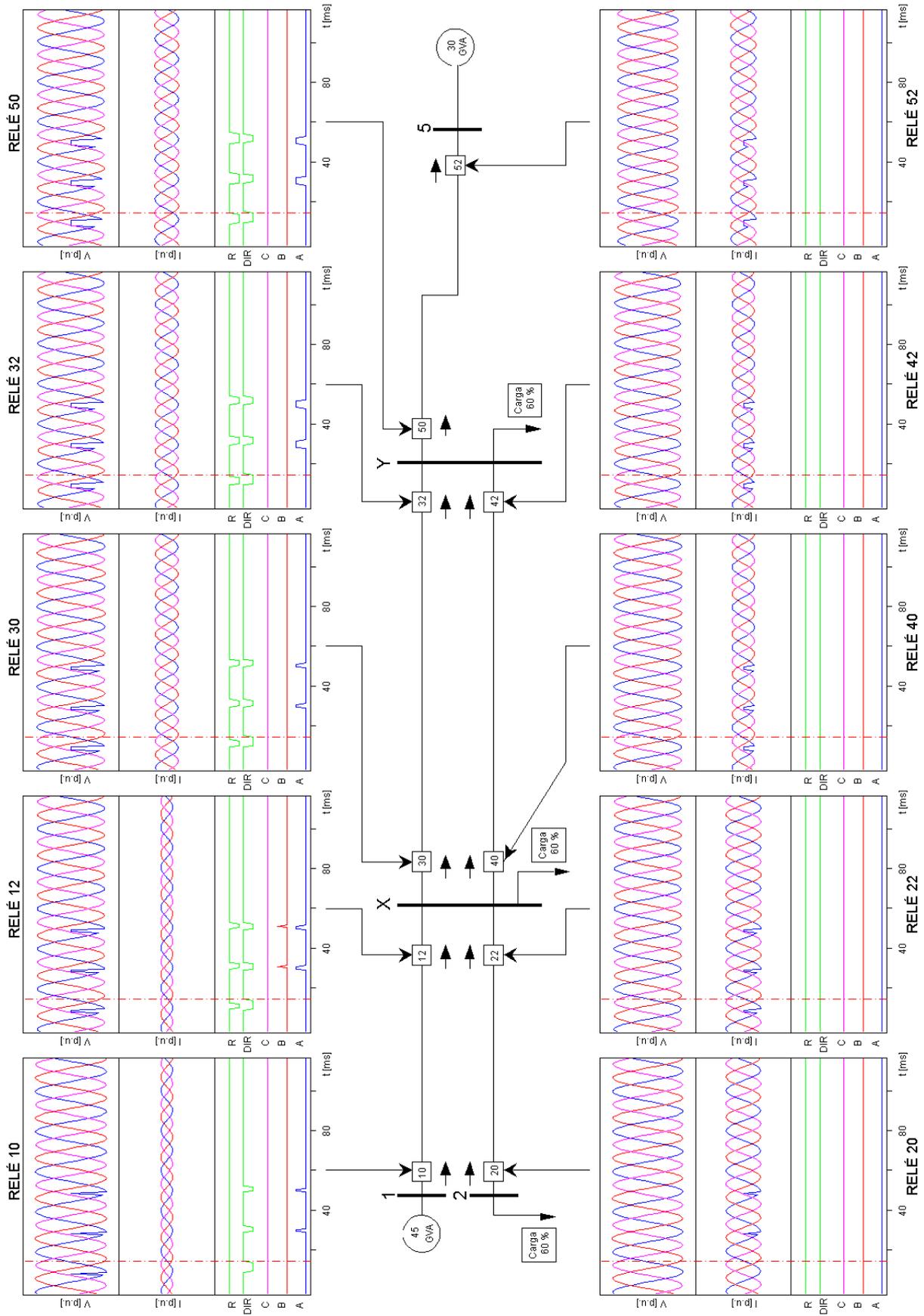


Fig. A.124 Respuesta del relé MLF-DWT situado en diez posiciones diferentes de la red para casos con pérdida de datos.

Anexo B

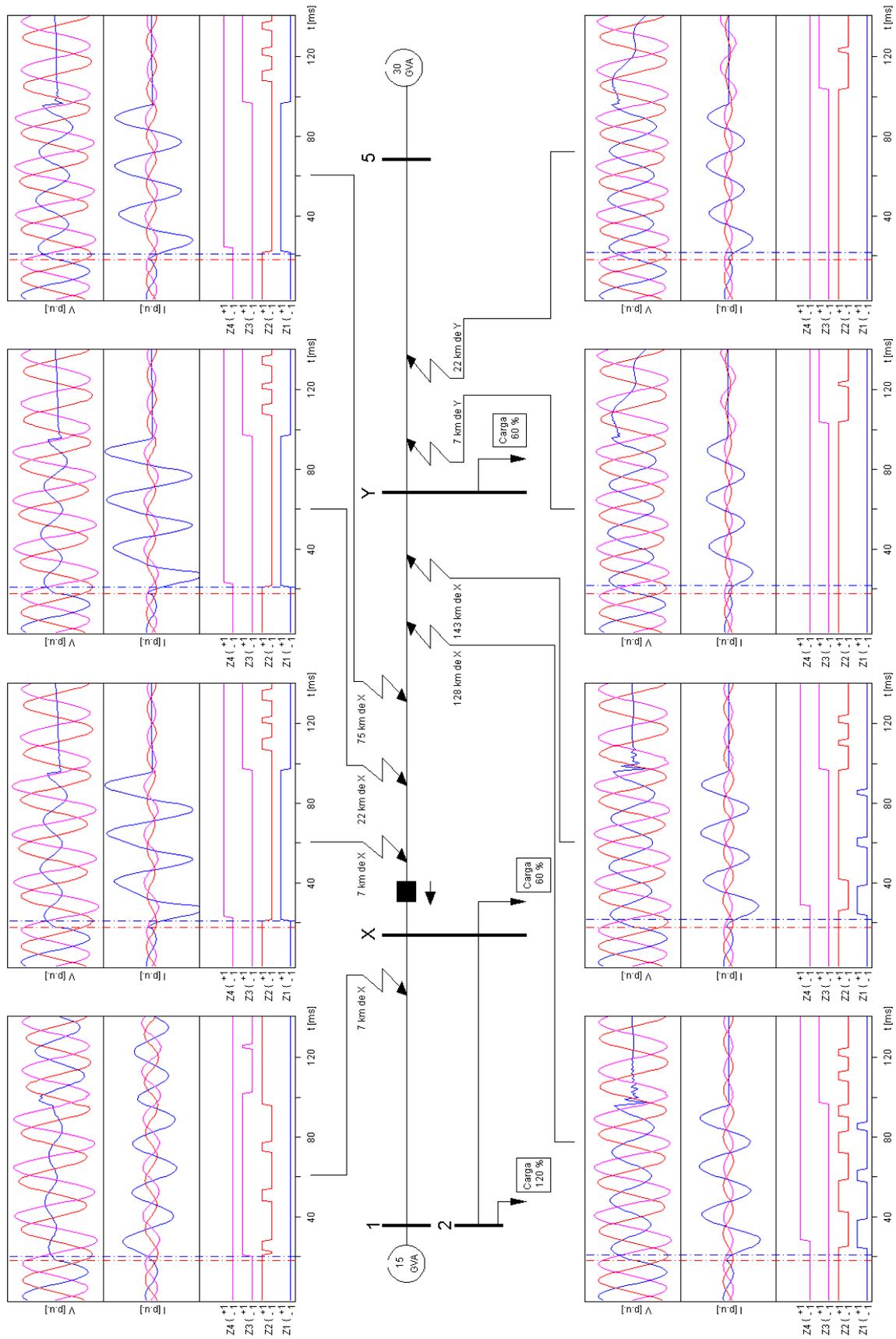


Fig. B.1 *Respuesta del relé MLF-ZON situado en ocho posiciones diferentes para un fallo de la fase A y tierra.*

