APÉNDICE A

DISPOSITIVOS DE PROTECCIÓN DE SOBRECORRIENTE

Históricamente, los relevadores fueron una de las primeras formas de protección en sistemas eléctricos de potencia y, en la actualidad, son uno de los dispositivos más utilizados en los sistemas de protección del sistema. La protección por relevadores se aplica mediante un arreglo de dispositivos, capaces de actuar ante la aparición de fallas o disturbios en cualquier sección del sistema eléctrico, y de actuar de forma automática en la desconexión de aparatos y/o en la emisión de señales de alarma. El sistema de protección por relevadores, puede consistir de uno o varios relevadores asignados para operar de forma instantánea y con retardo de tiempo.

A.1 Relevador de sobrecorriente de tiempo inverso

Los relevadores de sobrecorriente tiempo inverso fueron uno de los primeros relevadores de protección, y en la actualidad son ampliamente usados en el sistema eléctrico de potencia. El relevador electromagnético usa el principio del disco de inducción [**12**]. Los relevadores estáticos y digitales emulan las características de operación de relevadores electromecánicos para facilitar la coordinación entre ellos, razón por la cual no son tratados en el presente estudio.

El elemento de inducción (Fig. A.1a) consta de una armadura magnética (1), en cada punta de polo tiene un anillo sombreador (2) dispuesto para abarcar parte de la sección transversal de la punta del polo; la bobina (3) está ubicada en la armadura. Dentro del espacio del polo está ubicado un disco de aluminio (4) libre para rotar en su eje (5). En el eje está ubicado un contacto (6) que cierra en los contactos (7) cuando el disco gira, en el otro lado del viaje del disco entre los polos está un magneto permanente (8).

Un electromagneto con un solo devanado es capaz de producir un torque en el disco, solo si el disco es afectado por dos flujos magnéticos desfasados en tiempo y espacio. Un flujo de corriente a través del devanado (3), crea un flujo magnético Φ. Este se divide en dos flujos Φ_1 y Φ_2, cada cual pasa a través de la bobina sombreada y no sombreada respectivamente. En la Fig. A.1b se observa que los flujos están desfasados en espacio. En este sistema, en virtud de la presencia de una bobina sombreada, los flujos Φ_1 y Φ_2 son desfasados en fase. Este desfasamiento es mostrado en el diagrama vectorial de la Fig. A.1c.

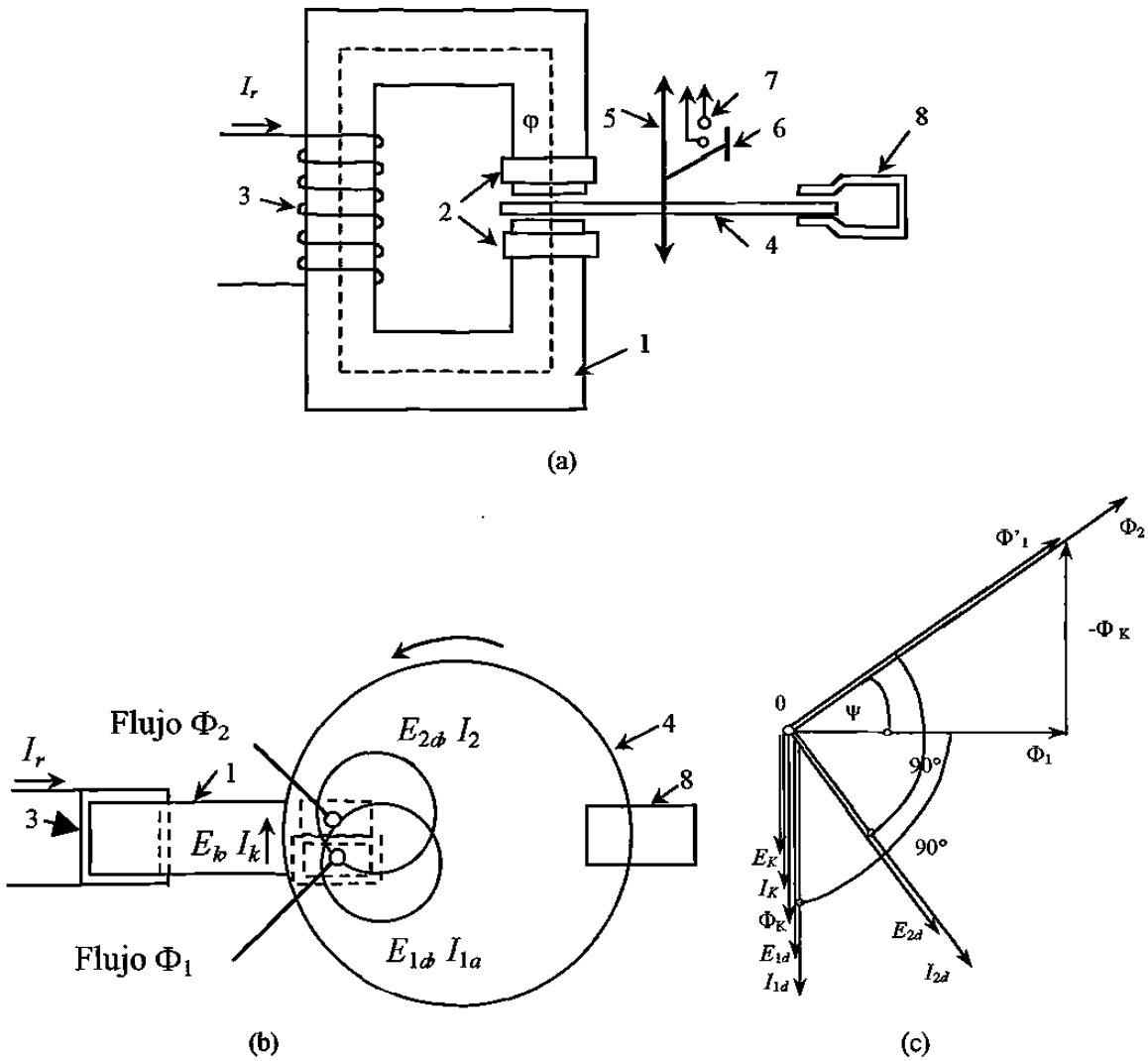


Fig. A.1. Estructura funcional del relevador de sobrecorriente de inducción (a), acción de flujos magnéticos sobre el disco (b), diagrama vectorial (c).

El flujo Φ_1 (usado como referencia) induce una f.e.m. E_k la cual retrasa el flujo Φ_1 a 90°, la f.e.m. E_k provoca una circulación de corriente I_k. Esta corriente puede ser asumida en fase con E_k debido a la baja inductancia de la bobina. El flujo de corriente I_k crea el flujo Φ_R, el cual atraviesa el disco. El flujo Φ_1 puede ser considerado como la suma vectorial de los flujos $\Phi_1^{'}$ y Φ_k:

$$\Phi_1 = \Phi_1^{'} + \Phi_k \tag{A.1}$$

donde Φ_1' es el flujo en la zona sombreada si el anillo sombreador estuviera ausente, este flujo coincide en dirección con el flujo de la sección no sombreada, y Φ_k es el flujo debido a la presencia del anillo sombreador. Del diagrama vectorial de la Fig. A.1c se observa que los flujos Φ_1 y Φ_2 no coinciden en fase, el ángulo relativo entre ellos es ψ.

Los flujos Φ_1 y Φ_2 inciden en el disco induciendo en el una f.e.m. E_{1d} y E_{2d} las cuales están atrasados 90° con respecto a los flujos que los inducen. Se desarrollan las corrientes I_{1d} y I_{2d} que están en fase con las f.e.m. respectivas. El flujo Φ_1 interactúa con la corriente de eddy I_{2d}, y el flujo Φ_2 con la corriente de eddy I_{1d}. Esto resulta en un torque el cual provoca la rotación del disco:

$$T = k\,\Phi_1\,\Phi_2\cos(90-\psi) = k\,\Phi_1\,\Phi_2\,sen\,\psi \qquad \text{(A.2)}$$

Desde que en un circuito magnético no saturado los flujos son proporcionales a las corrientes, y ambos flujos Φ_1 y Φ_2 son producidos por la misma corriente I_k, el torque actuando sobre el disco puede ser expresado como:

$$T = kI_r^2\,sen\,\psi \qquad \text{(A.3)}$$

La magneto permanente (8) funciona como un dispositivo amortiguador. Cuando el disco gira, las corrientes de eddy inducidas en el disco reaccionan con el campo del magneto permanente y crean un torque de oposición. El torque de oposición es proporcional a la velocidad del disco. La velocidad angular de giro del disco es proporcional a la magnitud de la corriente de operación. Esta característica produce una operación rápida para corrientes de operación grandes y lenta para corrientes cercanas a la corriente de arranque, originando así una característica de operación de tiempo inverso en función de la corriente.

El resorte de espiral (no mostrado en la Fig. A.1), provee la característica de reposición de los contactos después de que la corriente de operación del circuito es removida y su valor es menor a la corriente de reposición.

El torque es debido al cuadrado del flujo causado por la corriente (ecuación A.3). En el análisis anterior se asume una dependencia lineal entre la corriente y el flujo magnético, no se considera la saturación del electromagneto que es utilizado para obtener diferentes grados de inversión de las características tiempo-corriente producidas por el principio de inducción [13].

A.1.1 Características de operación de relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso

La característica de operación del relevador de tiempo inverso, representa el tiempo de operación en proporción inversa con la corriente que fluye en el relevador. La norma IEEE Std C37.112-1996 [13] define las tres características de operación más usadas en relevadores de tiempo inverso: Inversa, Muy Inversa y Extremadamente Inversa; estas características se muestran en la Fig. A.2. Estas curvas difieren en la razón en la que el tiempo de operación decrece a medida que la corriente se incrementa.

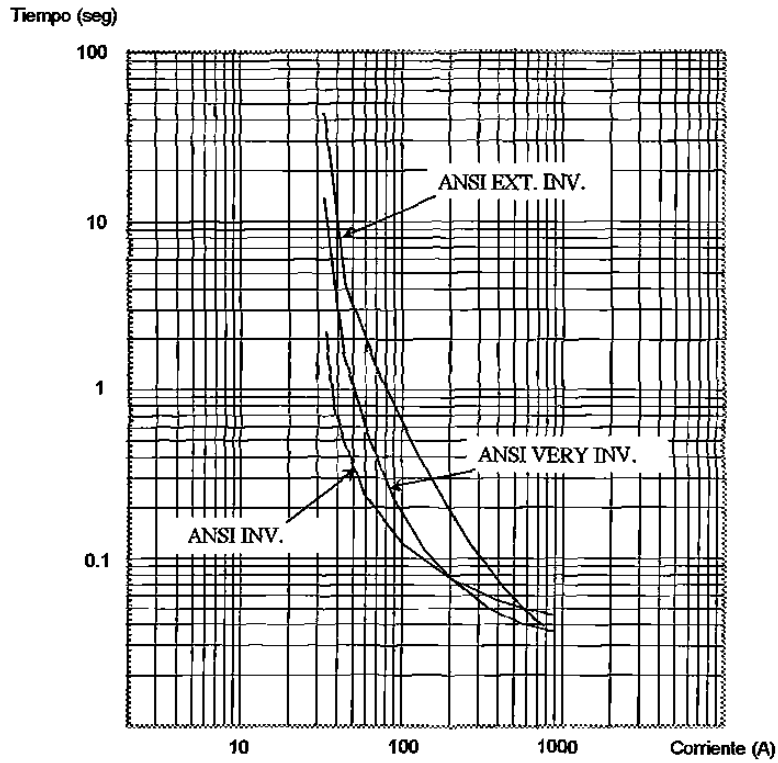


Fig. A.2. Grados de inversión de características de operación.

En la Fig. A.3 se muestra una familia de características tiempo-corriente. Cada curva es mostrada para cada ajuste numérico de la escala de la palanca de tiempo. El ajuste de la palanca de tiempo de una curva dada, establece diferentes tiempos de operación para el mismo nivel de corriente. En relevadores electromecánicos el ajuste de la palanca de tiempo se realiza dando un espacio mayor o menor entre contactos. Es posible obtener curvas intermedias por interpolación desde que una gran variedad de los ajustes son continuos.

