



BUAP

BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA

Facultad de Ingeniería.

Secretaría de Investigación y Estudios de Posgrado.

**ALGORITMO PARA EL REAJUSTE DE
PROTECCIONES POR CAMBIO DE TOPOLOGÍA
DE RED DE MEDIA TENSIÓN**

TESIS

Que para obtener el grado de
MAESTRO EN INGENIERÍA
CON OPCIÓN TERMINAL EN SISTEMAS ELÉCTRICOS DE POTENCIA

Presenta:

MARCO FELIPE TAPIA CABALLERO

Asesor de tesis:

M.C. Carlos Morán Ramírez

Puebla, Pue.

Septiembre 2016



BUAP

OFICIO SIEP No. 2200/ 2016

ING. MARCO FELIPE TAPIA CABALLERO
Maestría en Ingeniería, Opción terminal Sistemas
Eléctricos de Potencia
Presente.

El suscrito M.I. Fernando Daniel Lazcano Hernández, Director de la Facultad de Ingeniería, de acuerdo a su solicitud de aprobación de Tema de Tesis, le autoriza desarrollar el tema intitulado: **"ALGORITMO PARA EL REAJUSTE DE PROTECCIONES POR CAMBIO DE TOPOLOGÍA DE RED DE MEDIA TENSIÓN"**, para obtener el grado de Maestro en Ingeniería con opción terminal en Sistemas eléctricos de potencia. Asignándose como Asesor de tesis al M.C. Carlos Morán Ramírez

Sin otro particular, reciba un cordial saludo:

ATENTAMENTE

"Pensar bien, para vivir mejor"

Puebla, Puebla, a 20 de septiembre de 2016

M.I. FERNANDO DANIEL LAZCANO HERNÁNDEZ
Director de la Facultad de Ingeniería



C.c.p. M.C. Carlos Morán Ramírez. Asesor de Tesis.
C.c.p. Archivo.

ABH/GCC/dsm.

CA

60
AÑOS DE
AUTONOMÍA
UNIVERSITARIA

Facultad
de Ingeniería

Bvd. Valsequillo y Av. San Claudio
sin, edif. ING 4, Col. San Manuel,
Ciudad Universitaria,
Puebla, Pua. C.P. 72570
01 (222) 229 55 00 Ext. 7610

Asunto: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN

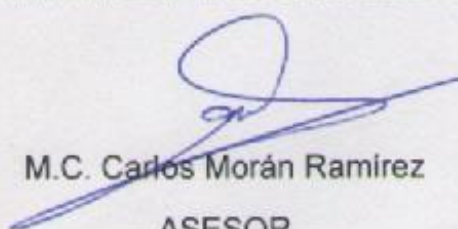
M.I. FERNANDO DANIEL LAZCANO HERNÁNDEZ
DIRECTOR DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA DE
LA BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA
PRESENTE:

El suscrito: **M.C. Carlos Morán Ramírez**, asesor del Tema de Tesis denominado: **"ALGORITMO PARA EL REAJUSTE DE PROTECCIONES POR CAMBIO DE TOPOLOGÍA DE RED DE MEDIA TENSIÓN"**, presentado por el C. MARCO FELIPE TAPIA CABALLERO, pasante de la Maestría en Ingeniería, opción terminal Sistemas Eléctricos de Potencia, me permito informar a usted que **después de haber revisado cuidadosamente el contenido temático, la metodología, la redacción y la ortografía** de la Tesis, no tengo inconveniente en autorizar la impresión de la misma.

Así mismo, solicito tenga a bien autorizar el Jurado para su Examen Profesional.
Lo hago de su conocimiento para los efectos legales a que haya lugar.

ATENTAMENTE

Puebla, Pue., 18 de Julio de 2016



M.C. Carlos Morán Ramírez
ASESOR

C.c.p.- Exámenes Profesionales

Interesado

Archivo

CMR

AGRADECIMIENTOS

A Dios por darme la oportunidad de seguir progresando académicamente.

A mi madre, la Profra. Dulce María Judith, que ha sido siempre mi ejemplo de superación, gracias a sus enseñanzas, convicciones y buen liderazgo desde mi infancia.

A mis amigos del trabajo y escuela por compartir conmigo tristezas y alegrías.

Al M.C. Carlos Morán Ramírez por orientarme y mantenerme motivado en la realización de este proyecto.