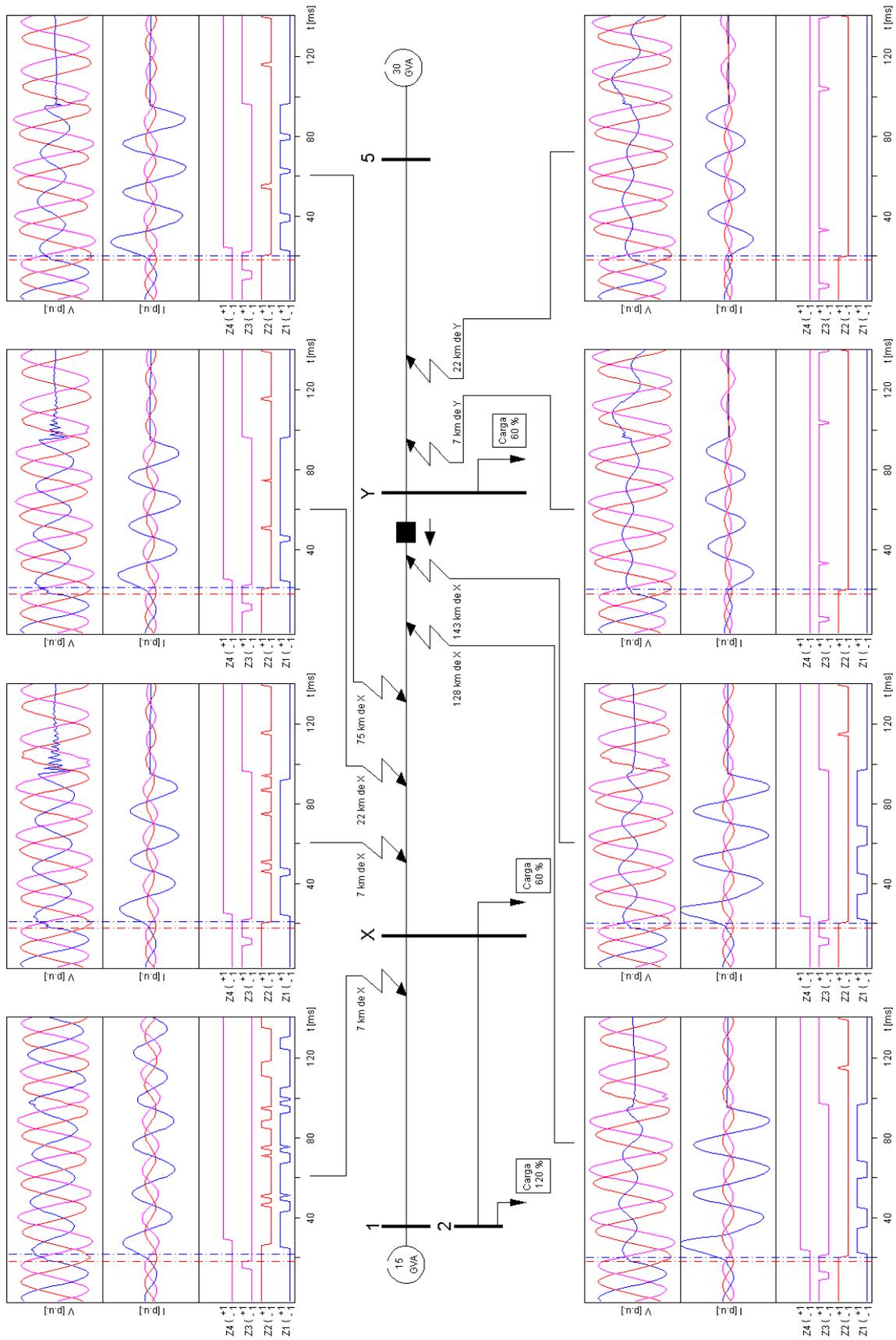


Fig. B.2 Respuesta del relé MFLF-ZON situado en ocho posiciones diferentes para un fallo de la fase A y tierra.

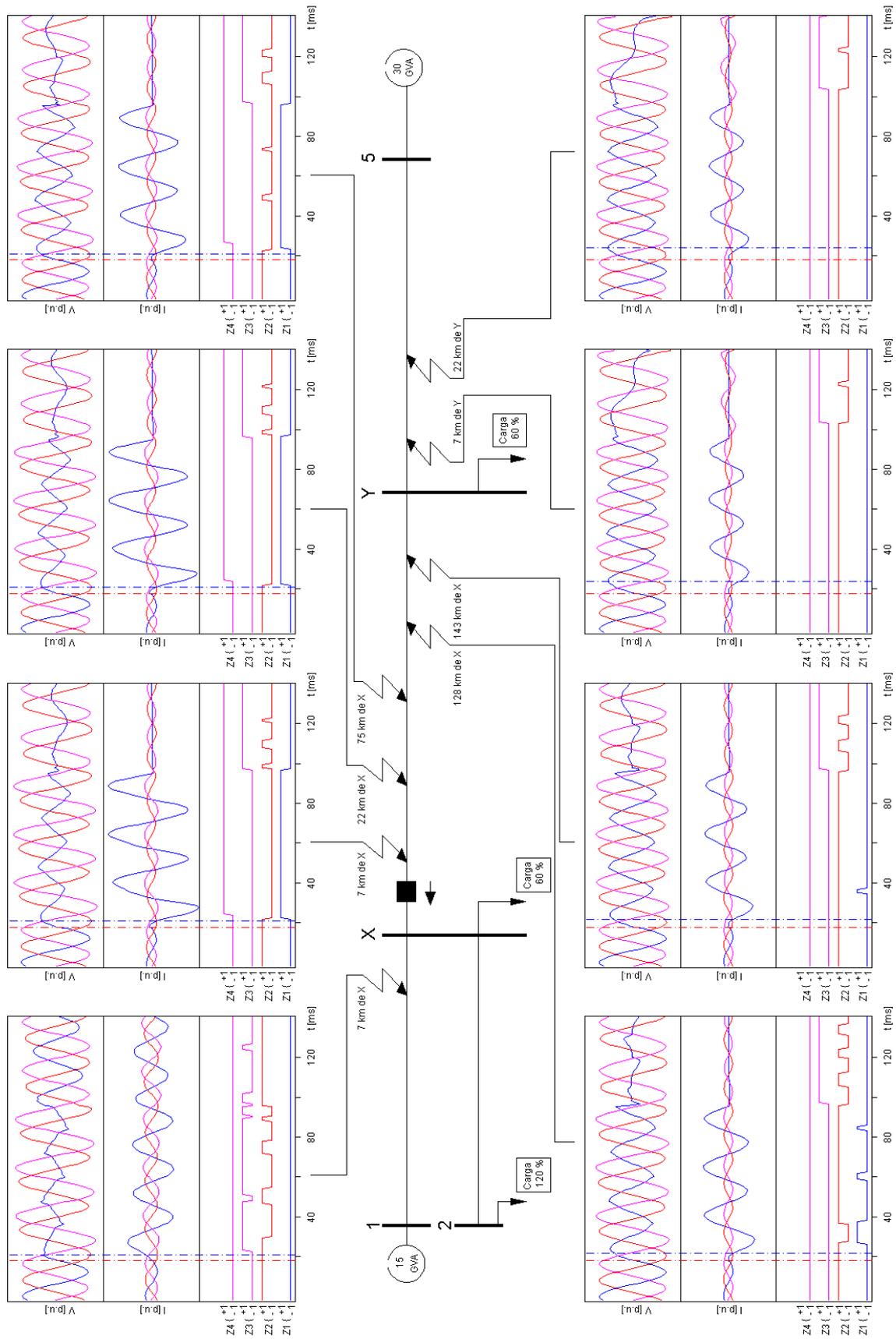


Fig. B.3 *Respuesta del relé MLF-ZON situado en ocho posiciones diferentes para un fallo de la fase A y tierra con arco de 35 kV.*

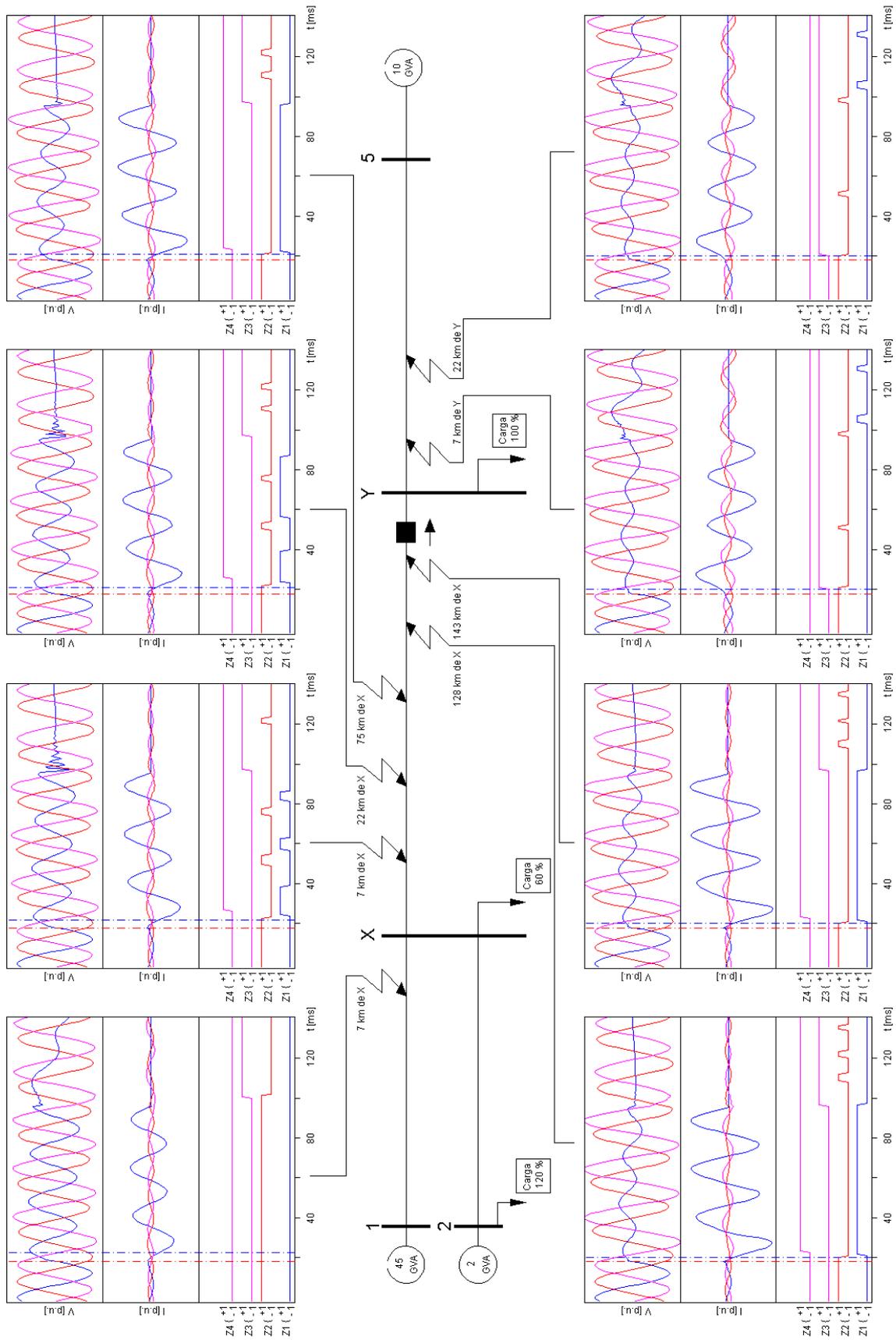


Fig. B.4 Respuesta del relé MFLF-ZON situado en ocho posiciones diferentes para un fallo de la fase A y tierra.