Las curvas son dibujadas por el fabricante en términos de múltiplos de la corriente de arranque (corriente de cortocircuito / corriente de arranque), es decir estas curvas pueden ser utilizadas independientemente del ajuste del relevador. Esto es posible con relevadores tipo inducción donde el ajuste de arranque es por conexión de bobinas, es decir los amper-vuelta en el ajuste del arranque son los mismos para cada conexión. Además en un múltiplo dado de arranque, la bobina de amper-vuelta y el torque son los mismos a pesar del ajuste utilizado.

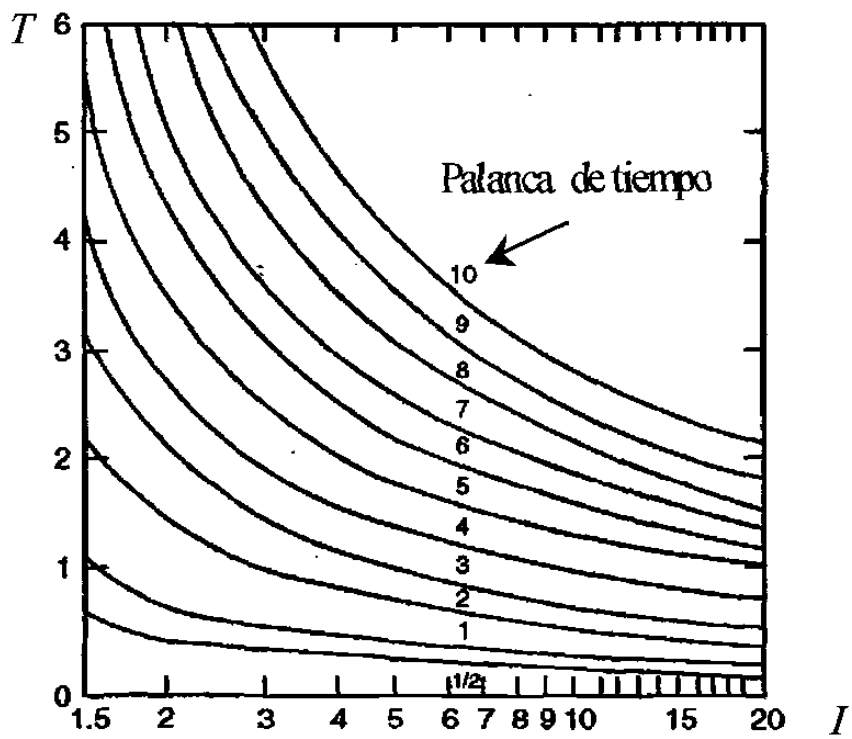


Fig. A.3. Familia de curvas de relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso.

A.2 Relevador instantáneo de sobrecorriente

El relevador instantáneo de sobrecorriente es diseñado para operar sin retardo de tiempo intencional cuando la corriente excede el ajuste del relevador. El relevador instantáneo es usado únicamente como protección primaria para reducción el tiempo de disparo del relevador de sobrecorriente de tiempo inverso. Su zona de protección es ajustada a un 120% del valor de corriente de falla máxima en el nodo remoto (Fig. A.4). Una reducción en la magnitud de cortocircuito disminuye la zona de operación del relevador instantáneo de sobrecorriente, puede incluso perderse la protección instantánea en determinadas condiciones de operación.

La estructura funcional del relevador de sobrecorriente instantáneo [**12**] es mostrada en la Fig. A.5. Cuando una corriente fluye a través de la bobina (3) del relevador, una fuerza electromagnética F_e actúa sobre la armadura (2) para vencer el espacio δ. En este tipo de relevadores electromecánicos el número de vueltas de la bobina de armadura no causa cambio en el valor de la corriente. La fuerza F_e puede ser determinada:

$$F_e = \frac{1}{2} I^2 \omega^2 \frac{dG}{d\delta} \tag{A.4}$$

donde I es la corriente que fluye por la bobina del relevador, ω es el número de vueltas de la bobina y $\frac{dG}{d\delta}$ es la razón de cambio de la permeancia con respecto al desplazamiento de la armadura.

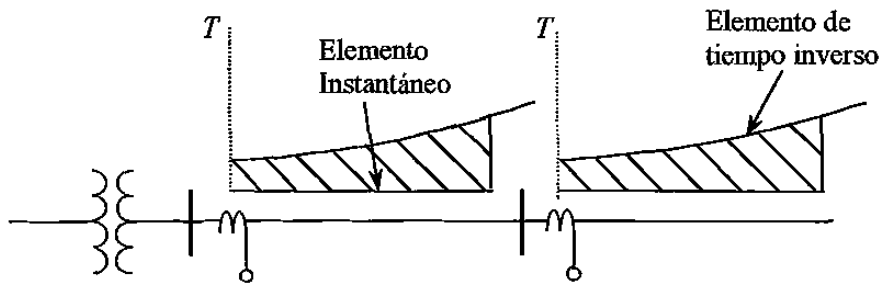


Fig. A.4. Zona de operación de un relevador instantáneo de sobrecorriente.

Del diagrama de la Fig. A.5 se observa que la fuerza F_e es contrarrestada por la fuerza de oposición F_s del resorte. Es evidente que para la operación del relevador la condición de $F_e \geq F_s$ debe cumplirse, la armadura (2) girará en sentido de las manecillas del reloj y provocará el cierre entre los terminales (5) y (6) del contacto. Esto resulta en una energización del circuito auxiliar de disparo del interruptor (52) o el cierre del circuito de señalización (AL).

En la Fig. A.5b se representa el cambio en la magnitud de corriente que circula por la bobina del relevador. La corriente se incrementa (intervalo t_1-t_2) hasta alcanzar el valor de arranque I_a (corriente de operación) que provoca el cierre de contactos del relevador. Si después del cierre de contactos la corriente decrementa su valor (t_3), cuando alcance el valor I_r (corriente de reposición) en el instante (t_4), la armadura retornará a su posición inicial y abrirá los circuitos de disparo del interruptor (52) y de señalización (AL). La corriente de operación del relevador es la comprendida entre el intervalo t_2 - t_3 en la Fig. A.5b.

Valores comunes de la razón de reposición (K_d) son de 0.7 a 0.95:

$$K_d = \frac{I_r}{I_a} \tag{A.5}$$

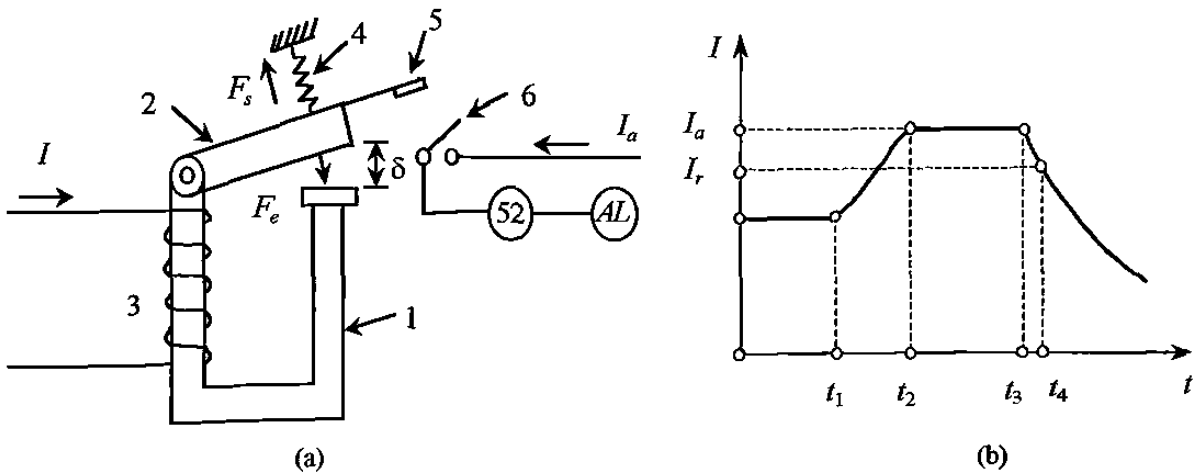


Fig. A.5. Estructura funcional del relevador de sobrecorriente instantáneo (a), corriente de arranque y reposición (b).

Un estudio de las características electromagnéticas y mecánicas del relevador hace evidente que, para garantizar el arranque del relevador, es necesario que una fuerza remanente exista a lo largo del viaje de la armadura $F_r = F_e - F_s > 0$. La Fig. A.6 representa las características electromagnéticas y mecánicas del relevador despreciando la fricción y el peso muerto en la partes móviles de la armadura. La característica electromagnética debe ocupar una posición mayor que la característica mecánica para permitir la operación del relevador.

Un valor excesivo de la F_r no es conveniente, sobre todo al final del viaje de la palanca de armadura, porque cuando el relevador está operando, la armadura cerrará fuertemente provocando rebote y vibración, y el relevador tendrá una razón baja de K_d. Es necesario que las características electromagnéticas y mecánicas sean tan cercanas como sea posible una de la otra durante el viaje de la palanca. La Fig. A.6 corresponde a una corriente ligeramente mayor del arranque del relevador, en condición de falla la fuerza F_r es incrementada y el efecto de rebote de contactos está presente en mayor medida.

A.3 Fusibles

Los fusibles son el más básico y poco efectivo dispositivo de sobrecorriente. Las funciones básicas de los fusibles son sensar las condiciones actuales del sistema, interrumpir una falla rápidamente y coordinar con otros dispositivos de protección [**14**,**15**,**16**].

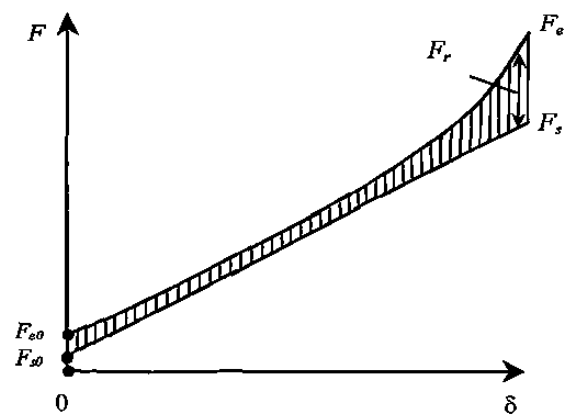


Fig. A.6. Características electromagnéticas y mecánicas del relevador.

El proceso de interrupción de corriente en el fusible, posterior al calentamiento y fundición de la laminilla fusible al circular una sobrecorriente, consta de tres etapas básicas: iniciación del arco eléctrico, al fundirse la laminilla se da el primer paso para la separación del sistema, debido a la diferencia de potencial existente entre las terminales del fusible se origina un arco eléctrico; eliminación del arco, el arco es eliminado mediante un proceso de confinamiento y enfriamiento en el interior del fusible; interrupción de corriente, dadas las condiciones anteriores la interrupción de corriente se da en el siguiente cruce por cero.

El material de la laminilla fusible determina el tipo de curva de operación del fusible. Existen fusibles de un elemento y dos elementos. Los fusibles de un elemento utilizan aleaciones de estaño, cobre o plata, los elementos de estaño tienen baja temperatura de fusión (232 °C) y los de cobre o plata funden a 960 y 1080 °C respectivamente. Los fusibles con dos elementos incorporan dos materiales en serie, un extremo usualmente de cobre estañado unido por medio de un bobina de soldadura; en sobrecargas la soldadura funde a un valor de tiempo predeterminado provocando la separación de los elementos fusibles, en cortocircuitos el elemento fusible se funde antes que la soldadura.

La longitud y la sección transversal del elemento fusible determinan la corriente y el tiempo necesario para fundir el elemento. La longitud determina la cantidad de calor que puede ser conducido hacia el centro del elemento; con baja corriente, un elemento largo gradualmente desarrolla un punto caliente en su centro, y rompe tan pronto como el punto caliente alcanza la temperatura de fundición. Con la misma corriente un elemento corto desarrolla un punto caliente que no alcanza la temperatura de fundición, dejando al elemento caliente pero sin fundir. Durante una corriente elevada el incremento de temperatura es más rápido, ningún elemento, ni el corto ni el largo tienen tiempo de conducir el calor hacia el centro. El tiempo de fusión para altas corrientes depende además de la magnitud de la corriente y la sección transversal.

Los fusibles pueden clasificarse en dos tipos: fusible de expulsión y fusible limitador. El tipo de instalación determina tipo de fusible. El fusible de expulsión emplea fibra

deionizante en las paredes interiores del tubo de expulsión para confinar el arco e interrumpir la corriente de falla, y son utilizados en aplicaciones con bajos niveles de corriente de cortocircuito. Los fusibles limitadores emplean arena de cuarzo para interrumpir el arco, son utilizados en aplicaciones con un alto nivel de corriente de cortocircuito.