ÍNDICE

AUTORIZACIÓN DE TEMA Y DE IMPRESIÓN DE TESIS	I
AGRADECIMIENTOS.....	III
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1- PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.3 OBJETIVO.....	5
1.3.1 OBJETIVOS PARTICULARES.....	5
1.4 HIPÓTESIS	5
1.5 VARIABLES.....	5
CAPÍTULO II.- MARCO DE REFERENCIA.....	6
2.1 MARCO HISTÓRICO	6
2.2 MARCO TEÓRICO.....	6
2.2.1 ESTADOS POSIBLES DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN	7
2.2.2 EL CONCEPTO DE RECONFIGURACIÓN	8
2.2.3 EL CONCEPTO DE RESTABLECIMIENTO	11
CAPÍTULO III. PROTECCIONES Y AUTOMATIZACIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN..	12
3.1 PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTE	12
3.1.1 PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTE INSTANTÁNEAS.....	12
3.1.2 PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTE DE TIEMPO DEFINIDO.....	12
3.1.3 PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTE DE TIEMPO INVERSO.....	13
3.1.4 RELEVADORES DIRECCIONALES DE SOBRECORRIENTE.....	14
3.2 COORDINACIÓN EN CIRCUITOS RADIALES	14
3.2.1 RESTAURADORES	15
3.2.2 FUSIBLES DE DISTRIBUCIÓN.....	16
3.2.3 COORDINACIÓN DE FUSIBLES, RESTAURADORES Y RELEVADORES.....	17
3.2.3.1 COORDINACIÓN RELEVADOR-RELEVADOR.....	17
3.2.3.2 COORDINACIÓN RELEVADOR-RESTAURADOR.....	17
3.2.3.3 COORDINACIÓN RESTAURADOR-RESTAURADOR	17
3.2.3.4 COORDINACION RELEVADOR-FUSIBLE.....	18

3.3 AUTOMATIZACIÓN EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN	19
3.3.1 AUTOMATISMO CENTRALIZADO.....	21
3.3.2 AUTOMATISMO DESCENTRALIZADO.....	21
3.3.2.1 FUNCIÓN DE CIERRE POR PÉRDIDA DE POTENCIAL.....	21
3.3.2.2 FUNCIÓN DE BAJO VOLTAJE.....	22
3.3.2.3 BIDIRECCIONALIDAD.....	22
3.3.2.4 EJEMPLO DE AUTOMATISMO DESCENTRALIZADO	22
CAPÍTULO IV.- MARCO METODOLÓGICO	24
4.1 ALGORITMO PARA EL REAJUSTE DE PROTECCIONES.....	24
4.1.1 PROPÓSITO	24
4.1.2 ALCANCE Y LIMITACIONES	26
4.1.3 LÓGICA DEL ALGORITMO.....	27
4.1.3.1 FORMATO DE LOS ARCHIVOS DE ENTRADA PARA LA EJECUCIÓN DEL ALGORITMO.....	33
4.1.4 RED DE ESTUDIO	35
4.1.5 AJUSTE DE PROTECCIONES.....	36
CAPÍTULO V.- ANÁLISIS Y VALIDACIÓN DE RESULTADOS.....	38
5.2 EJEMPLO 1, RESPALDOS DEL CIRCUITO DE LA SUBESTACIÓN 1.....	38
5.3 EJEMPLO 2, RESPALDOS PARCIALES.....	50
CAPÍTULO VI.- CONCLUSIONES	59
LISTADO DE FIGURAS	63
BIBLIOGRAFÍA.....	65
ANEXO 1 CURVAS DE COORDINACIÓN DE FUSIBLES	66
ANEXO 2 CÓDIGO DEL ALGORITMO	71

INTRODUCCIÓN

El concepto de redes de distribución es algo que se actualiza día a día, los avances tecnológicos han dado lugar a la instalación de restauradores electrónicos sobre la trayectoria de los circuitos de media tensión para la protección al ocurrir fallas en la red; Otras propuestas plantean esquemas centralizados o descentralizados en los cuales, dichos equipos se comunican o coordinan para adquirir información y así ayudar en la toma de decisiones al operador de la red.

El ritmo de trabajo para los transformadores en una subestación de distribución es desgastante, ya que están sometidos a trabajar todos los días del año las 24 horas, excepto por un lapso de tiempo en las que se realiza su libranza para mantenimiento y pruebas eléctricas. Por la configuración radial que siempre han tenido las redes de distribución, una salida de este elemento por falla (ya sea externa o interna), generalmente conlleva afectaciones a gran escala directamente en los procesos cotidianos de la sociedad, estas discontinuidades en el servicio pudieran ser sobre colonias, poblaciones, zonas turísticas, parques industriales o amplias zonas geográficas en la ciudad.