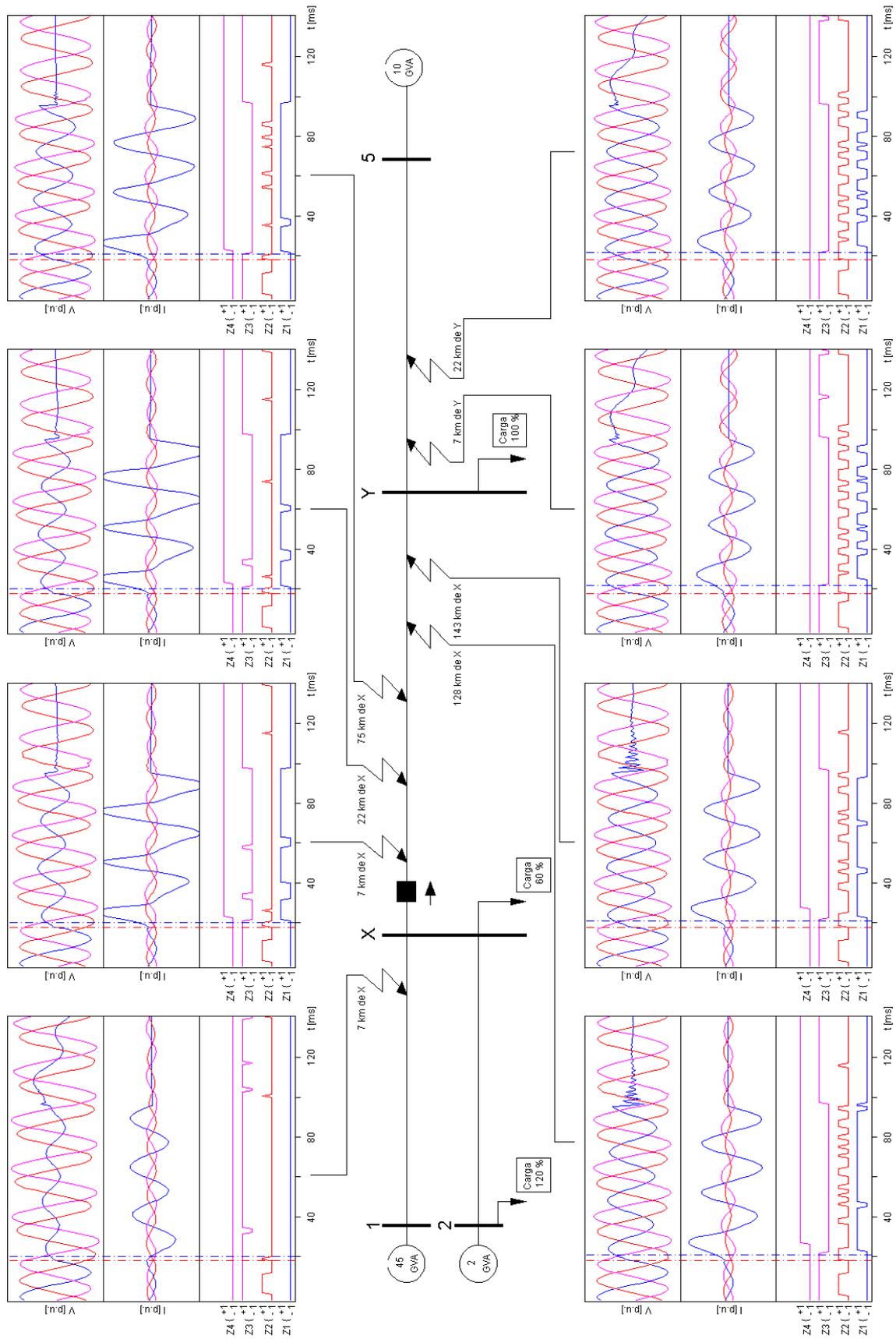


Fig. B.5 *Respuesta del relé MLF-ZON situado en ocho posiciones diferentes para un fallo de la fase A y tierra.*

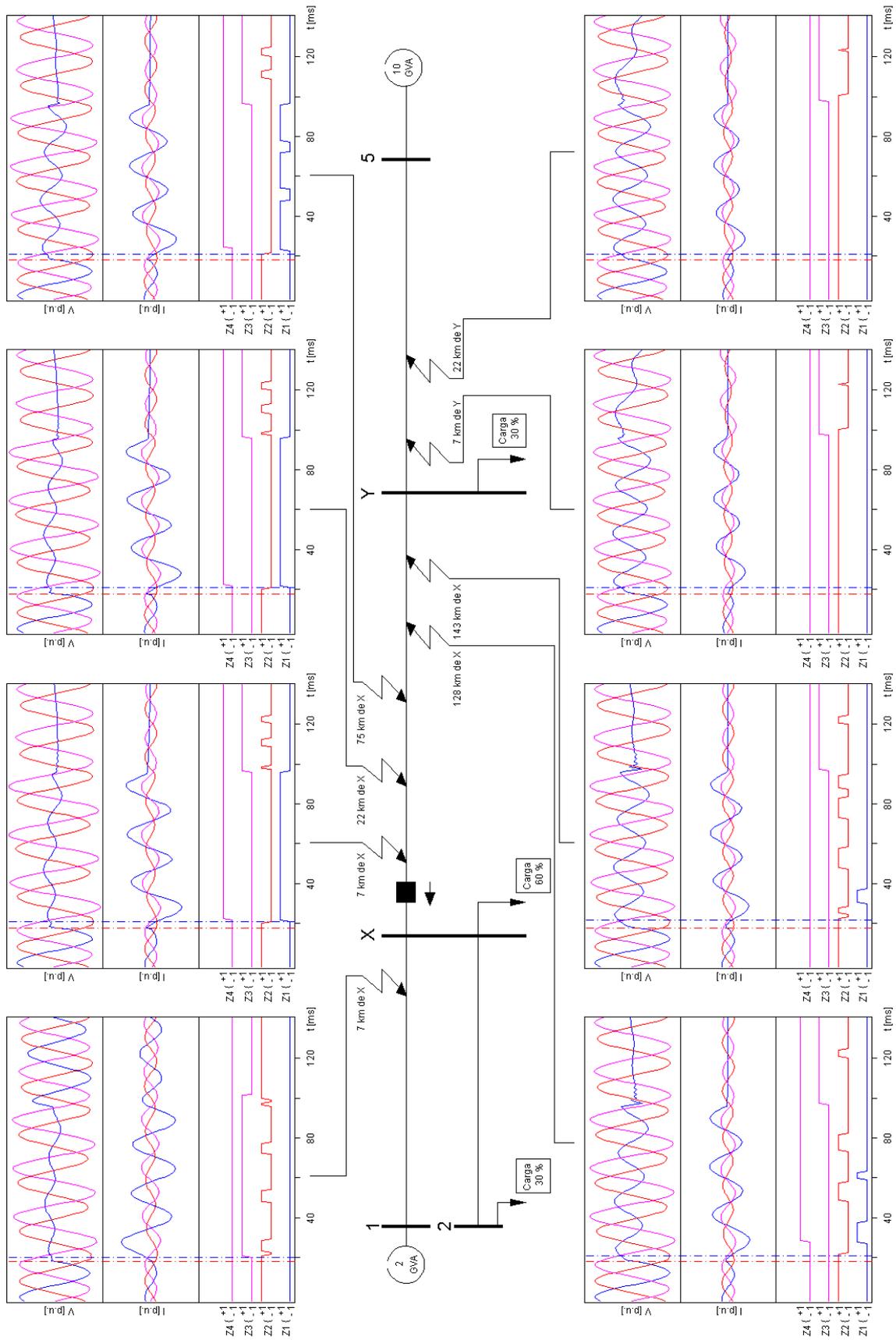


Fig. B.6 Respuesta del relé MLF-ZON situado en ocho posiciones diferentes para un fallo de la fase A y tierra.