A.3.1 Fusible tipo expulsión

El fusible tipo expulsión produce ruido, gases calientes deionizantes y expele partículas calientes cuando opera, por lo que su aplicación esta limitada a lugares donde los gases son libres para ventilarse y no presenta aspectos de seguridad; es comúnmente usado en postes y estructuras elevadas.

Un fusible tipo expulsión consiste de tres partes básicas: arandela de contacto, elemento fusible, y cable flexible de extensión. Cada parte es identificada en la Fig. A.7.

Los fusibles tipo expulsión pueden subdividirse por su apariencia en: cerrados, son recomendados en instalaciones congestionadas donde es requerida la circulación de personal cerca de los fusibles energizados, estos fusibles presentan señalización de su operación; abiertos, presentan facilidades para la intercambiabilidad de los tubos de expulsión; de elemento descubierto, son usados en instalaciones rurales donde el nivel de corriente de cortocircuito es bajo, es barato y provee señalización (Fig. A.8).

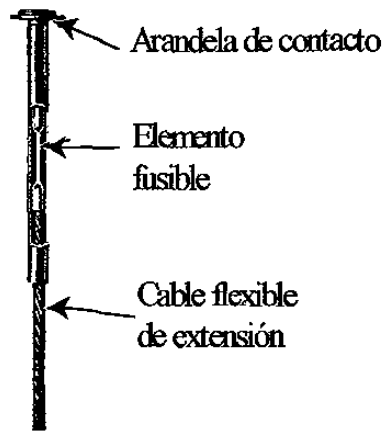


Fig. A.7. Partes principales de un fusible de expulsión.

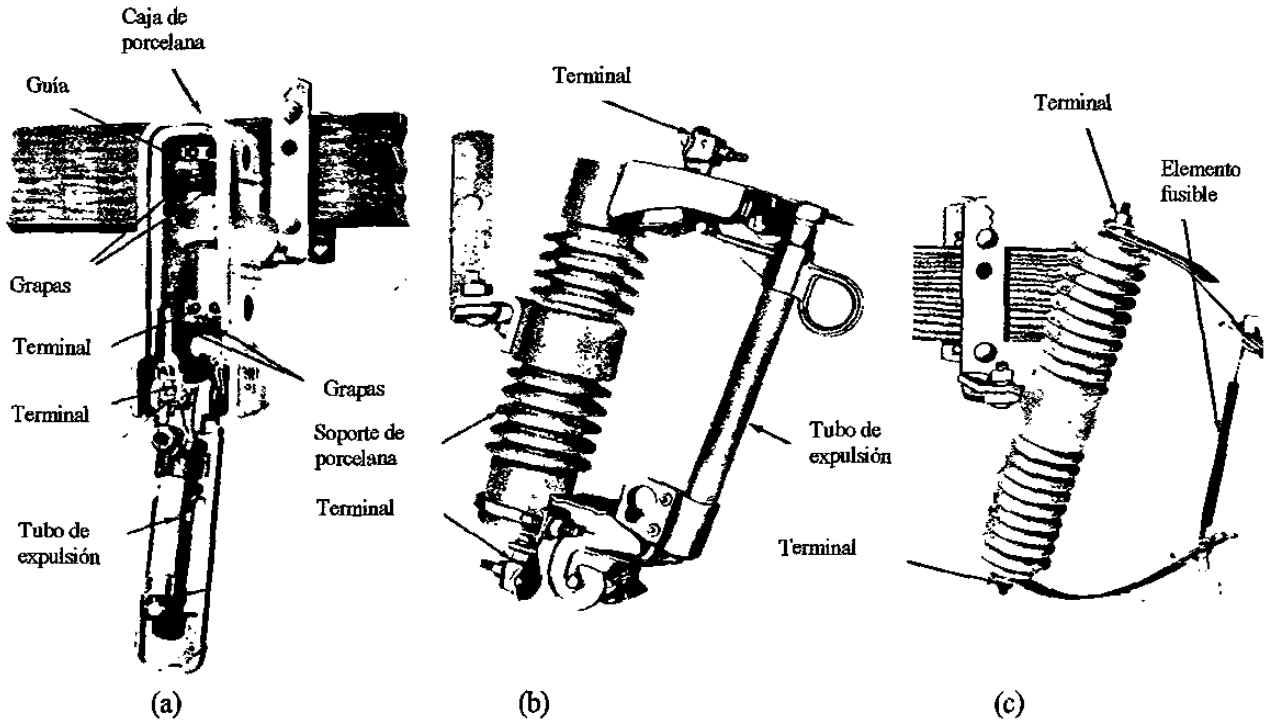


Fig. A.8. Tipos de fusibles: a) abierto, b) cerrado y c) de elemento descubierto.

La operación del fusible depende del tipo de interrupción de corriente, de su característica de operación y velocidad.

Interrupción de corriente. Cuando la corriente sensada por el fusible es superior a la máxima corriente de conducción del fusible, se origina un proceso de calentamiento del elemento fundible; la velocidad de este proceso está en dependencia de las características físicas del elemento fundible y del valor de corriente que circule por el fusible. El restablecimiento del arco de corriente después de que la corriente pasa por cero es prevenido por la presencia de gases deionizantes, y por la presión extrema del gas y turbulencia, el cual incrementa la capacidad dieléctrica del tubo.

Características de operación. Las relaciones de mínimo tiempo de fundición y máximo tiempo de liberación de la falla (Fig. A.9) son determinadas por pruebas. El intervalo entre la iniciación de la corriente de falla y la iniciación del arco eléctrico dentro del tubo del fusible es el tiempo de fusión. El intervalo durante el cual el arco se extingue es el tiempo de arqueo. El tiempo de fusión más el tiempo de arqueo es el tiempo de liberación.

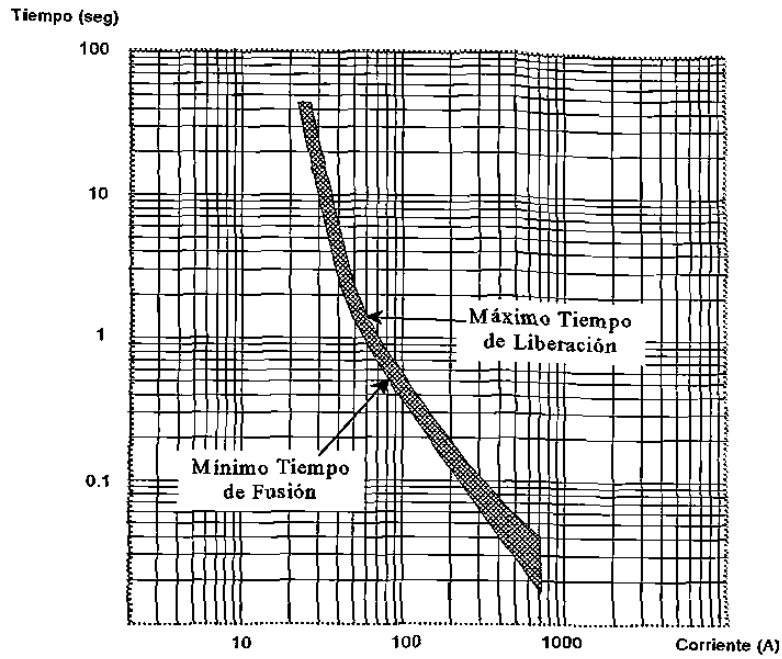


Fig. A.9. Características de mínimo tiempo de fundición y máximo tiempo de liberación de un fusible.

Velocidad. El estándar NEMA [17] divide los fusibles tipo expulsión en rápidos y lentos, designados K y T respectivamente (Fig. A.10). La distinción entre estos dos tipos de fusibles es su razón de velocidad, la cual es la razón entre corrientes de fundición en 0.1 y 300 segundos para fusibles de 100 amp y, en 0.1 y 600 segundos sobre 100 amp. Fusibles lentos tienen razones de velocidad entre 10 y 13 y los fusibles rápidos entre 6 y 8.1

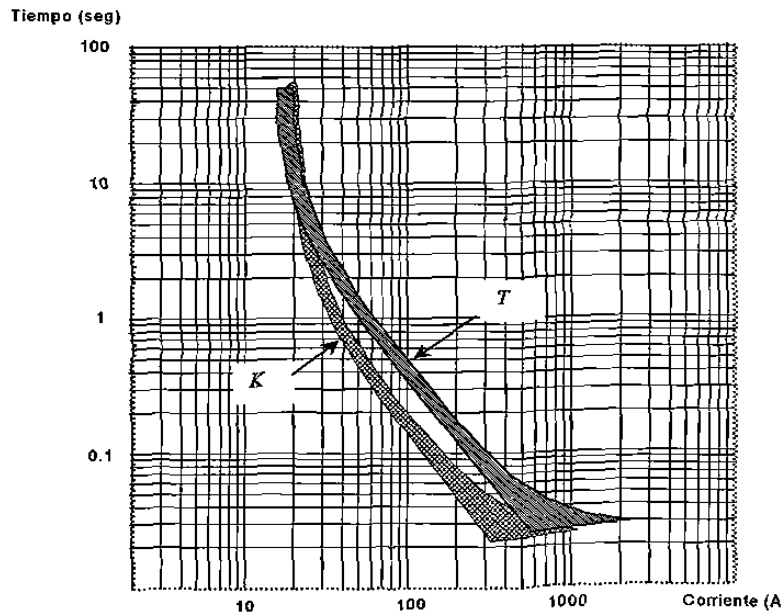


Fig. A.10. Fusible tipo expulsión rápido (K) y lento (T).

A.3.2 Fusible tipo limitador

Los fusibles limitadores son silenciosos y no producen gases, su uso es permitido en áreas confinadas. Su alto nivel de interrupción los hace aplicables en ubicaciones donde el nivel de cortocircuito es más alto que los rangos de fusible tipo expulsión. Los dos componentes principales en la construcción de un fusible limitador son la laminilla fusible, la cual es normalmente de plata pura y la arena de cuarzo.

La plata es utilizada porque tiene un mejor balance de propiedades para producir el rango de amperaje más alto para un tamaño físico mínimo, y también por sus características de fundición. La laminilla fusible no es sometida a daño por debajo de corrientes que provoquen temperaturas de fundición de 960 °C, cuando la laminilla alcanza esta temperatura basta un pequeño incremento para fundir y vaporizar el metal. Esta característica es deseable para minimizar la cantidad total de energía liberada en el fusible durante una interrupción. El fusible consta de varios alambres de plata o elementos arcoiris suspendidos sobre una cubierta, cada uno tiene pequeños orificios de control que distribuyen mejor el calor y ayudan a formar la característica tiempo-corriente del fusible. Cuando la falla ocurre, el calor es generado tan rápidamente que poco se escapa.

Durante corrientes elevadas de falla la laminilla se funde instantáneamente en toda su longitud para interrumpir la corriente, después de esta interrupción, el calor del arco es transferido a la arena transformándola en una estructura cristalina conocida como fulgurate. Esta transformación resulta en una repentina inserción de impedancia adicional y el subsecuente desarrollo de un arco de voltaje; cuando el arco de voltaje del fusible excede al del sistema, el arco es eliminado y la acción del fusible es terminada (Fig. A.11). La función de la arena de cuarzo es absorber el calor generado por la laminilla fusible sin presentar características conductivas, el tamaño de los granos de arena y el método de empaque pueden tener influencia en la característica de operación del fusible.