La versatilidad que dan los equipos electrónicos en la red, hacen que la configuración radial típica sea algo que se pueda cambiar en cuestión de minutos e incluso segundos, ya sea para mejorar algún perfil de voltaje, por maniobras en contingencia o libranza de algún equipo primario en alguna subestación. El gran reto hoy en día es integrar todos estos equipos y utilizarlos coordinadamente para optimizar resultados.

Este proyecto presenta un programa realizado en Matlab, el cual al ejecutarse una reconfiguración en la red, éste realiza un reajuste en las protecciones en los equipos de distribución asegurando su coordinación.

Se realizan simulaciones de todas las diferentes configuraciones posibles para un estado de la red de prueba establecida.

CAPÍTULO 1- PROTOCOLO DE INVESTIGACIÓN

1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Para cumplir el propósito de llevar energía eléctrica a los diferentes sectores de la población, se llevan a cabo los procesos de generación, transmisión y distribución. En la parte de distribución, una falla se traduce en interrupción de la continuidad del servicio a los usuarios que están conectados a esta red; esto, debido a la configuración radial de la carga que presentan, a diferencia de la usada en transmisión donde se prefiere una configuración en anillo. [1] El tiempo de afectación de la carga depende de la rapidez y efectividad con la que el operador de la red aplique el procedimiento de maniobras de restablecimiento establecido. Sin embargo, dicho restablecimiento puede cambiarse justificadamente, incluso tratándose de la misma falla, si se suscitara en un escenario diferente de la red, en el cual están presentes variables que en la mayoría de los casos, no son controlables directamente como: gravedad de la falla, horario la misma y extensión de ésta, tamaño de la carga afectada, capacidad de los transformadores cercanos que puedan respaldar la carga, número de equipos de respaldo disponibles y ampacidad del conductor de los circuitos de respaldo. Cualquier variación de la topología de red, ya sea por contingencia o por mantenimiento, implica una alteración en los sentidos de la corriente y por ende un cambio en el ajuste de la protección de sobrecorriente, además de que, todos los equipos están coordinados a su vez con otros delante y detrás de estos. Por lo que se necesita un estudio completo para todos los casos posibles en las reconfiguraciones.

El presente trabajo, establece un algoritmo que basado en un estudio de protecciones previos de una red, realiza una adaptación en el grupo de ajustes de cada equipo, para conservar la coordinación de protecciones por el cambio en la topología de la red.

1.2 JUSTIFICACIÓN

Los movimientos en la red de distribución pueden deberse a varios casos, por ejemplo: respaldar carga al tratar una falla, transferencia por mantenimiento a un transformador o interruptor en la subestación, transferencia de carga por cambio de conductor en la trayectoria de un circuito, inhibición de protecciones por trabajos sobre algún equipo de la red, entre otras. Para cada uno de estos sucesos, pueden presentarse diferentes condiciones si es que algún transformador, no está disponible en esos momentos para respaldar carga, algún enlace no esté habilitado por estar fallado, exista una libranza de interruptor en una subestación de respaldo en esos momentos, transferencia de carga a otro circuito por mantenimiento programado y finalmente combinaciones de todas estas, ello hace menos predecible la forma final que tendrá la red después de realizar movimientos.

Generalmente todas las protecciones del circuito están coordinadas con el equipo detrás y delante de ellas, el objetivo es asegurar que ante una falla, se seccione únicamente el tramo de línea que presenta el desperfecto, también puede haber un ajuste de direccionalidad previendo el caso de un cambio de flujo, sin embargo, existen casos en los cuales dichos preajustes no aseguran la coordinación entre estos, como ejemplo observe los casos en la siguiente figura:

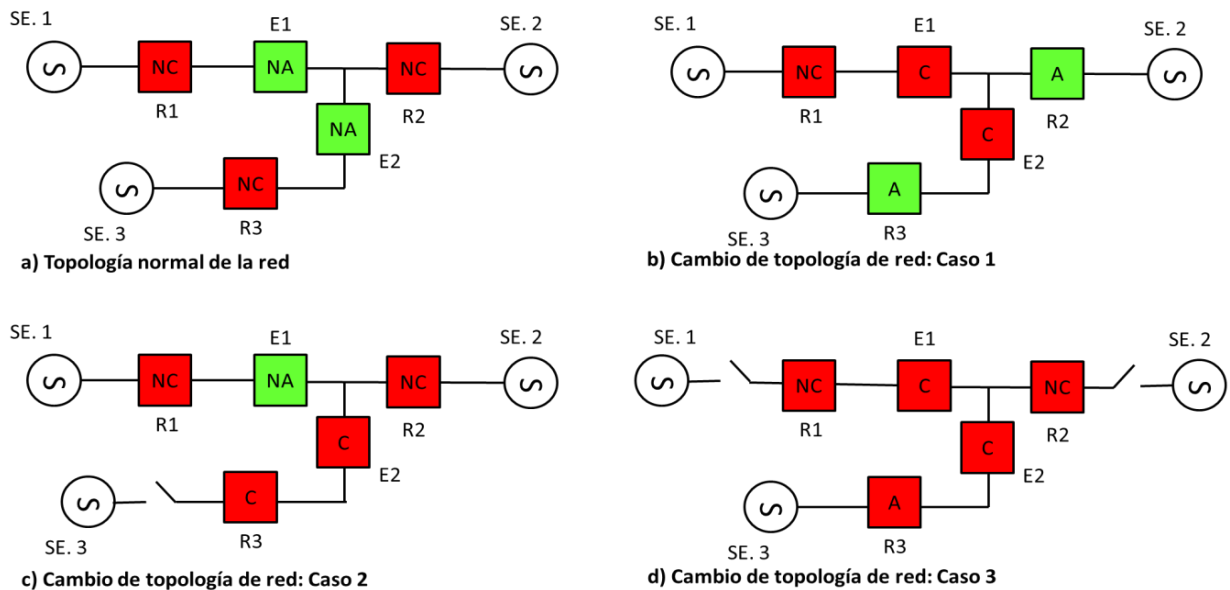


Figura 1.1. Cambios topológicos en una red de distribución

En el inciso “a” de la figura 1.1. se observa el ejemplo de una red en condiciones normales, para ajustar los elementos de protección de esta red se necesita un estudio de coordinación, dependiente de las marcas en la actualidad, cada equipo tiene 4 grupos de ajustes pero, restrictivamente sólo puede operar con uno seleccionado, de esta manera los enlaces únicamente tendrán un grupo de ajustes para cada lado, no obstante, esto es insuficiente ya que existen múltiples combinaciones que modifican la topología de la red, vea los incisos del b, c y d en los cuales la configuración de la red cambia significativamente a la original. El problema aquí radica en que estas variaciones generalmente son temporales, ya sea por contingencia o por transferencia de carga de alguna libranza, aun así, el tiempo en el que la red se encuentra en estas condiciones puede presentarse una falla, ya sea transitoria o permanente en la cual se afecte más del tramo que debería ser librado. Otra problemática radica cuando algún personal requiera entrar a trabajar con la línea energizada ya que típicamente el recierre de la protección próxima debe bloquearse para evitar que en caso de una mala maniobra ésta realice recierres, pero al no haber coordinación por cambio de topología de la red es complejo determinar el recierre de que protección se debe bloquear ya que tardaría varios minutos el realizar el análisis detallado del nuevo escenario.

De esta manera sería de gran ayuda, un programa que al ejecutarse un cambio de topología en la red, automáticamente reajuste las protecciones del circuito de distribución.

El presente trabajo, expone un algoritmo realizado en Matlab, el cual basado en un estudio de protecciones, realiza el cambio de grupo de ajustes de cada equipo conservando la coordinación para cada caso.

1.3 OBJETIVO

Desarrollar un algoritmo que al realizar una re-configuración en una red de prueba propuesta, cambie los ajustes de las protecciones instaladas en los circuitos asegurando así su coordinación.

1.3.1 OBJETIVOS PARTICULARES

Diseñar un sistema eléctrico de pruebas, que contenga los elementos básicos presentes en una red de distribución y en la cual se puedan mostrar diferentes configuraciones topológicas.

Realizar un análisis de protecciones para cada caso, con el objetivo de homologar valores de Pick up para las protecciones de sobrecorriente de los circuitos.

Desarrollar un algoritmo en Matlab, que una vez hecha la transferencia de carga verifique y cambie si es necesario el grupo de ajuste de las protecciones de los dispositivos instalados en la red para preservar su coordinación.

Realizar simulaciones de transferencias en base al algoritmo diseñado para demostrar que su implementación, deja en modo seguro la red de distribución para la condición posterior a la transferencia.

1.4 HIPÓTESIS

Aplicando el algoritmo desarrollado en el presente trabajo, cuando se origine una reconfiguración de la red de prueba, se modificarán los grupos de ajustes en las protecciones, para que se tenga una coordinación adecuada evitando así posteriores afectaciones por otras fallas y asegurando la integridad del personal que pueda trabajar en las líneas energizadas durante el tiempo que se conserva esta configuración.

1.5 VARIABLES

Dependientes: Tiempo de libramiento de la falla, grupos de ajustes disponibles, tiempo de restablecimiento parcial, tiempo de restablecimiento total, porcentaje de carga transferida o respaldada, coordinación de protecciones después del restablecimiento

Independientes: Corrientes de falla, naturaleza de la falla, causa de la falla, enlaces disponibles.