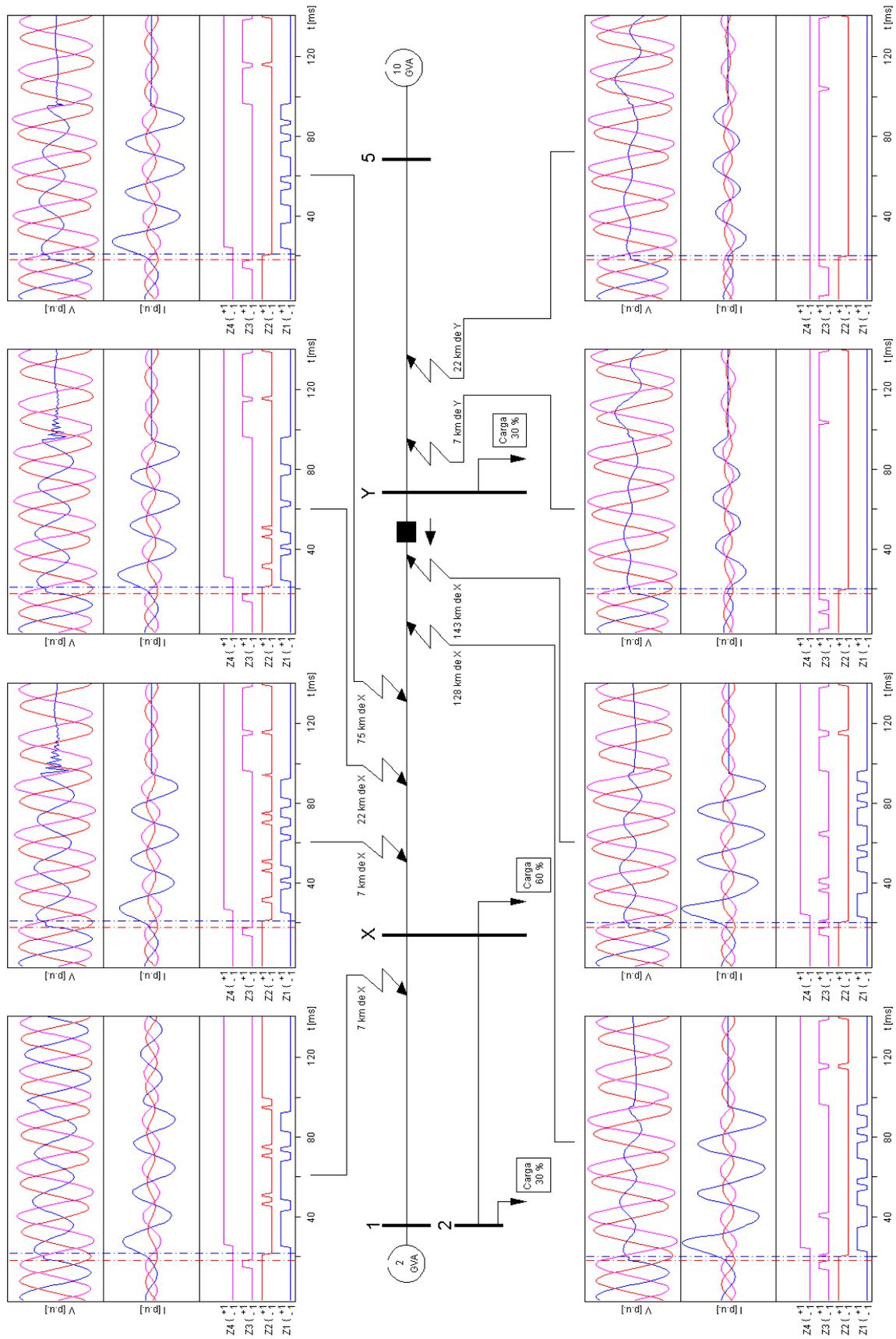


Fig. B.7 Respuesta del relé MLF-ZON situado en ocho posiciones diferentes para un fallo de la fase A y tierra..

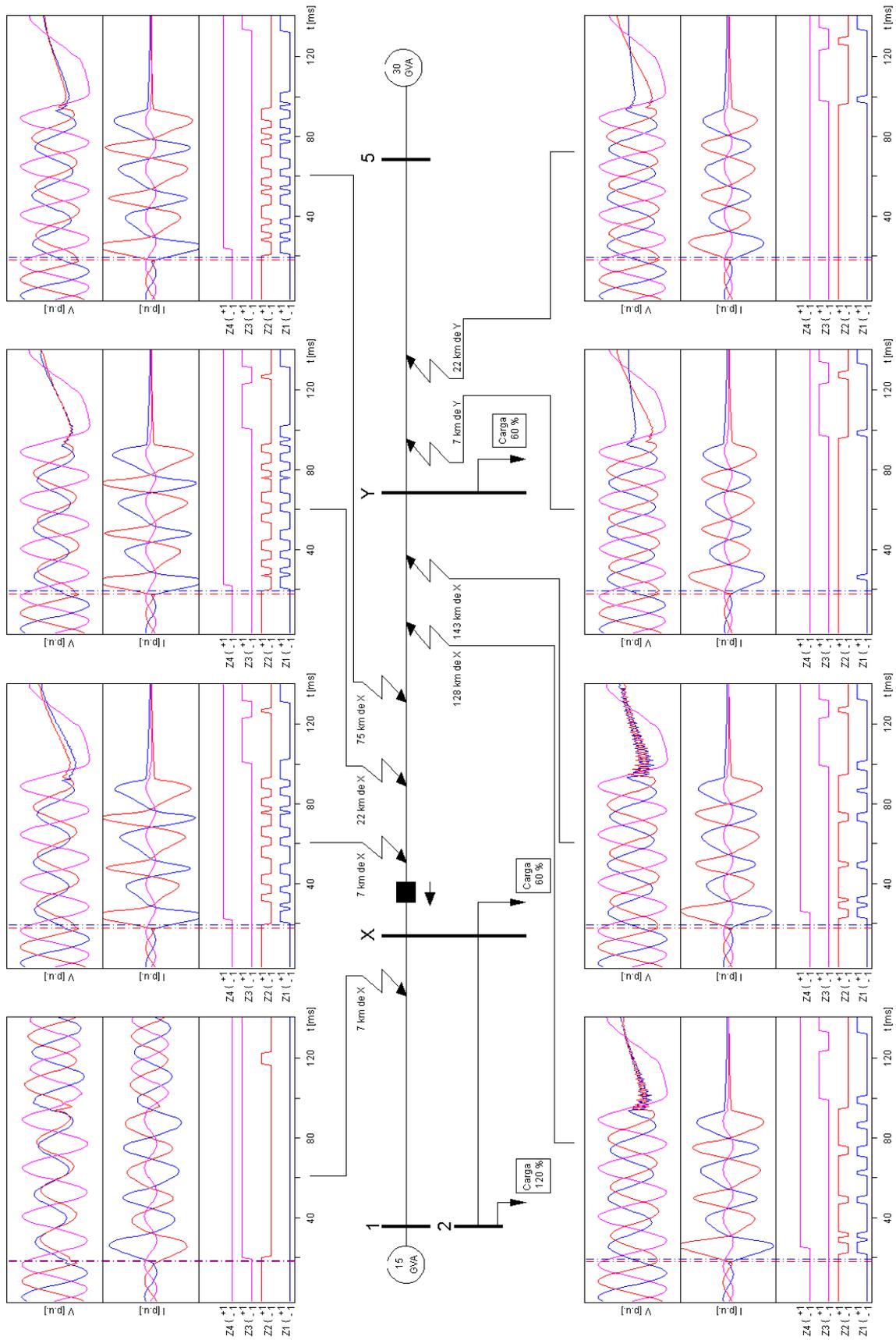


Fig. B.8 Respuesta del relé MLF-ZON situado en ocho posiciones diferentes para un fallo entre las fases A y B.

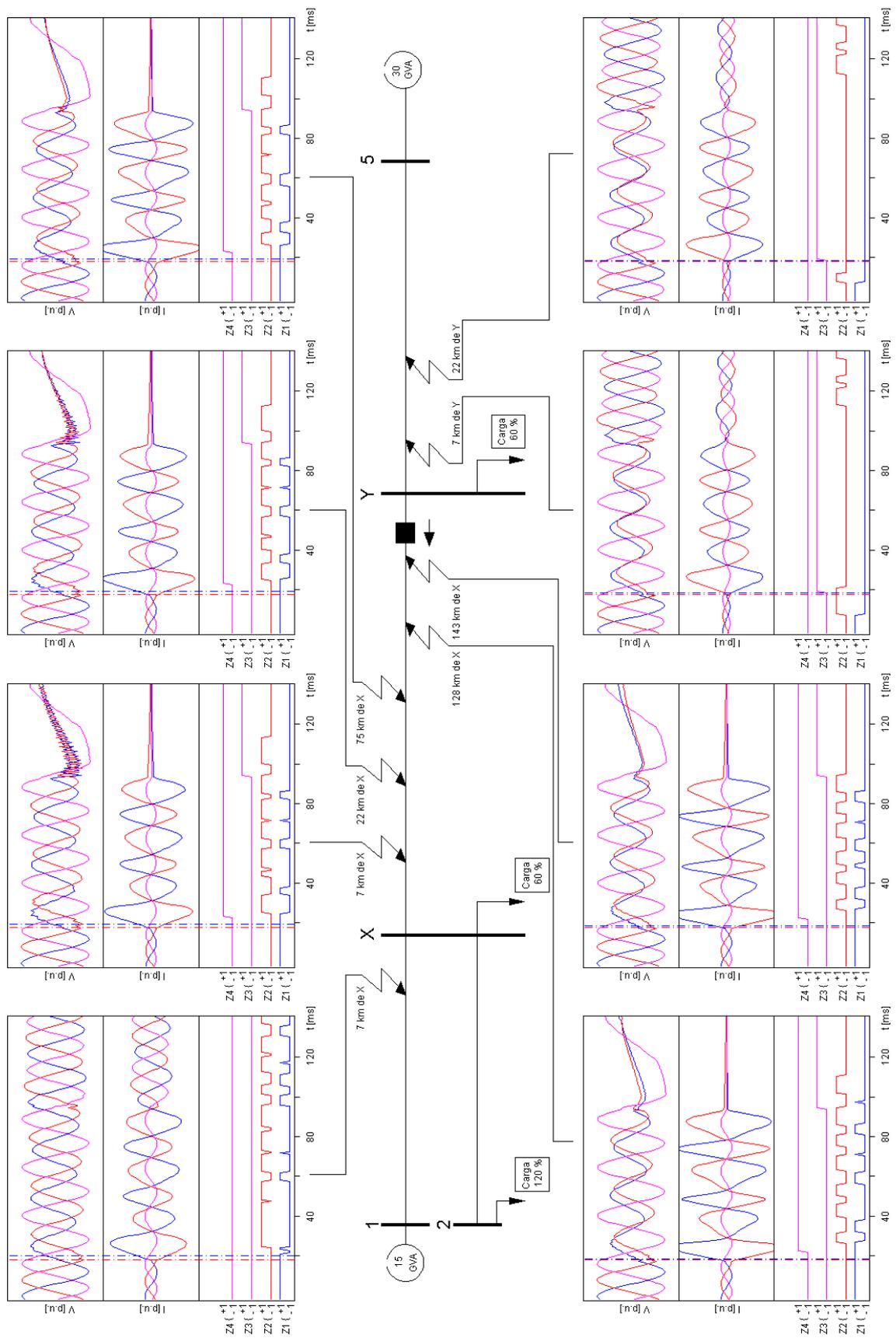


Fig. 9 Respuesta del relé MLF-ZON situado en ocho posiciones diferentes para un fallo entre las fases A y B.