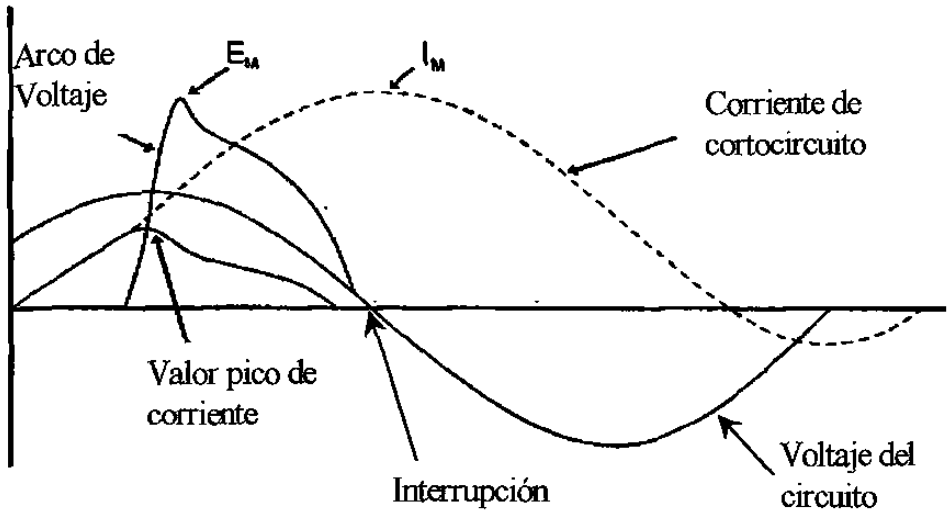


Fig. A.11. Operación de un fusible limitador.

La conexión en serie del fusible tipo limitador y el fusible tipo expulsión, resulta en una característica compuesta que ofrece una acción rápida para corrientes de falla elevadas y una acción con retardo para corrientes de falla menores. En la Fig. A.12 se muestra un ejemplo de esta conexión [15].

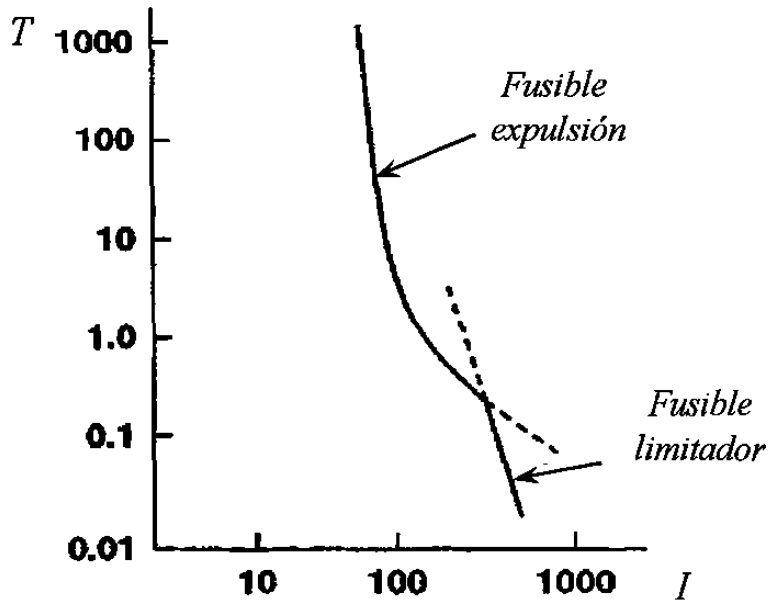


Fig. A.12. Conexión fusible tipo limitador y fusible tipo expulsión.

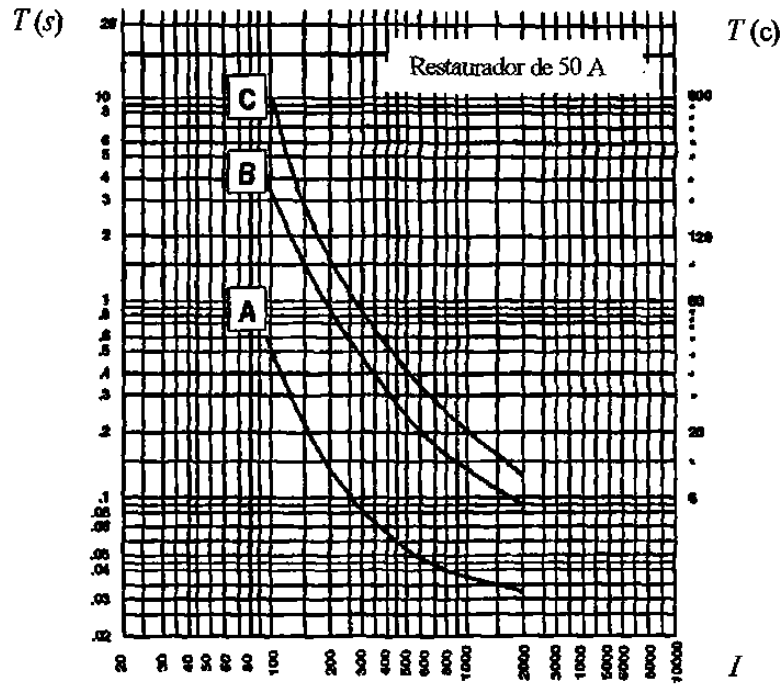


Fig. A.13. Curvas de tiempo para restauradores hidráulicos.

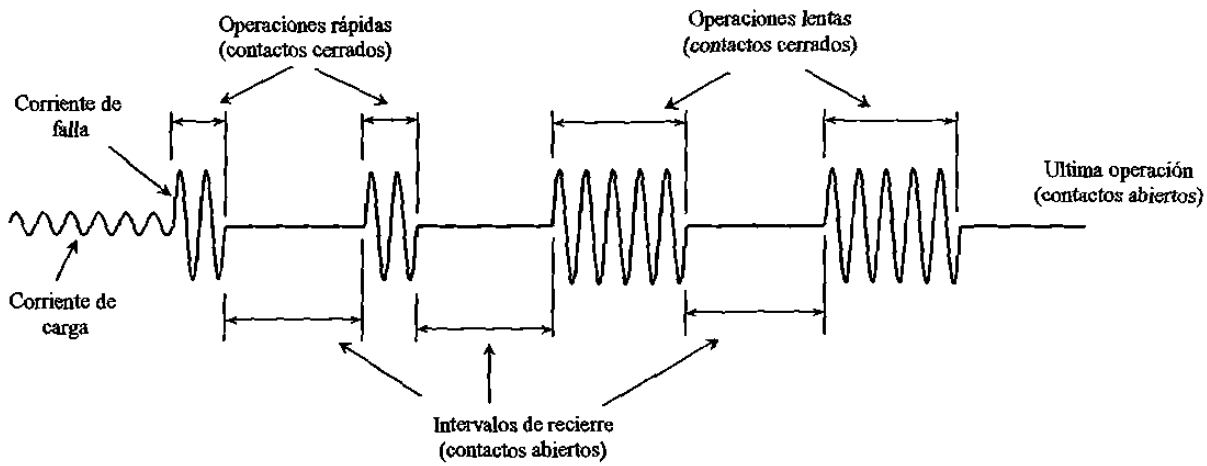


Fig. A.14. Ejemplo de secuencia de operación de un restaurador.

A.4.1 Clasificación de restauradores

Los restauradores son clasificados en dependencia de su número de fases, el tipo de control (hidráulico o electrónico) de operación y el medio de interrupción de corriente (aceite o vacío).

Número de fases. Los restauradores se clasifican por el número de fases en restauradores monofásicos y trifásicos. Los restauradores monofásicos son utilizados para proteger líneas monofásicas o para aislar cargas monofásicas en circuitos trifásicos. Los restauradores trifásicos son utilizados cuando se requiere disparar las tres fases para una falla permanente, como es el caso para motores trifásicos, previniendo fases abiertas. Los restauradores trifásicos tienen dos modos de operación en dependencia si es permitido el disparo monopolar.

Tipo de control. Por el tipo de control los restauradores se clasifican en hidráulicos y electrónicos. El control hidráulico supervisa la sobrecorriente por una serie de bobinas de disparo conectadas en serie con la línea, cuando la corriente excede la corriente mínima de disparo, un émbolo es desplazado dentro de la bobina para abrir los contactos de disparo; el tiempo y la secuencia de operación son obtenidos por la circulación de aceite a través de cavidades separadas. La corriente mínima de disparo y la capacidad continua de corriente son dependientes del diseño de la bobina. En la Fig. A.15 se muestra un esquema de un restaurador con control hidráulico.

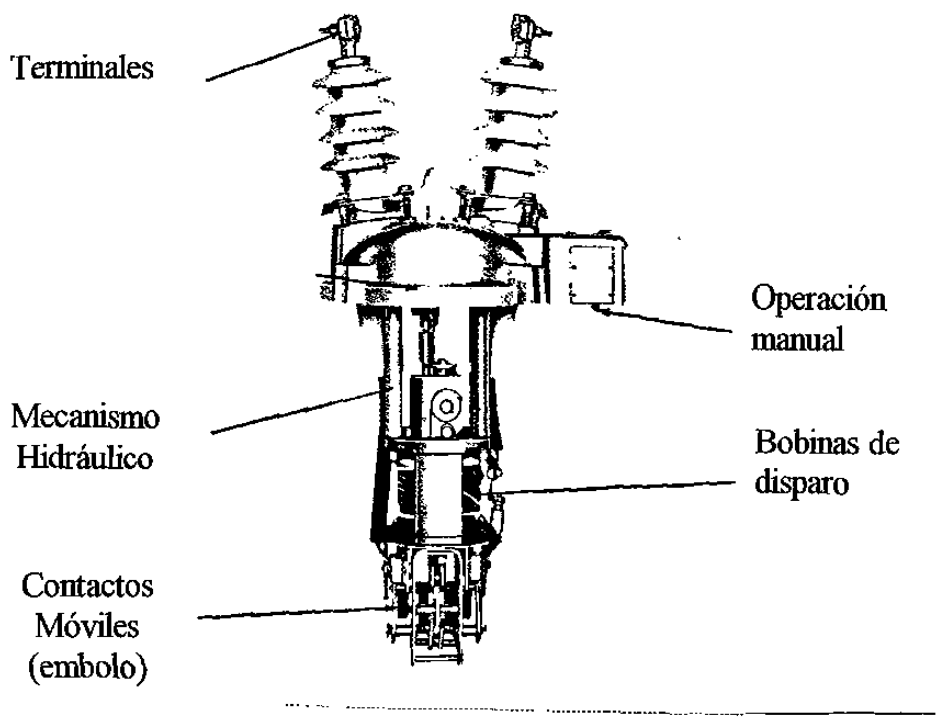


Fig. A.15. Esquema de un restaurador con control hidráulico.

El control electrónico es más flexible, más fácil de ajustar y más exacto que el control hidráulico, permite cambio de características de tiempo-corriente, nivel de corriente de disparo y secuencias de operaciones del restaurador. El diagrama de operación de un restaurador con control electrónico es mostrada en la Fig. A.16. Las corrientes secundarias de los TC son llevadas al circuito de disparo; cuando estas corrientes exceden el nivel del corriente de ajuste definido en el *Sensor de corriente*, se activan los circuitos de *Detector de nivel* y *Temporizador* son activados. Después de un retardo de tiempo dado por la característica tiempo-corriente del restaurador el *Circuito de disparo* es energizado, este circuito emite la señal de disparo al restaurador. Un *Relevador de secuencia* arranca los *Temporizadores de recierre* y *restauración*; después de expirar el tiempo del *Temporizador de recierre* una señal de recierre es enviada al Restaurador; cuando expira el *Temporizador de restauración* el *Relevador de secuencia* inicializa el programa de control a la posición inicial.

Medio de interrupción. Los restauradores utilizan aceite o vacío como medio de interrupción. Los restauradores utilizan el aceite para interrumpir el arco y ofrecer aislamiento. El restaurador de vacío utiliza un medio de interrupción que provee las ventajas de mantenimiento reducido y mínima reacción externa durante la interrupción.

Para la selección de un restaurador deben revisarse los siguientes aspectos: voltaje del sistema, máximo nivel de corriente de cortocircuito, máxima carga, mínima corriente de falla y coordinación con otros dispositivos.

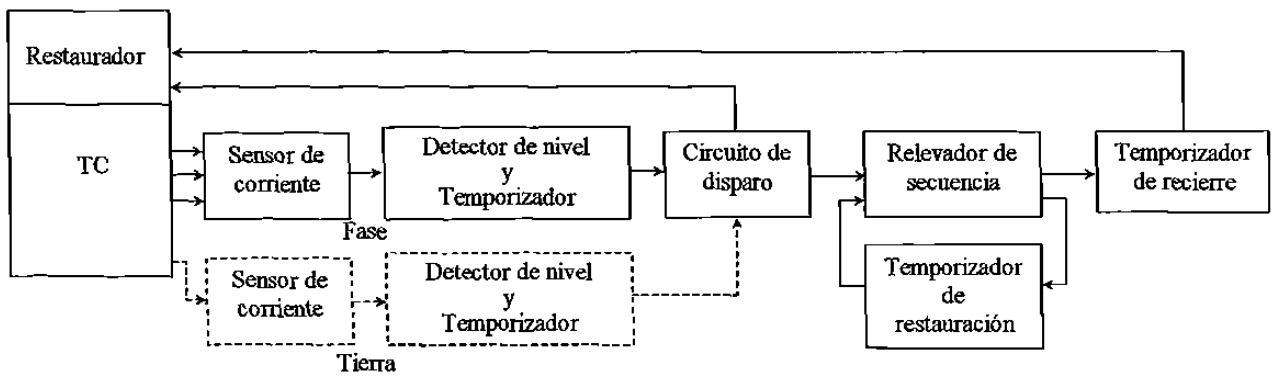


Fig. A.16. Diagrama de operación de un restaurador con control electrónico.

A.5 Seccionalizadores

El seccionalizador es un dispositivo de protección que aísla secciones falladas de líneas, y es usado en conjunción con un restaurador o un relevador. El seccionalizador no interrumpe corrientes de falla, cuenta el número de operaciones del dispositivo restaurador y abre mientras este dispositivo de respaldo este abierto. Esto permite que los dispositivos de respaldo operen para restaurar las secciones no falladas de la línea. Si la falla es temporal, el seccionalizador se restaurará después de un período de tiempo definido.

Un seccionalizador ofrece ventajas sobre los fusibles, en términos de seguridad y conveniencia. Después de una falla permanente, la capacidad de cierre en falla simplifica la verificación del circuito; si la falla está presente la interrupción toma lugar con seguridad por el dispositivo de respaldo. La línea puede ser verificada y restaurada en servicio con más velocidad y conveniencia.

A.5.1 Principio de operación de los seccionalizadores

Los componentes principales de un seccionalizador son sus contactos, un sistema de resortes controlados, un mecanismo de operación de solenoide inmersos en aceite y encerrados dentro de un tanque. El sistema de eslabón tiene una clavija y un nivel de disparo para disparar los contactos, se conecta en el mango de operación externo para operaciones manuales de restauración y disparo. La clavija puede ser cambiada para ofrecer uno, dos o tres operaciones. El esquema de un seccionalizador es mostrado en la Fig. A.17.

La función del solenoide se muestra en la Fig. A.18. La bobina del solenoide en serie con la línea conduce corriente de carga. Cuando una sobrecorriente ocurre, incrementa la fuerza magnética del solenoide desplazando el émbolo hacia abajo. Este desplazamiento provoca un flujo forzado de aceite en el espacio entre el émbolo y la válvula, al mismo tiempo el émbolo comprime el resorte de control, esta es la posición de disparo. Cuando la falla es interrumpida por el dispositivo de respaldo, la corriente disminuye y la fuerza

electromagnética de la bobina del solenoide disminuye; el émbolo es desplazado por la fuerza del resorte de control hacia arriba moviéndolo a su posición inicial. El aceite es forzado hacia la válvula a través de la válvula de bola hacia la parte inferior del émbolo para evitar el desplazamiento hacia abajo. Si la falla es temporal y es eliminada por el restaurador, el pistón se autoreposiciona. Si la falla no es temporal, el émbolo completa otro ciclo hasta que el pistón accione el sistema de disparo causando la apertura de los contactos. El número de operaciones es definido por la clavija de ajuste.

Debido a que no posee característica de operación tiempo-corriente, un seccionalizador tiene las siguientes ventajas: puede ser aplicado entre dos dispositivos con curvas de tiempo muy cerradas y puede ser usado para restaurar conexiones donde las magnitudes altas de corriente de falla impide la coordinación con fusibles.

Las desventajas son: costo, en muchas aplicaciones las ventajas del seccionalizador sobre los fusibles no justifica su costo; tiempo de memoria, la predicción precisa del tiempo de memoria resulta imposible para restauradores hidráulicos, un tiempo prolongado de memoria puede resultar en pérdida de coordinación durante fallas permanentes; corrientes de *inrush*, el problema consiste en que el seccionalizador es muy rápido y ve corrientes de *inrush* como corrientes de falla.

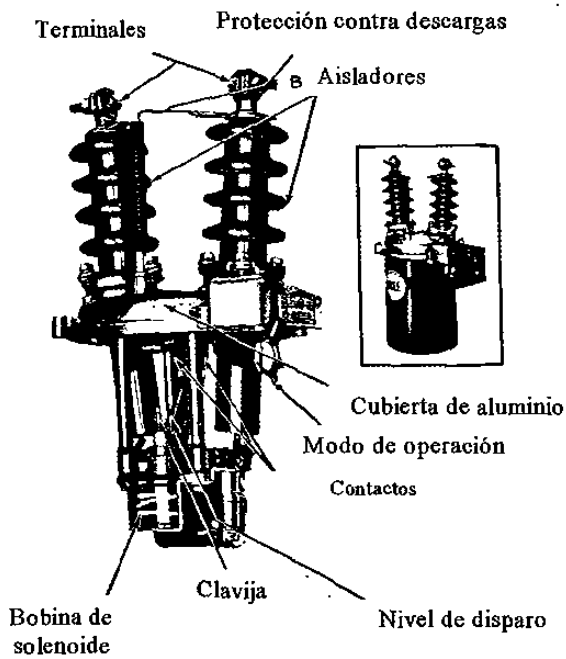


Fig. A.17. Esquema de un seccionalizador.

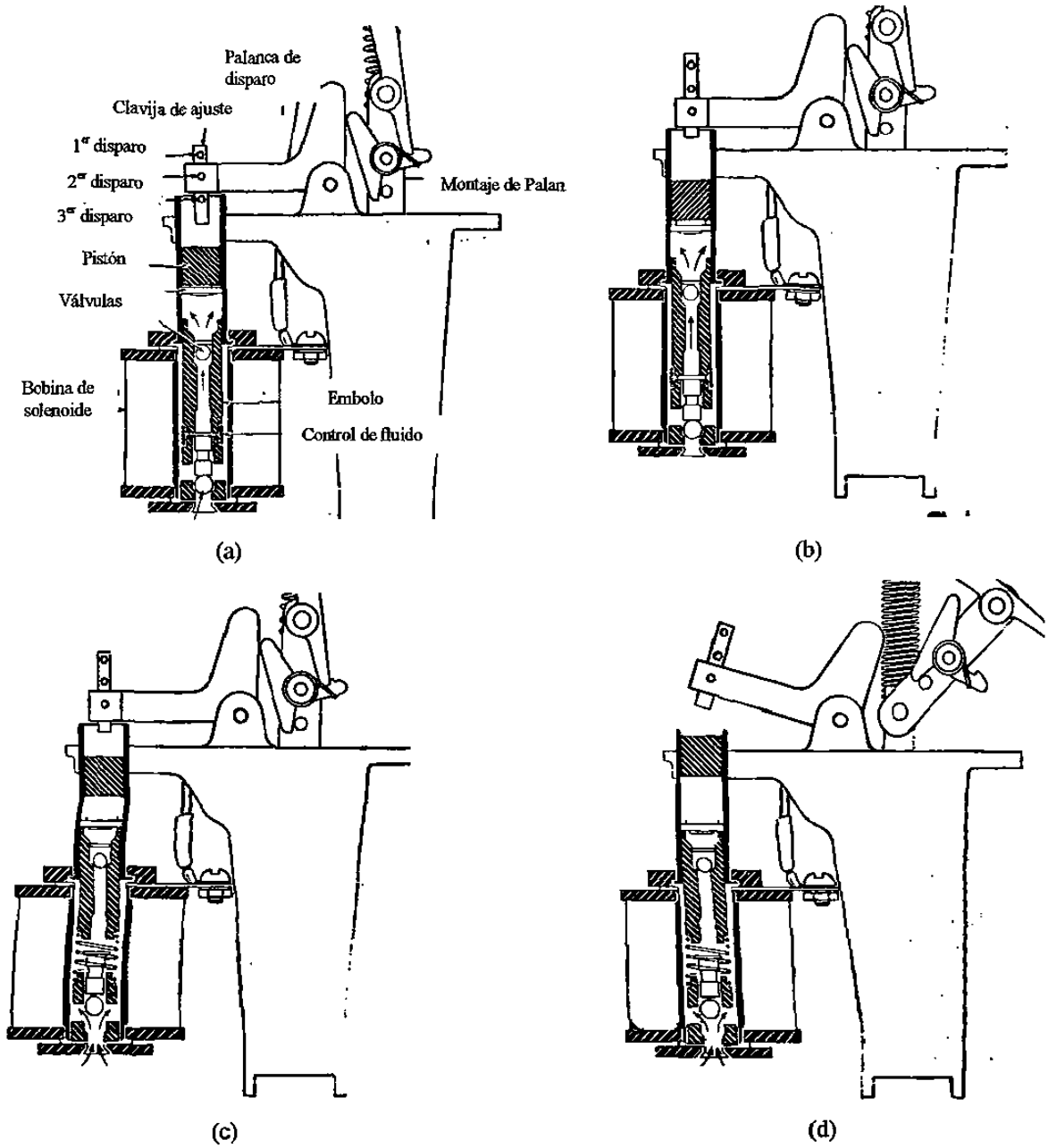


Fig A.18. Secuencia de operación de un seccionalizador: a) Partes principales, b) La fuerza magnética desplaza el embolo hacia abajo, c) El movimiento del embolo permite la carga de aceite en la cámara desplazando el pistón, d) El disparo es realizado después de 3 cargas sucesivas de aceite bajo la posición de disparo.

Los siguientes factores deben ser considerados en la aplicación de seccionalizadores: voltaje del sistema, máxima corriente de carga, máximo nivel de corriente de falla y la coordinación con otros dispositivos.

APÉNDICE B

ESTUDIO COMPARATIVO ENTRE LOS DETECTORES DE FALLA DE INCREMENTO DE CORRIENTE Y EL DETECTOR TRANSITORIO

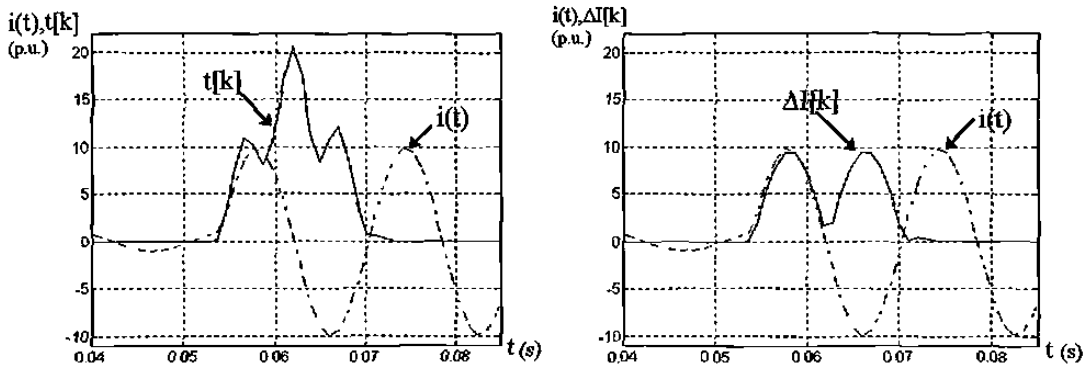
Un detector de fallas debe tener dos características fundamentales: a) suficiente sensibilidad para detectar fallas con corrientes reducidas, lo que implica valores altos de su señal de salida cuando la ventana de datos está cruzando por el instante de falla; b) inmunidad al ruido presente en la corriente de falla, lo que requiere una caída rápida a cero de su señal de salida cuando termina el cruce de la ventana. La comparación entre los dos detectores estudiados en este trabajo se hace sobre la base de estas dos características.

B1. Comparación de sensibilidad

Para analizar la sensibilidad de los detectores de fallas se estudió su comportamiento ante corrientes de falla de valores reducidos. La magnitud de la corriente de falla puede expresarse en por unidad con respecto a la corriente de prefalla a los efectos de este estudio. De la Fig. B1 a la Fig. B4 se presentan las salidas de ambos detectores para diferentes valores de corriente de falla sin componente aperiódica. Se utilizó el sistema eléctrico descrito en [26] para generar las señales de prueba. Se observa que, para todos los casos, la sensibilidad que ofrece el detector transitorio es mayor a la del detector de incremento de corriente, aún cuando en estas simulaciones se utilizó el Modelo 2 del detector, por las razones explicadas en [30]. Es conveniente observar que el detector transitorio es sensible incluso a fallas en que la corriente es de 1.1 p.u., es decir, es prácticamente igual a la de prefalla en magnitud. En este caso el detector transitorio está detectando fundamentalmente el cambio de ángulo de fase de la corriente.