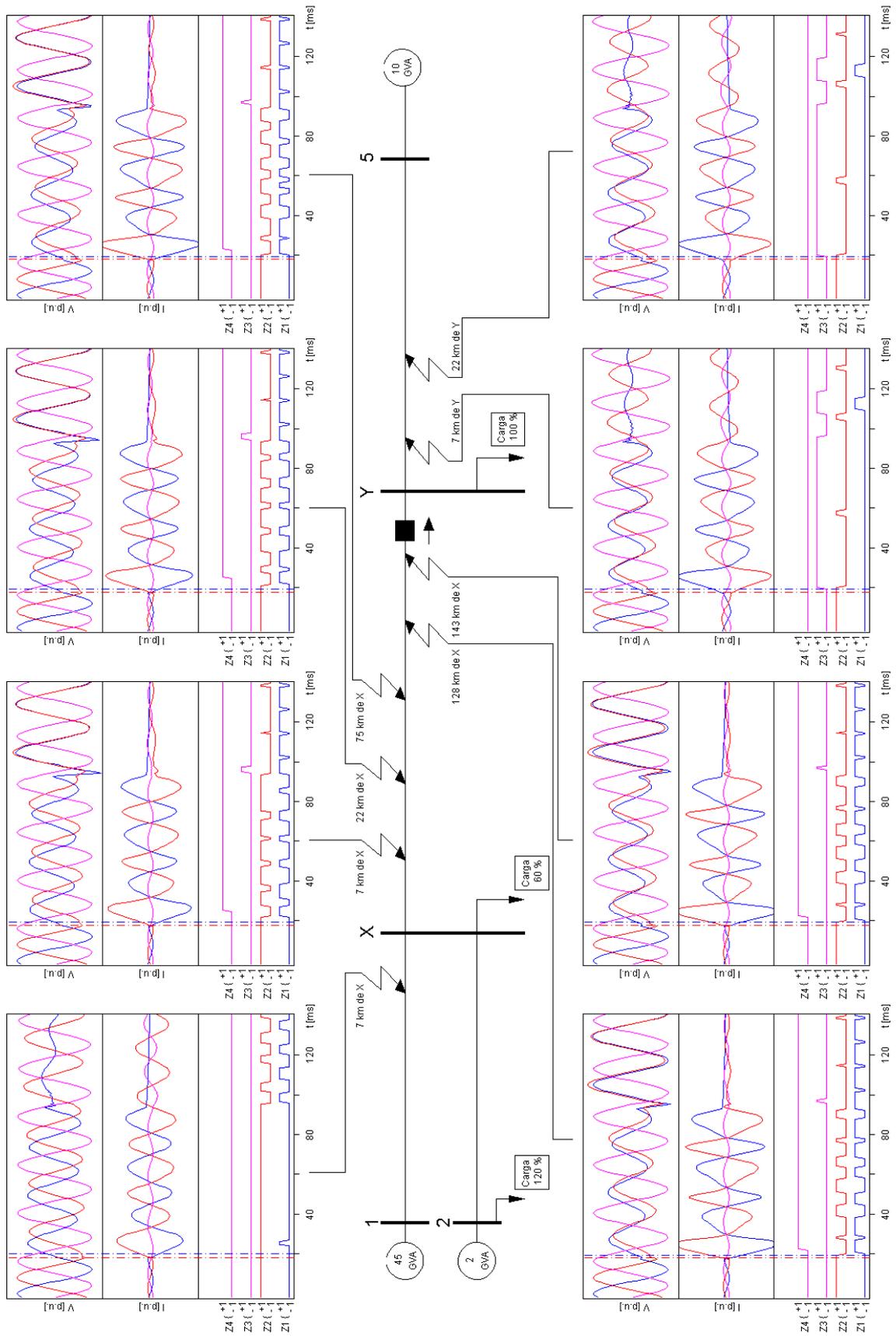


Fig. B. 10 Respuesta del relé MLF-ZON situado en ocho posiciones diferentes para un fallo entre las fases A y B.

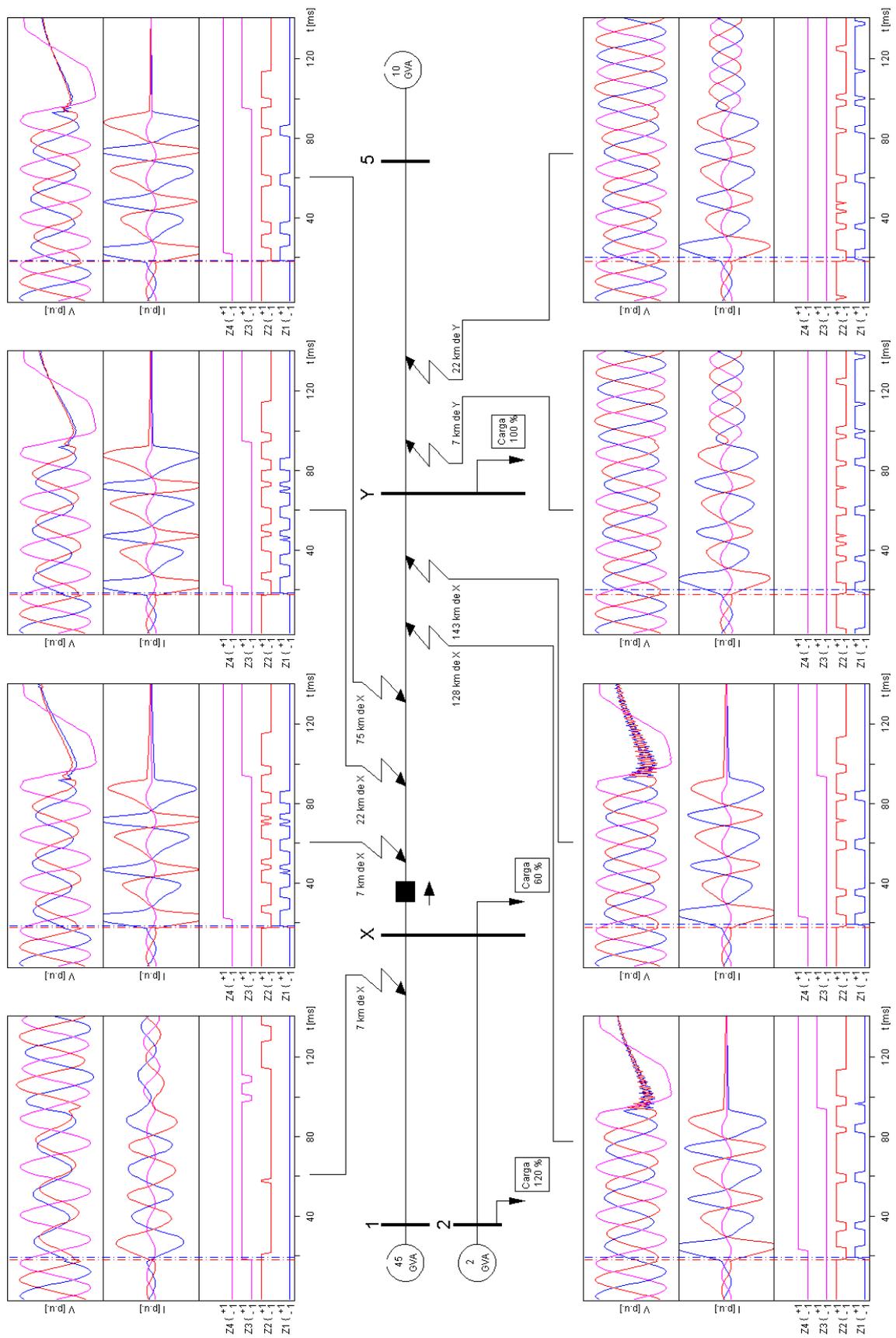


Fig. B. 11 *Respuesta del relé MLF-ZON situado en ocho posiciones diferentes para un fallo entre las fases A y B.*