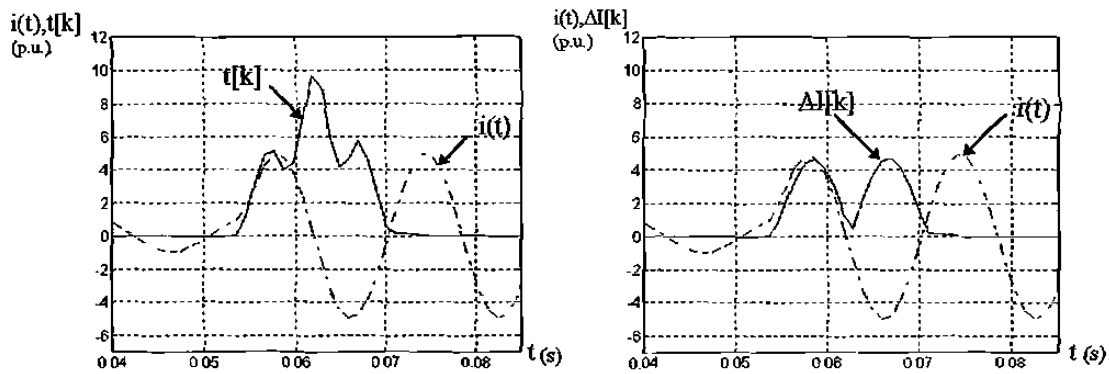
B2. Comparación de inmunidad al ruido

Esta comparación puede hacerse con referencia a la Fig. 4.2 y 4.5, que presentan las señales de salida de ambos detectores en presencia de corrientes de falla contaminadas con ruido. En la Fig. 4.2 se observa que el algoritmo de incremento de corriente es afectado por la componente aperiódica exponencial; esto genera dificultades para su aplicación en la lógica de operación del relevador adaptivo, ya que sería necesario esperar hasta que se desactive el detector para tomar determinadas decisiones lógicas. En la Fig. 4.5 se observa que el detector transitorio no presenta dificultades ante señales de corriente contaminadas y ofrece una respuesta con mejores características para su aplicación en el relevador adaptivo.



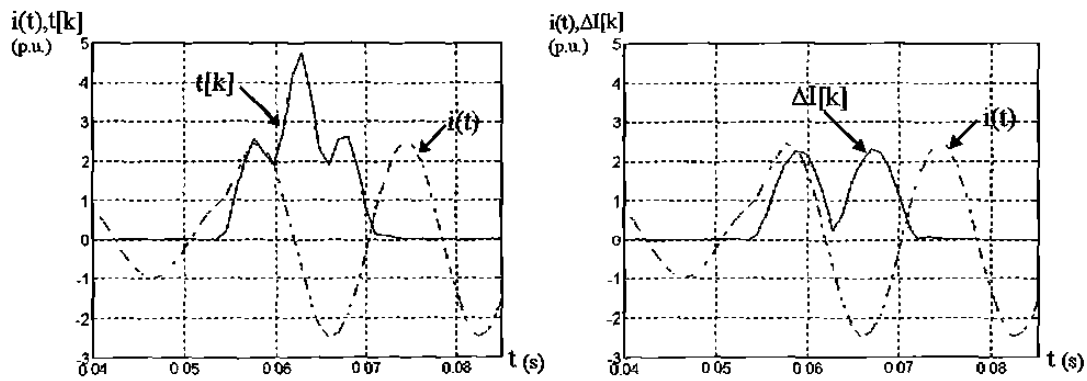
(a) (b)

Fig. B.1. Comparación de detectores de falla para I_{cc}=10 p.u.: a) detector transitorio; b) incremento de corriente.



(a) (b)

Fig. B.2. Comparación de detectores de falla para I_{cc}=5 p.u.: a) detector transitorio; b) incremento de corriente.



(a) (b)

Fig. B.3. Comparación de detectores de falla para I_{cc}=2.5 p.u.: a) detector transitorio; b) incremento de corriente.

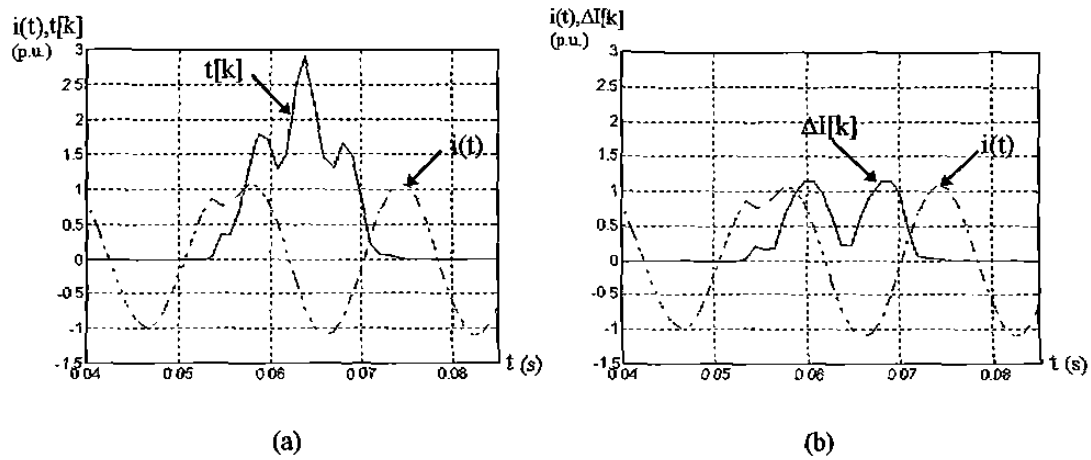


Fig. B.4. Comparación de detectores de falla para I_{cc}=1.1 p.u.: a) detector transitorio; b) incremento de corriente.

En este trabajo se utiliza un detector transitorio para la detección de fallas, presenta una alta sensibilidad para detectar fallas de baja corriente y no resulta afectado por la presencia de ruido en la corriente de falla. Su comportamiento es muy superior al del detector de incremento de corriente. Con este método puede detectarse tanto el inicio como el fin del cortocircuito, que son informaciones necesarias para la lógica de control de I_a.

APÉNDICE C

ALGORITMOS DE REGRESIÓN NO LINEAL

C1. Regresión polinomial

Para patrones de datos no lineales, el ajuste puede ser obtenido con modelos de líneas curvas. Una alternativa donde se conserva la integridad de los datos es ajustar con modelos de polinomios [57].

El procedimiento de mínimos cuadrados puede ser extendido para ajustar datos para un polinomio de grado *m*.

$$y = a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_m x^m + e \tag{C.1}$$

La suma de i=1 hasta el número de datos n del cuadrado del residual es:

$$Sr = \sum_{i=1}^{n} \left(y_i - \left(a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_m x^m \right) \right)^2 \tag{C.2}$$

Se toma la derivada con respecto a cada uno de los coeficientes del polinomio:

$$\frac{\partial Sr}{\partial a_0} = -2\sum \left(y_i - \left(a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_m x^m \right) \right)$$

$$\frac{\partial Sr}{\partial a_1} = -2\sum x_i \left(y_i - \left(a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_m x^m \right) \right)$$

$$\vdots$$

$$\frac{\partial Sr}{\partial a_m} = -2\sum x_i^m \left(y_i - \left(a_0 + a_1 x + a_2 x^2 + \cdots + a_m x^m \right) \right)$$

Estas ecuaciones pueden ser igual a cero y rearregladas para desarrollar el siguiente conjunto de ecuaciones normales:

$$a_0 n + a_1 \sum x_i + a_2 \sum x_i^2 + \cdots + a_m \sum x_i^m = \sum y_i$$

$$a_0 \sum x_i + a_1 \sum x_i^2 + a_2 \sum x_i^3 + \cdots + a_m \sum x_i^{m+1} = \sum x_i y_i$$

$$\vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots \qquad \vdots$$

$$a_0 \sum x_i^m + a_1 \sum x_i^{m+1} + a_2 \sum x_i^{m+2} + \cdots + a_m \sum x_i^{2m} = \sum x_i^m y_i$$

Las sumatorias son de i=1 hasta n. Las ecuaciones son lineales y tienen m+1 incognitas: $a_0, a_1, \cdots, a_m$. El problema de determinar polinomios por mínimos cuadrados de grado m es equivalente para resolver un sistema de m+1 ecuaciones lineales simultaneas.

El error de la regresión polinomial puede ser cuantificado por un error estandard del estimado.

$$S_{y/x} = \sqrt{\frac{Sr}{n-(m+1)}} \tag{C.3}$$

C2. Regresión no lineal

El ajuste de datos no lineales se logra con modelos en los cuales existe una dependencia no lineal en sus parámetros. La regresión no lineal se basa en la determinación de los parámetros que minimizan la suma de los cuadrados de los residuales. La solución debe proceder en un aspecto iterativo y su solución exitosa es altamente independiente de un buen punto inicial de los parámetros.

El método de Gauss Newton es un algoritmo de optimización utilizado para minimizar la suma de los cuadrados de los residuales entre datos y ecuaciones no lineales. Se utiliza la expansión de la serie de Taylor para expresar la ecuación original no lineal, en una forma lineal aproximada. Entonces la técnica de mínimos cuadrados puede ser usada para obtener nuevos estimados de los parámetros que se mueven en la dirección de minimización del residual.

Para ilustrar lo anterior, la relación entre la ecuación no lineal y los datos puede ser expresada en forma general como:

$$y_i = f(x_i; a_0, a_1, \cdots, a_m) + e_i \tag{C.6}$$

donde y_i valor medido de la variable dependiente, $f(x_i; a_0, a_1, \cdots, a_m)$ es la ecuación que esta en función de la variable independiente x_i y una función no lineal de los parámetros $a_0, a_1, \ldots, a_m$, y e_i es el error. En forma abreviada:

$$y_i = f(x_i) + e_i \tag{C.7}$$

El modelo no lineal puede ser expandido en serie de Taylor alrededor de los parámetros y reducido después de su primera derivada. Por ejemplo para el caso de dos parámetros,

$$f(x_i)_{j+1} = f(x_i)_j + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_0}\Delta a_0 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_1}\Delta a_1 + e_i \tag{C.8}$$

donde j es el valor inicial y j+1 es el valor predecido, Δa_0 y Δa_1 es la diferencia entre el valor inicial y el predecido para a_0 y a_1 respectivamente. El modelo linealizado con respecto a los parámetros:

$$y_i - f(x_i)_j = \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_0}\Delta a_0 + \frac{\partial f(x_i)_j}{\partial a_1}\Delta a_1 + e_i \tag{C.9}$$

En forma matricial:

$$\{D\} = [Z_j]\{\Delta A\} + \{E \tag{C.10}$$

En forma desarrollada:

$$\begin{Bmatrix} y_1 - f(x_1) \\ y_2 - f(x_2) \\ \vdots \\ y_n - f(x_n) \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\delta f_1}{\delta a_0} & \frac{\delta f_1}{\delta a_1} \\ \frac{\delta f_2}{\delta a_0} & \frac{\delta f_2}{\delta a_1} \\ \\ \frac{\delta f_n}{\delta a_0} & \frac{\delta f_n}{\delta a_1} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta a_0 \\ \Delta a_1 \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} e_0 \\ e_1 \end{Bmatrix} \tag{C.11}$$

El objetivo es resolver (C.10) para $\{\Delta A$ la cual es utilizada para recalcular los valores hacia el mínimo:

$$\Delta a_0 = a_{0,j+1} - a_{0,j}\ , \quad \Delta a_1 = a_{1,j+1} - a_{1,j} \tag{C.12}$$

El criterio de convergencia del proceso iterativo es definido hasta que (C.12) es menor a una tolerancia predefinida.

APÉNDICE D

CONSIDERACIÓN DEL INTERVALO DE COORDINACIÓN EN EL AJUSTE DE CURVAS

La pareja de valores tiempo-corriente de la característica de operación del dispositivo respaldado es usada para obtener la expresión analítica de un programa de ajuste de curvas; estos valores pueden ser proporcionados con información de la característica del dispositivo únicamente, o sumándole el intervalo de coordinación ΔT al tiempo de operación de la protección. La decisión de incluir o no este intervalo en la pareja de valores tiempo-corriente, debe evaluarse bajo la conveniencia de obtener expresiones analíticas más exactas de un programa de ajuste de curvas y en la reducción en la carga computacional durante la operación del relevador adaptivo.

El proceso de ajuste de curvas puede realizarse en dos variantes para el cumplimiento de (5.4): a) introducir el conjunto de valores tiempo-corriente del dispositivo respaldado en el programa de ajuste de curvas e incluir la expresión analítica resultante $F_{n-1}(I_k)$ en (5.7) o (5.10); y b) considerar la constante de coordinación (ΔT) en la pareja de valores tiempo-corriente para obtener la expresión analítica $F_{n-1}^{\Delta T}(I_k) = F_{n-1}(I_k) + \Delta T$ del relevador adaptivo directamente.

En las Secciones 5.4.4 a 5.4.7 y 5.4.8 se evalúo la primera variante para un conjunto de relevadores, fusibles y restauradores utilizando la función $T(I_k)$ y $H(I_k)$ respectivamente; en este apéndice se evalúa la segunda variante según (D.1) para los dispositivos seleccionados en la Sección 5.4.8. Se presenta un estudio comparativo de las dos alternativas para determinar la conveniencia de introducir la constante ΔT en el proceso de ajuste de curvas.

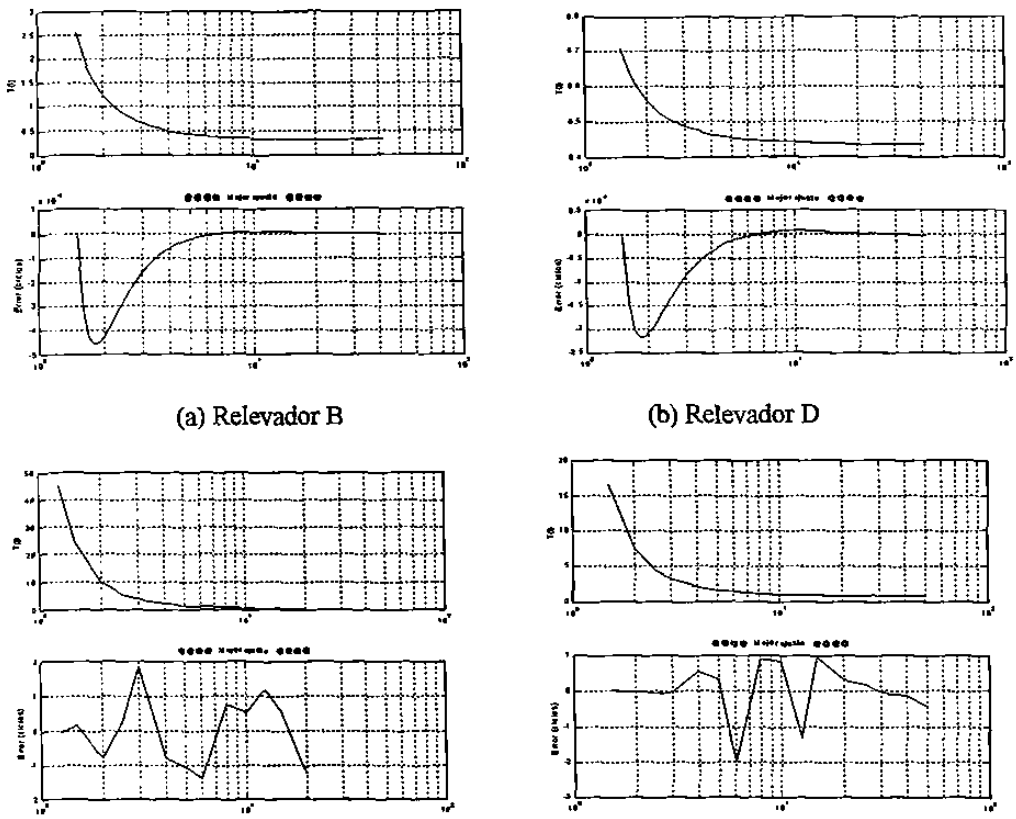
$$\Delta t \sum_{k=1}^{k_{op}} H_n(I_k) = H_n\left(I_{k_{op}}\right)\left[F_{n-1}^{\Delta T}\left(I_{k_{op}}\right)\right] \quad \text{ó} \quad \Delta t \sum_{k=1}^{k_{op}} \frac{1}{F_{n-1}^{\Delta T}(I_k)} = 1 \tag{D.1}$$

D1. Relevadores

En la Fig. D.1 se muestran los resultados obtenidos para la adaptación de $T(I_k)$ de los relevadores digitales B y D, y los relevadores electromecánicos J y K. En las Tablas D.1 y D.2 se muestran los índices estadísticos del ajuste de curvas. Se observa que se obtienen prácticamente los mismos resultados que los mostrados en la Sección 5.4.4 (Fig. 5.8, Tablas 5.1 y 5.2) excepto para la

ecuación (1) en el ajuste del relevador B, donde el error incluyendo ΔT es ligeramente peor; en general, las ecuaciones con los mejores ajustes fueron los mismos en ambos resultados.

En la Fig. D.2 se muestran los resultados gráficos y en las Tablas D.3. y D.4 los índices estadísticos para la función $H(I_k)$; los errores obtenidos en el ajuste de las curvas de los relevadores electromecánicos J y K fueron un 50% menores que los obtenidos en la Sección 5.4.8, y en general se mejoraron los índices estadísticos.



(a) Relevador B (b) Relevador D

(c) Relevador J (d) Relevador K

Fig. D.1. Ajuste para relevadores digitales y electromecánicos $T(I_k)$.

Tabla D.1. Resultados del ajuste de relevadores con ecuaciones exponenciales $T(I_k)$.

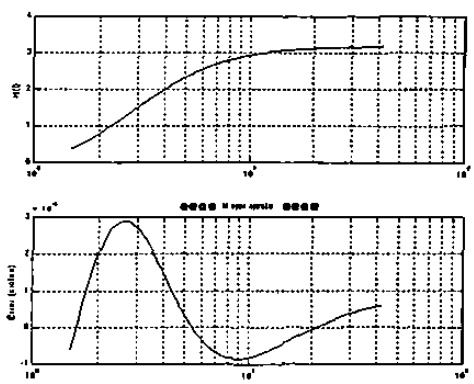
Relev.	Ecuación (1)				Ecuación (2)				Ecuación (3)			
	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ
B	3.147	0.758	0.257	0.67	000	000	000	000	0.034	-0.06	0.081	0.131
D	0.008	-0.042	0.017	0.034	000	000	000	000	000	-0.006	0.008	0.013
J	6.51	0.013	2.13	0.807	0.237	000	0.249	0.172	0.003	000	0.03	0.026
K	3.62	-0.219	0.675	0.528	0.028	000	0.078	0.05	0.003	000	0.038	0.021

Tabla D.2. Resultados del ajuste de relevadores con ecuaciones polinomiales $T(I_k)$.

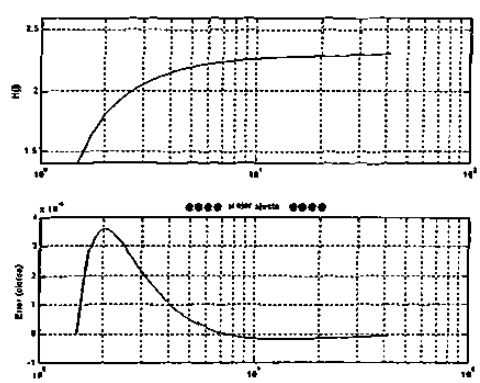
Relev.	Ecuación (6)				Ecuación (7)				Ecuación (8)			
	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ
B	1.819	-0.57	0.488	0.509	0.43	-0.29	0.216	0.247	209.15	19.46	5.547	7.23
D	0.007	0.03	0.04	0.038	0.003	-0.02	0.018	0.021	3.045	2.305	0.663	0.872
J	0.023	000	0.107	0.054	0.004	000	0.04	0.025	8.3e3	000	73.96	34.57
K	0.003	000	0.036	0.018	0.002	000	0.033	0.015	742.5	000	21.4	8.617

Tabla D.2. (Continuación)

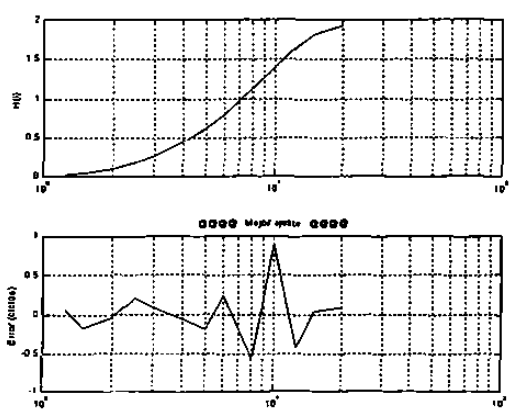
Relev.	Ecuación (9)			
	S	EMED	EMAX	σ
B	0.023	0.026	0.083	0.06
D	0.004	0.023	0.028	0.028
J	0.003	000	0.03	0.022
K	0.002	000	0.036	0.016



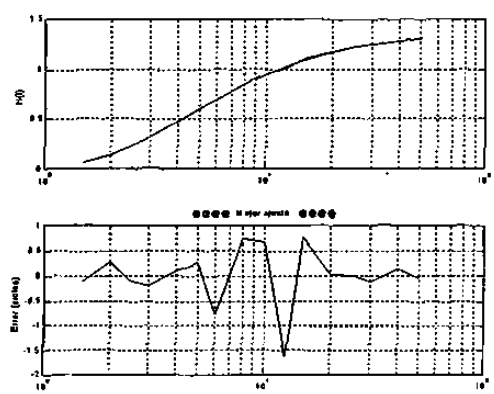
(a) Relevador B



(b) Relevador D



(c) Relevador J



(d) Relevador K

Fig. D.2. Ajuste para relevadores digitales y electromecánicos $H(I_k)$.

Tabla D.3. Resultados del ajuste de relevadores con ecuaciones exponenciales $H(I_k)$.

Relev.	Ecuación (1)				Ecuación (2)				Ecuación (3)			
	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ
B	6.26	-0.05	0.473	0.945	000	000	000	000	0.017	0.059	0.042	0.092
D	0.152	0.172	0.065	0.147	000	000	000	000	0.003	0.022	0.024	0.042
J	0.169	0.027	0.211	0.13	0.004	000	0.03	0.024	000	000	0.015	0.008
K	0.114	0.017	0.136	0.093	0.002	000	0.031	0.013	12.22	-0.738	1.307	1.23

Tabla D.4. Resultados del ajuste de relevadores con ecuaciones polinomiales $H(I_k)$.

Relev	Ecuación (6)				Ecuación (7)				Ecuación (8)			
	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ
B	1.2e3	59.6	10.92	11.94	1.671	0.506	0.188	0.43	45.31	4.98	1.62	2.243
D	205.5	28.137	0.752	4.77	2.01	0.737	0.284	0.473	3.86	2.243	0.552	0.654
J	Inf	Inf	Inf	Inf	000	000	0.013	0.007	1.27	000	0.45	0.325
K	1.6e6	-84.9	1.2e3	329.9	000	000	0.037	0.014	0.593	000	0.388	0.198

Tabla D.4. (Continuación)

Relev.	Ecuación (9)			
	S	EMED	EMAX	σ
B	0.084	-0.15	0.072	0.096
D	0.02	0.068	0.042	0.047
J	000	000	0.01	0.006
K	0.001	000	0.027	0.009

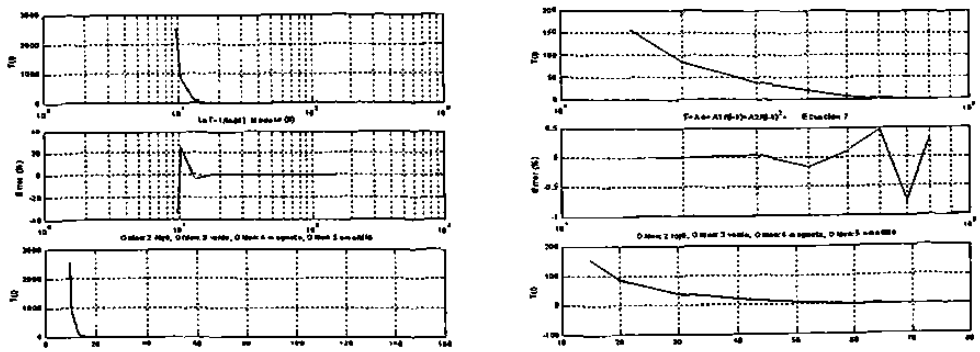
La variante de incluir ΔT en $T(I_k)$ no significó un cambio sustancial en los ajustes obtenidos, sin embargo no fue así para $H(I_k)$ donde se obtuvo una reducción en los errores de hasta un 50%.