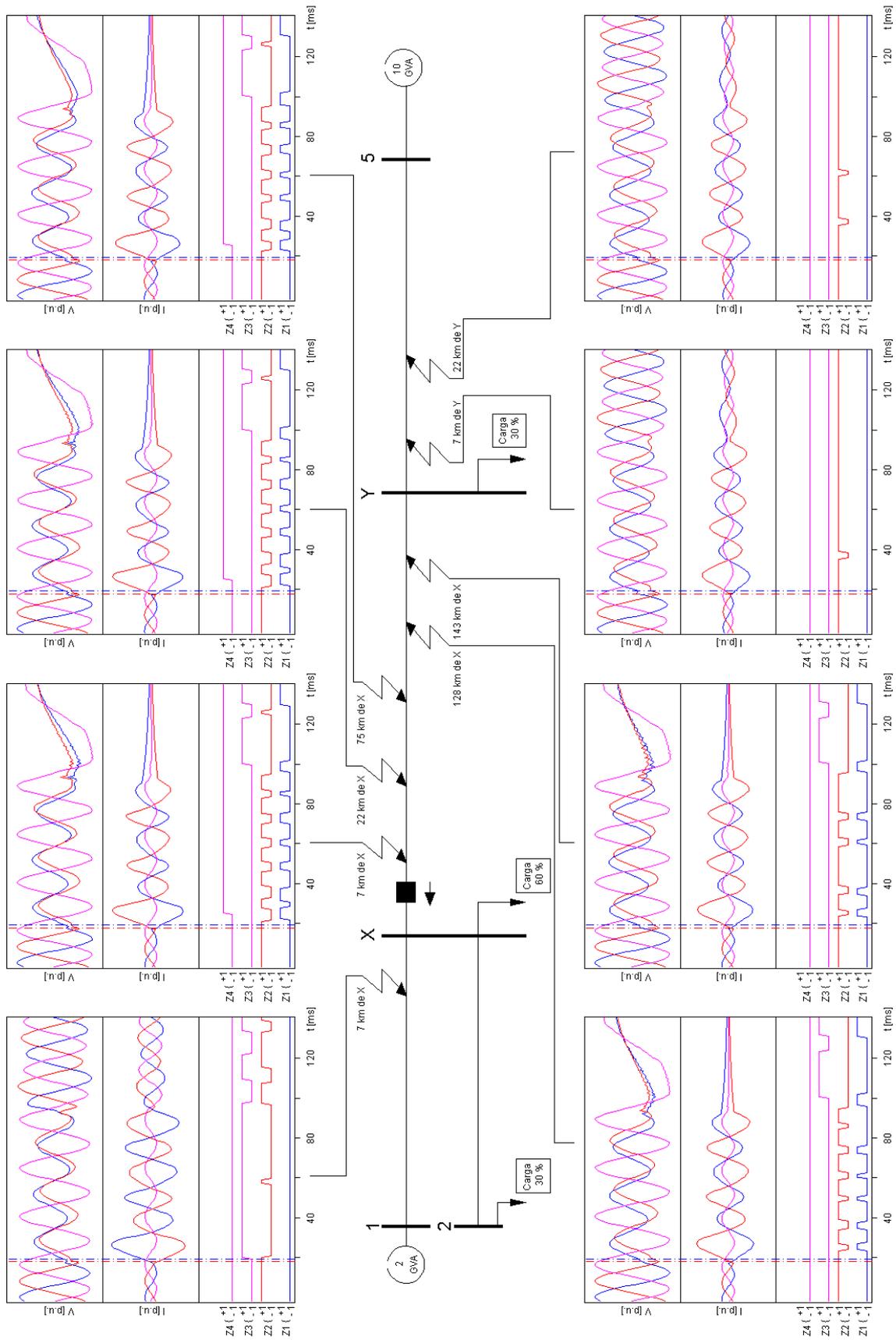


Fig. B. 12 Respuesta del relé MLF-ZON situado en ocho posiciones diferentes para un fallo entre las fases A y B.

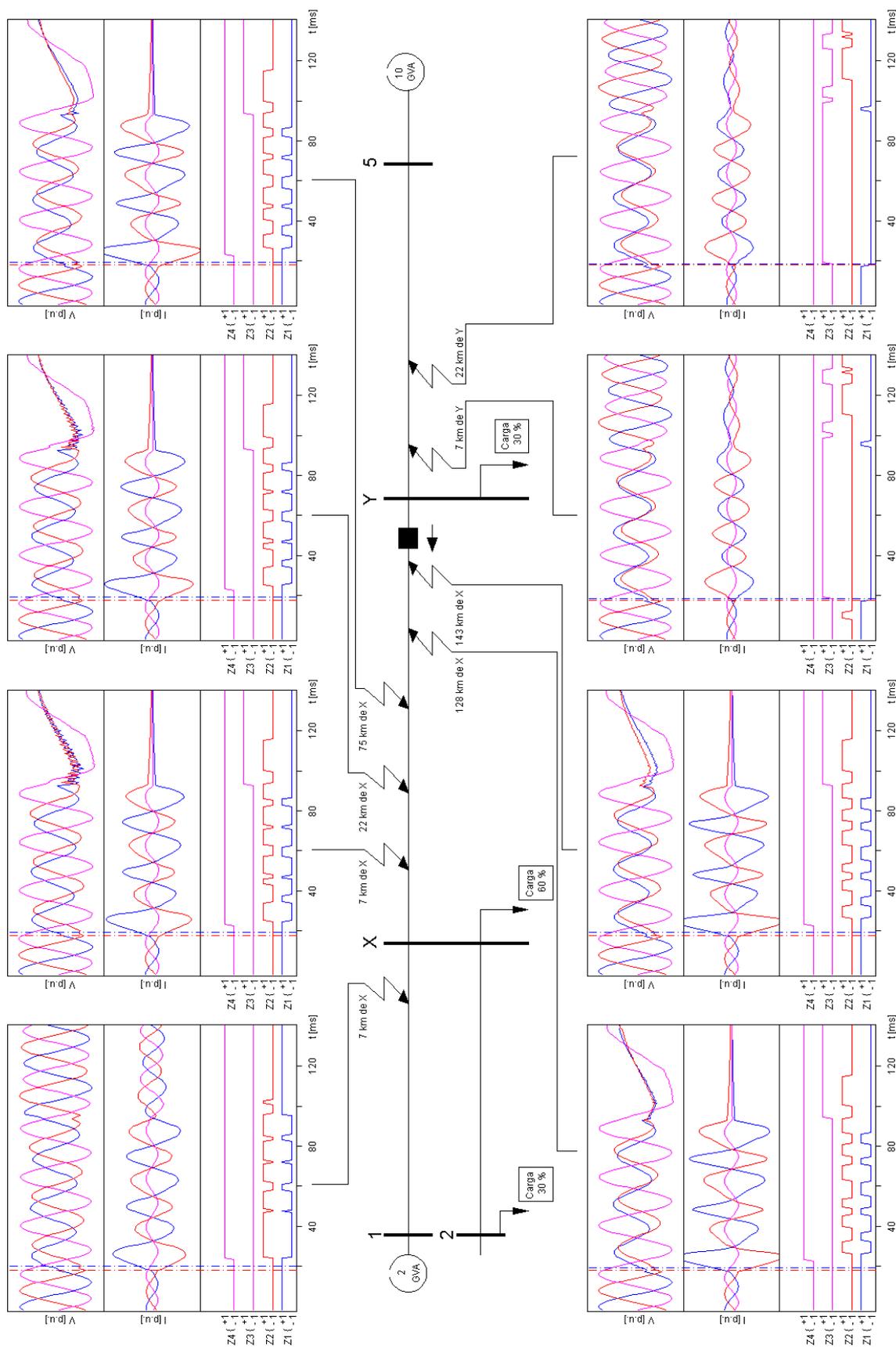


Fig. B.13 *Respuesta del relé MLF-ZON situado en ocho posiciones diferentes para un fallo entre las fases A y B.*

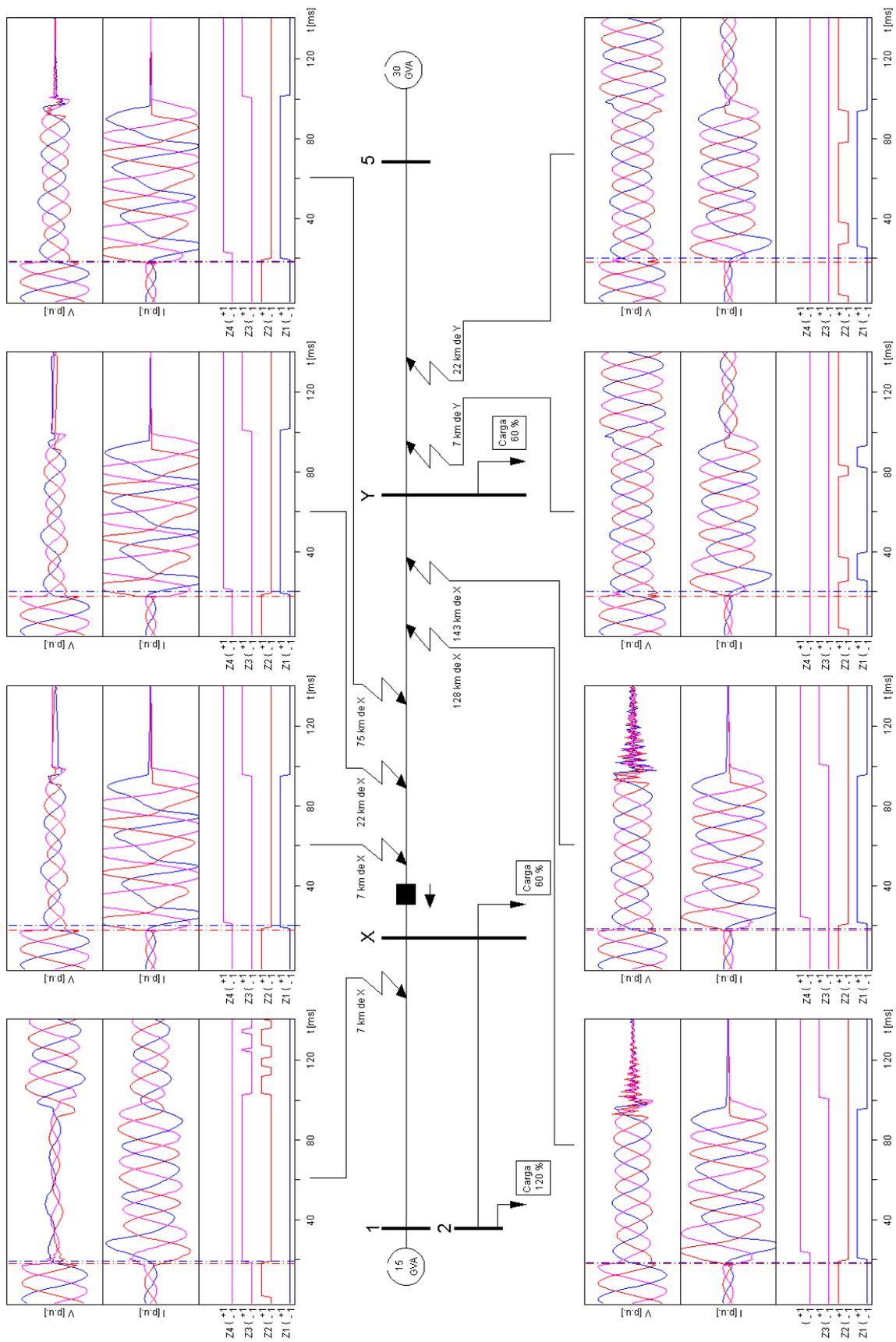


Fig. B.14 Respuesta del relé MLF-ZON situado en ocho posiciones diferentes para un fallo trifásico.

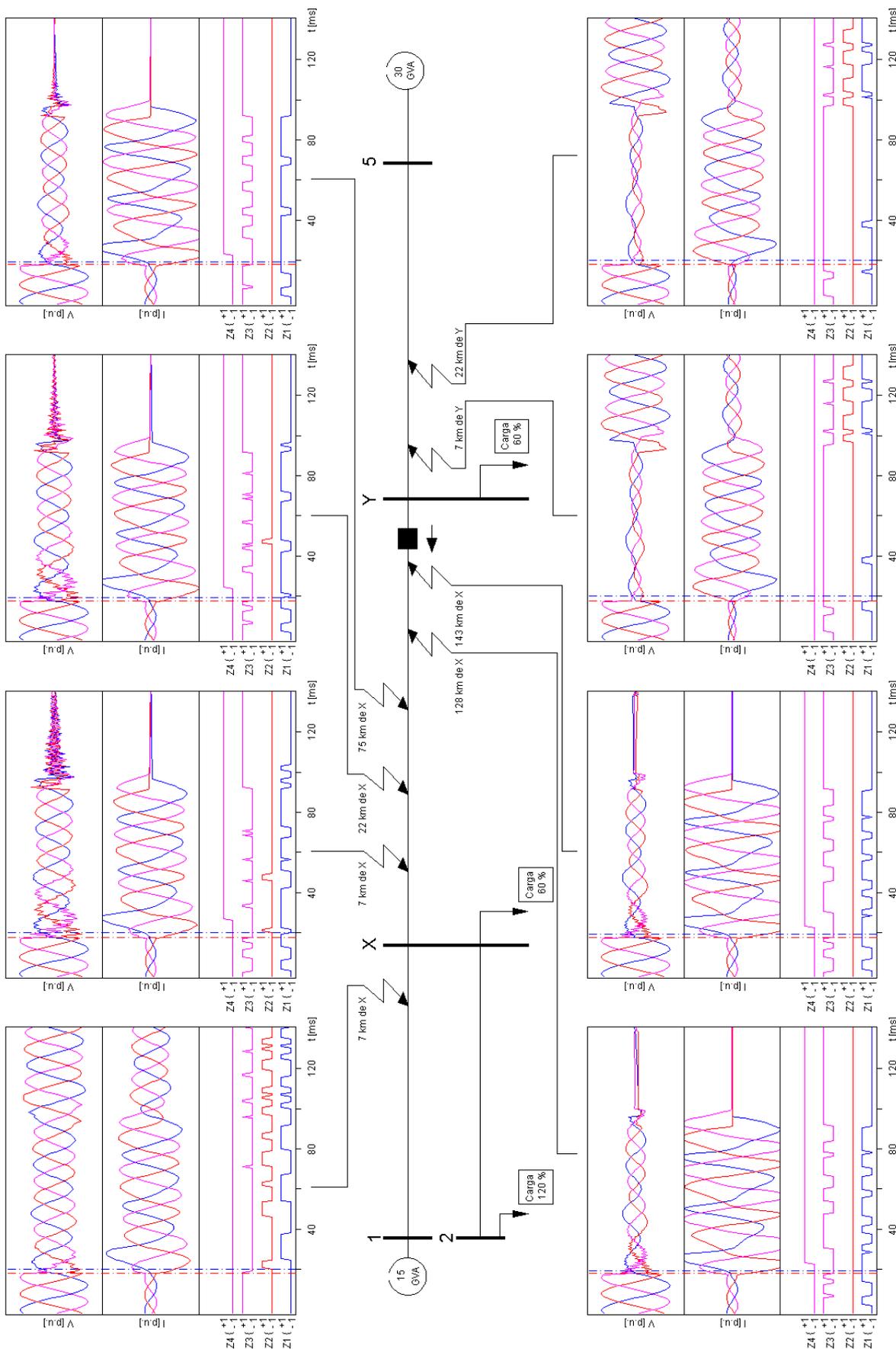


Fig. B.15 Respuesta del relé MLF-ZON situado en ocho posiciones diferentes para un fallo entre las fases A y B.

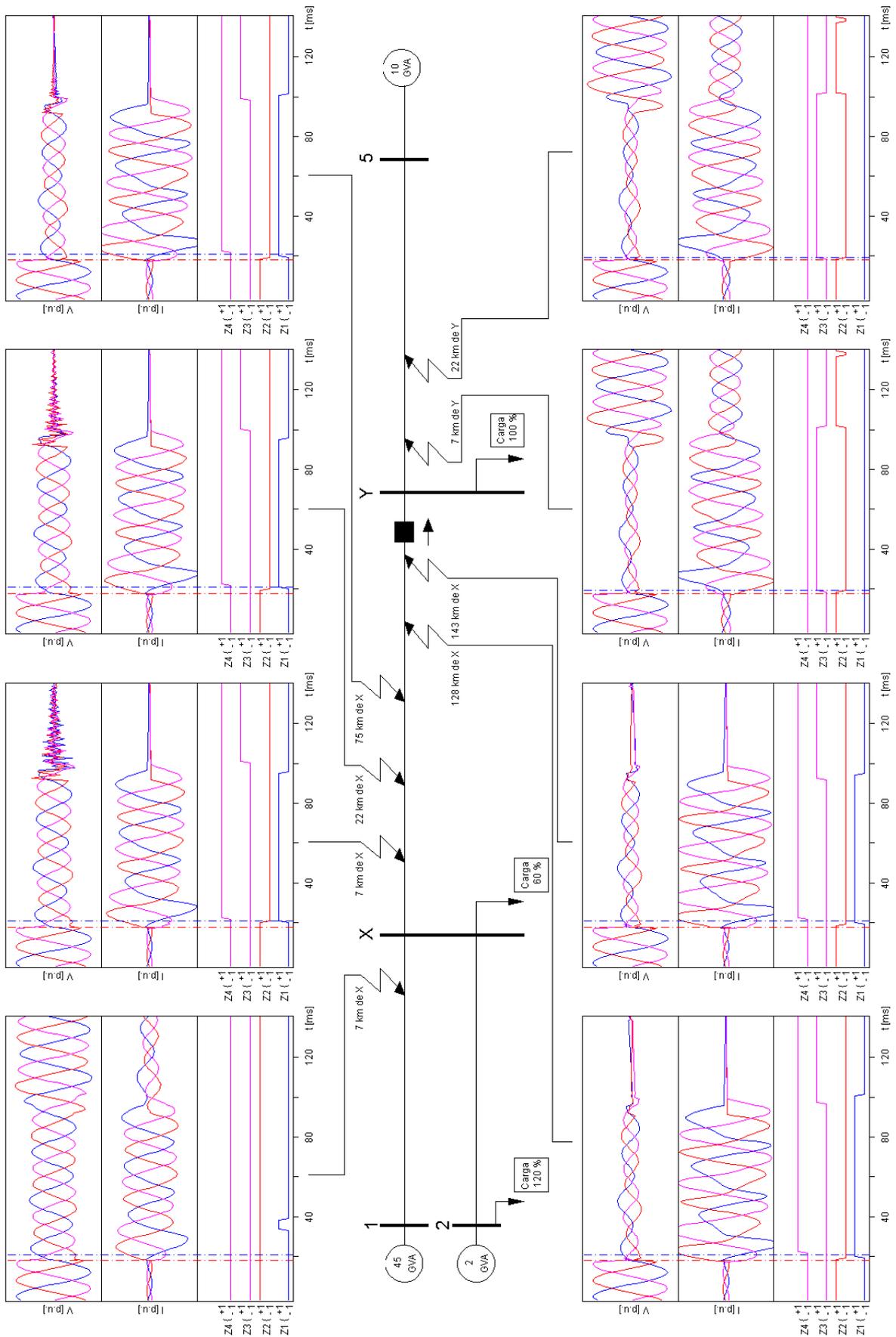


Fig. B.16 Respuesta del relé MLF-ZON situado en ocho posiciones diferentes para un fallo trifásico.