D2. Fusibles

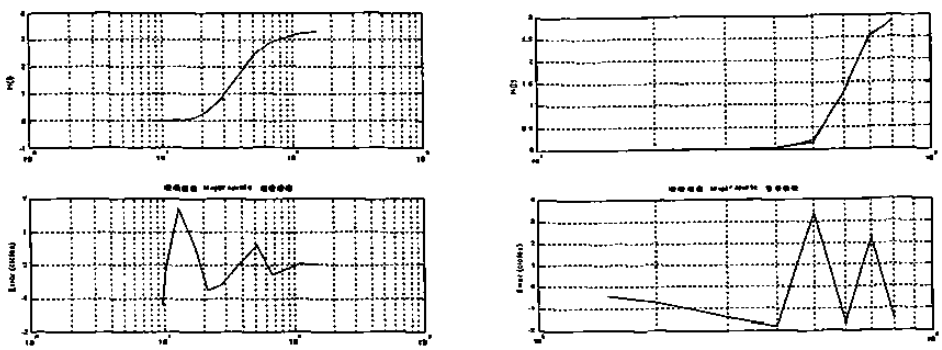
En la Fig. D.3 se muestran los resultados de los ajustes para los fusibles 1 y 2, tanto para la función $T(I_k)$ (Fig. D.3a) como para $H(I_k)$ (Fig. D.3b). Los resultados mostrados en las Tablas D.5 y D.6 para la función $T(I_k)$ presentan errores excesivamente grandes aunque con pequeña mejoría.

Los resultados obtenidos en el ajuste de los fusibles 1 y 2 para $H(I_k)$ son presentados en la Fig. D.3b y en las Tablas D.7 y D.8; se observa que el ajuste para el fusible 1 es menor con la

variante presentada en el presente Apéndice, pero es peor para el fusible 2, aunque la diferencia en los errores es de poca significancia.



(a) Fusible 1 y 2, función $T(I_k)$.



(b) Fusible 1 y 2, función $H(I_k)$.

Fig. D.3. Ajuste para fusibles 1, 2, a) función $T(I_k)$, b) función $H(I_k)$.

Tabla D.5. Resultados del ajuste de fusibles con ecuaciones exponenciales $T(I_k)$.

Fusible	Ecuación (1)				Ecuación (2)				Ecuación (3)			
	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ
1	7.2e5	57.48	555.2	321.8	5.9e6	000	2.1e3	1.0e3	3.7e6	0.537	1.6e3	1.3e3
2	140.59	1.61	6.88	5.30	3.2e3	8.27	31.52	32.77	19.713	000	2.57	Inf

Tabla D.6. Resultados del ajuste de fusibles con ecuaciones polinomiales $T(I_k)$.

Fusible	Ecuación (6)				Ecuación (7)				Ecuación (8)			
	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ
1	1.8e3	-1.219	34.52	21.3	1.4e4	000	69.89	60.92	1.3e6	000	615.40	589.06
2	36.37	0.14	5.0	4.26	0.957	000	0.767	0.691	1.0e3	000	20.77	23.34

Tabla D.6. (Continuación)

Fusible	Ecuación (9)			
	S	EMED	EMAX	σ
1	9.7e4	000	187.48	155.87
2	1.77	0.001	0.944	0.942

Tabla D.7. Resultados del ajuste de fusibles con ecuaciones exponenciales $H(I_k)$.

Fusible	Ecuación (1)				Ecuación (2)				Ecuación (3)			
	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ
1	3.16	0.117	0.893	0.672	000	000	0.03	0.026	0.01	0.009	0.156	0.092
2	0.67	0.048	0.548	0.366	0.66	000	0.519	0.469	16.18	-0.83	2.86	Inf

Tabla D.8. Resultados del ajuste de fusibles con ecuaciones polinomiales $H(I_k)$.

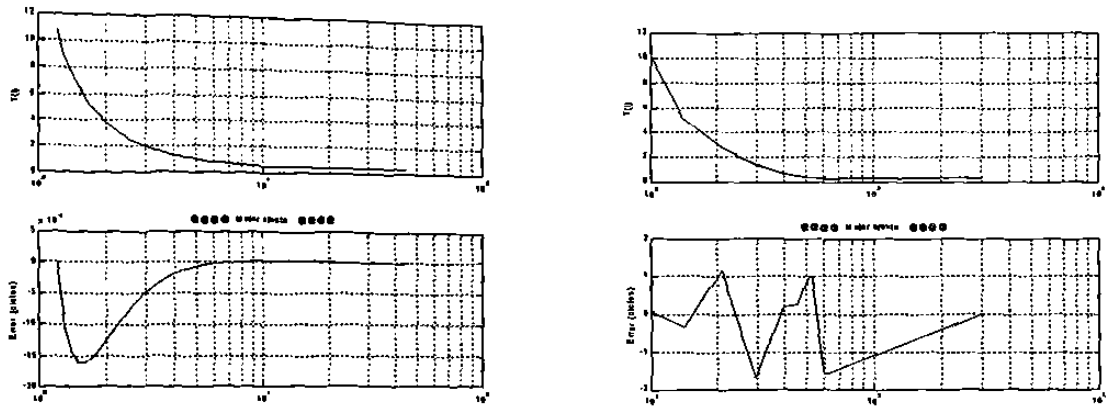
Fusible	Ecuación (6)				Ecuación (7)				Ecuación (8)			
	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ
1	1.4e12	-1.2e5	1.2e6	4.0e5	000	000	0.028	0.013	0.35	000	0.517	0.196
2	1.3e6	-148.0	1.1e3	445.4	0.024	000	0.105	0.059	5.36	000	0.456	0.276

Tabla D.8. (Continuación)

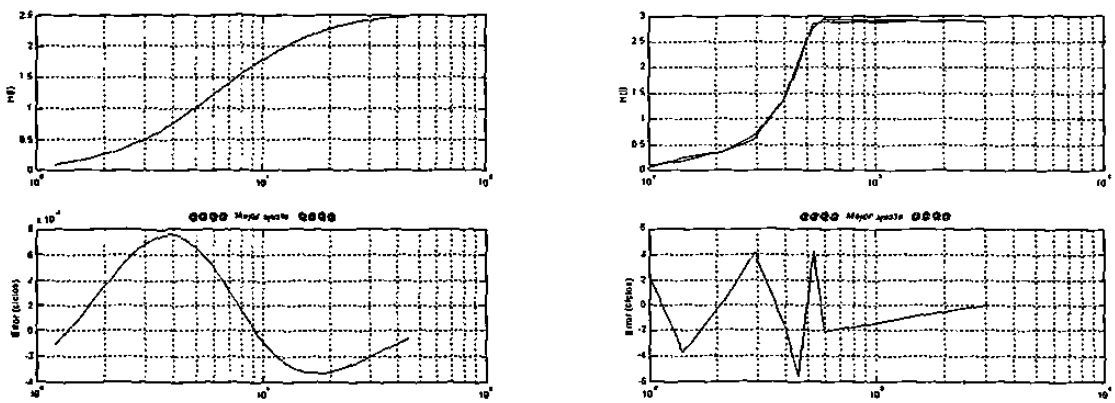
Fusible	Ecuación (9)			
	S	EMED	EMAX	σ
1	0.01	000	0.056	0.03
2	0.106	000	0.215	0.123

D.3 Restauradores

Los resultados gráficos y estadísticos del ajuste de curvas efectuado a los restauradores 1 y 3 son mostrados en la Fig. D.4 y en las Tablas D.9 y D.10 respectivamente. El ajuste obtenido para la función $T(I_k)$ no presenta una diferencia significativa respecto a los resultados presentados en la Seccion 5.4.7. Para la función $H(I_k)$ (Tablas D.11 y D.12) el ajuste para el restaurador presenta una mejora poco significativa, pero para el restaurador 3 el error máximo obtenido pasa de 200 a 4 ciclos, sin embargo el mejor ajuste para el restaurador 3 es el obtenido con la función $T(I_k)$.



(a) Restaurador 1 y 3, función $T(I_k)$.



(b) Restaurador 1 y 3, función $H(I_k)$

Fig. D.4. Ajuste para restauradores 1 y 3, a) función $T(I_k)$, b) función $H(I_k)$.

Tabla D.9. Resultados del ajuste de restauradores con ecuaciones exponenciales.

Restaurador	Ecuación (1)				Ecuación (2)				Ecuación (3)			
	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ
1	27.45	-2.13	1.93	1.98	000	000	000	000	0.129	-0.131	0.14	0.254
3	0.242	-0.018	0.326	0.186	90.11	000	7.83	4.24	0.031	000	0.091	0.124

Tabla D.10. Resultados del ajuste de restauradores con ecuaciones polinomiales.

Restaurador	Ecuación (6)				Ecuación (7)				Ecuación (8)			
	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ
1	342.06	-6.75	8.97	8.27	25.60	-2.23	1.79	1.91	1.7e4	204.15	49.56	66.52
3	0.015	-0.001	0.087	0.055	0.008	000	0.063	0.044	0.791	000	0.733	0.336

Tabla D.10. (Continuación)

Restaurador	Ecuación (9)			
	S	EMED	EMAX	σ
1	56.71	-3.28	2.73	2.84
3	0.002	000	0.028	0.024

Tabla D.11. Resultados del ajuste de restauradores con ecuaciones exponenciales.

Restaurador	Ecuación (1)				Ecuación (2)				Ecuación (3)			
	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ
1	7.76	0.751	0.409	1.05	000	000	000	000	000	0.01	0.005	0.013
3	6.16	0.061	1.067	0.938	1.292	0.002	0.5	0.508	38.65	-1.601	2.9	4.396

Tabla D.12. Resultados del ajuste de restauradores con ecuaciones polinomiales.

Restaurador	Ecuación (6)				Ecuación (7)				Ecuación (8)			
	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ	S	EMED	EMAX	σ
1	4.2e9	-7.6e3	6.4e4	2.1e4	0.184	-0.209	0.083	0.143	39.67	3.07	1.063	2.09
3	7.2e3	-8.366	85.166	28.41	0.027	000	0.091	0.054	0.144	000	0.182	0.126

Tabla D.12. (Continuación)

Restaurador	Ecuación (9)			
	S	EMED	EMAX	σ
1	0.445	-0.266	0.093	0.222
3	0.155	000	0.206	0.131

D.4 Observaciones

La variante de incluir o no la constante de intervalo de coordinación ΔT en la pareja de valores tiempo-corriente del dispositivo respaldado, para obtener la expresión analítica de la característica de operación, presenta un comportamiento variable en el ajuste de curvas en términos generales, aunque se observó poca influencia en los resultados obtenidos con la función $T(I_k)$ y mucha influencia con la función $H(I_k)$. En los casos analizados se presentó una mejora en el ajuste obtenido para los relevadores; para los fusibles 1 y 2 se presentó un ajuste mejor y peor respectivamente; en el caso de los restauradores, se mejoró el error en el ajuste obtenido con $H(I_k)$ pero no tanto como el mejor ajuste obtenido con la función $T(I_k)$.

De los resultados observados se confirma que el ajuste es altamente dependiente de la curva analizada. Los resultados obtenidos sin la inclusión de ΔT son lo suficientemente exactos para ser implementados. Este comportamiento se observó en una muestra selectiva de características de operación únicamente.

La inclusión de ΔT representa un incremento en la carga computacional del relevador durante el proceso de integración durante un estado dinámico. Para efectos de implementación y de acuerdo a los resultados obtenidos previamente, se recomienda realizar el ajuste de curvas con la variante de incluir ΔT para reducir la carga computacional del relevador; la adición de este factor de coordinación se realiza en el algoritmo de ajuste de curvas y es transparente para el usuario. Se recomienda mantener la alternativa de ajuste sin ΔT, como algoritmo de reserva en caso de no cumplir con los criterios mínimos de error establecidos en el presente trabajo para el ajuste de curvas.