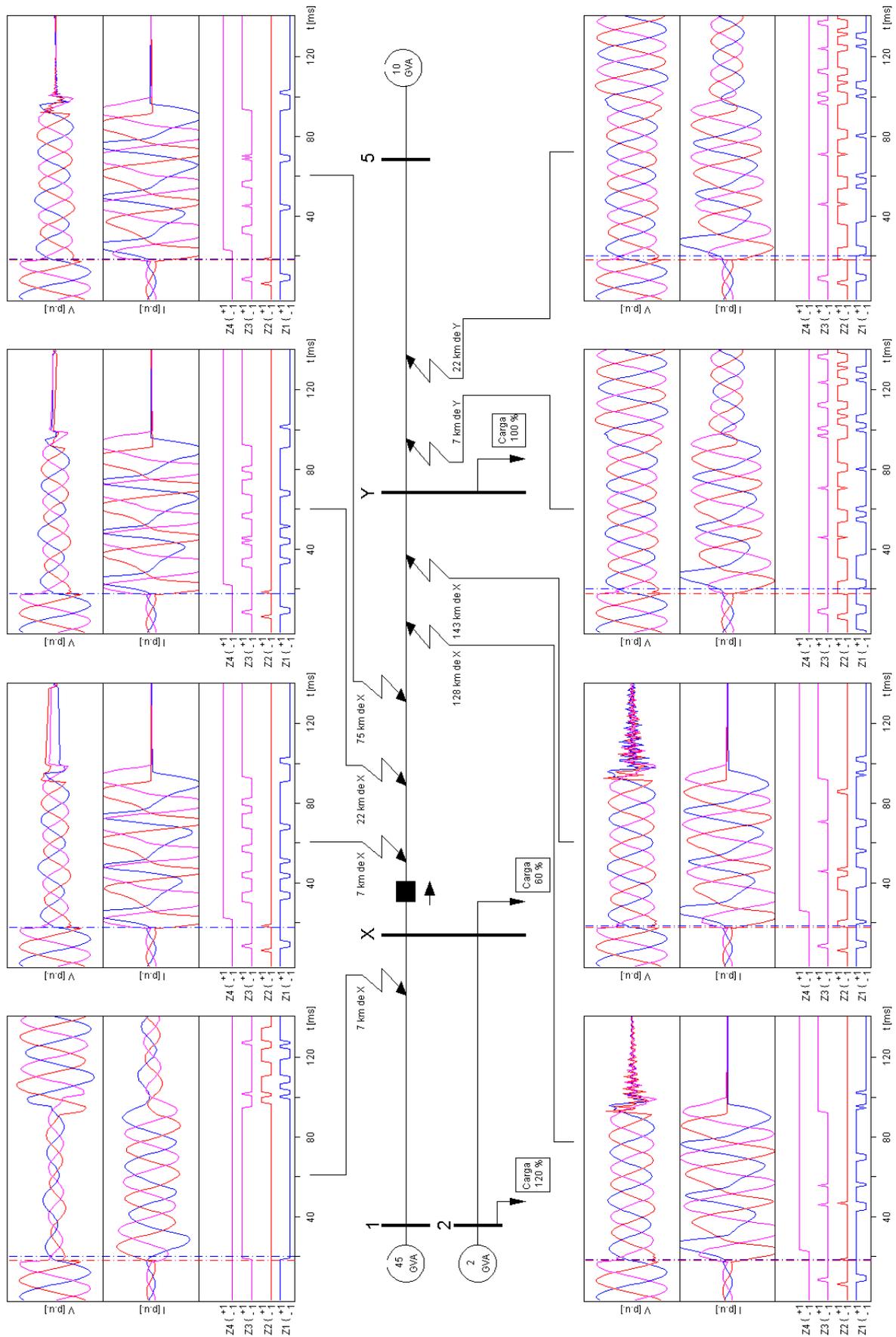


Fig. B.17 *Respuesta del relé MFLF-ZON situado en ocho posiciones diferentes para un fallo trifásico.*

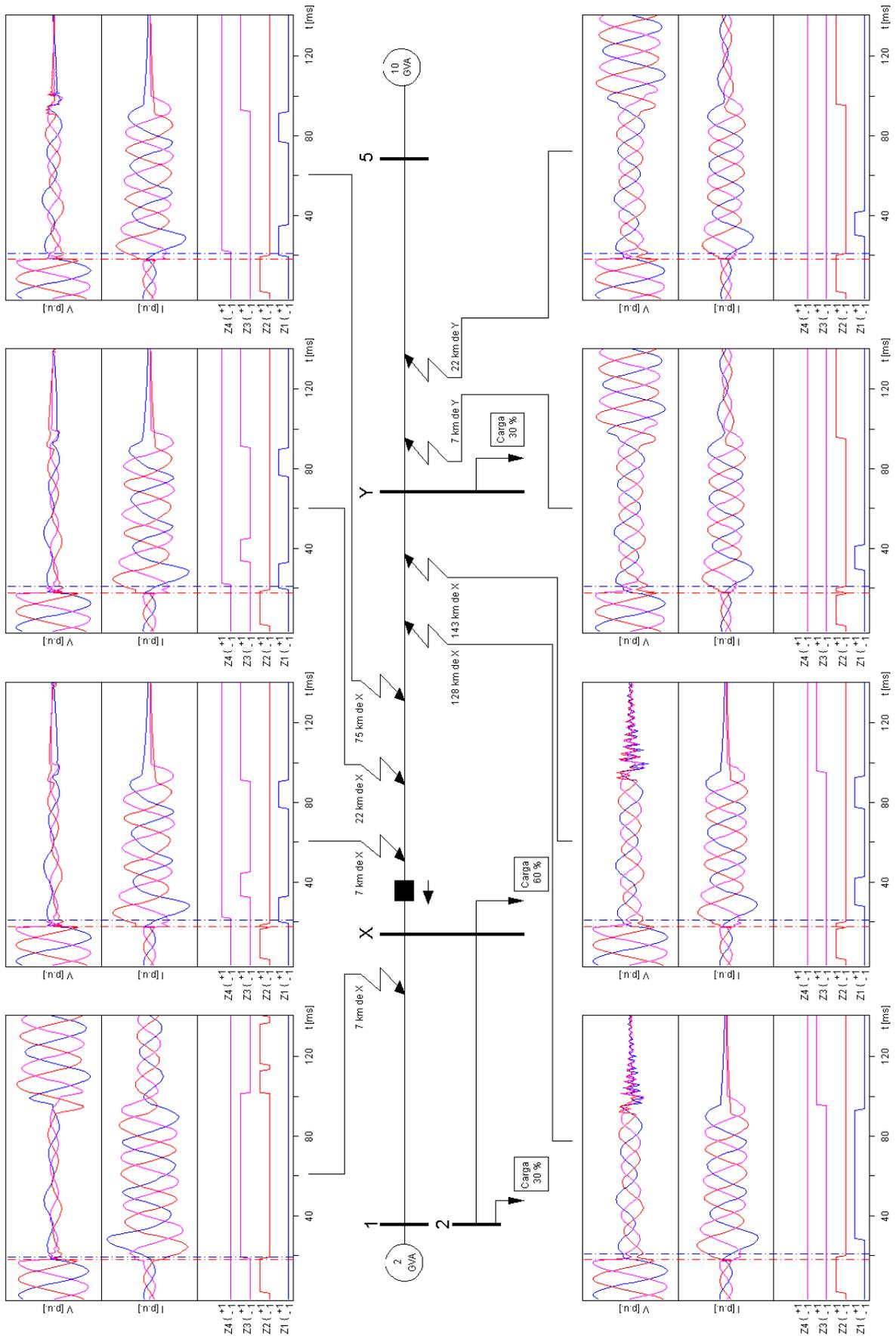


Fig. B.18 Respuesta del relé MLF-ZON situado en ocho posiciones diferentes para un fallo trifásico.

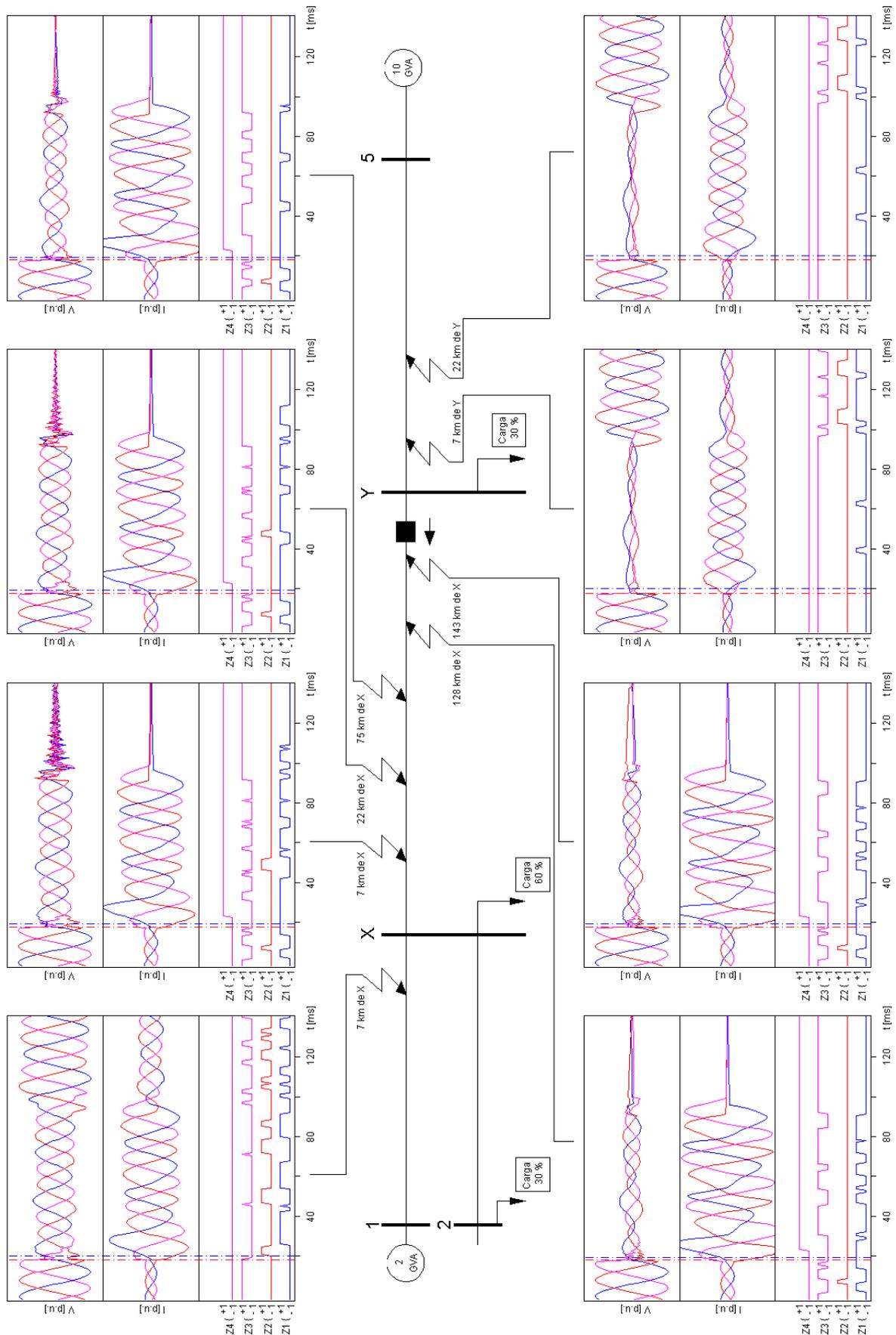


Fig. B.19 Respuesta del relé MFLF-ZON situado en ocho posiciones diferentes para un fallo trifásico.