CAPÍTULO II.- MARCO DE REFERENCIA

2.1 MARCO HISTÓRICO

La topología de un sistema eléctrico de distribución es descrita desde hace tiempo por la conexión de troncales y ramales en cada uno de los circuitos de distribución. Los elementos principales hasta la actualidad están formados por transformadores de potencia, líneas de distribución, cables de distribución, barras para los buses de la subestación, interruptores de circuito, restauradores, transformadores de instrumento, seccionadores, reguladores de voltaje y aisladores. Aunque los componentes sean conectados de tal manera que formen lazos cerrados ocasionalmente, se pretende que los sistemas de distribución operen de forma radial con la finalidad de simplificar su operación y coordinación de protecciones [1].

2.2 MARCO TEÓRICO

El eslabón con el usuario en un sistema eléctrico de potencia es el sistema de distribución, sin embargo, se ha observado a lo largo del tiempo que la mayoría de los grandes cambios en diseños y operación, se realizan en las etapas de transmisión, generación y subtransmisión, esto se debe a la importancia de los elementos aunque en la actualidad con la tendencia que se tiene a la automatización en distribución y con el auge de nuevos dispositivos electrónicos, se ha vuelto más dinámica la operación de las redes de distribución.

Un sistema de distribución básicamente, consiste en un subsistema de media tensión con una estructura arbolada con diferentes puntos de suministro a otros de menor voltaje o baja tensión. Pese a que el sistema de distribución esté bien diseñado, siempre estará sujeto a fallas, debido a que hay algunas de naturaleza ajena al propio funcionamiento del sistema o causas externas.

Para mantener la continuidad y confiabilidad de un sistema de distribución es necesario restaurar el servicio para los consumidores, en el menor tiempo posible al presentarse una falla ya sea transitoria o permanente, este criterio de suficiencia esta aunado a la misión de la empresa que se encarga del administrar el servicio de energía eléctrica en la República Mexicana [2].

Las redes de distribución eléctrica, típicamente se gestionan a través de un centro de control, realizando así una supervisión del comportamiento del SED. El manejo de las redes por medio de estos centros facilita la atención de fallas, su aislamiento y restauración del sistema reduciendo así el tiempo de interrupción del servicio a los consumidores, lo cual le da un plus a la calidad en el suministro energético.

Los centros de control generalmente cuentan con una infraestructura de adquisición de datos y procesamiento de información ligada a la topología de la red de distribución, además de voltajes nodales y niveles de carga en alimentadores, entre otros datos. Así, el operador del sistema tiene desde el centro de control una mayor capacidad de toma de decisiones y facilidad de envío de señales de apertura o cierre de interruptores para la restauración del servicio, en esta entidad se toman varias decisiones operativas, pero su función más valiosa es la restauración de carga ante contingencias en la red.

Si se suscitara una falla en la red de distribución, el operador del centro de control se encargara que las secciones de carga no falladas queden energizadas, si la falla fuera permanente, el operador tendría que realizar movimientos en la red, es decir; reconfigurar el sistema de distribución para la atención de la falla quedando en estado de emergencia, esta es una de varias causas posibles de reconfiguración. Siendo más generales, los criterios que podrían determinar una reconfiguración son:

- Libranza de interruptores en la subestación
- Atención por fallas permanentes
- Mantenimiento de Transformadores en una subestación
- Por operación de automatismo en algún tramo de red
- Comportamiento de la demanda
- Reducción de pérdidas eléctricas
- Sobrecargas en subestación y alimentadores
- Voltajes bajos
- Confiabilidad de la estructura final del sistema

Las primeras causas, generarán reconfiguraciones temporales y las segundas, requerirán de un análisis más amplio del estado final de la red.

2.2.1 ESTADOS POSIBLES DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN

Un sistema de distribución puede presentar varios estados de operación y estos pueden ir cambiando de uno a otro, dependiendo de diferentes condiciones a través del tiempo, estos estados operativos son:

Normal. Cuando existe un balance entre la energía suministrada y energía consumida, es decir, las condiciones para los que fue planeada para operar continuamente y dentro de límites de operación establecido.

Contingencia. Cuando se tiene alguna eventualidad y los límites operativos son sobrepasados, casi siempre pasa al presentarse una falla o en condiciones temporales por cambios atmosféricos o eléctricos no previstos.

De reconfiguración y normalización. El tiempo en el cual se realizan maniobras para reconfigurar la red y energizar la mayor parte de carga posible. Posterior a esto viene la atención de la falla para finalmente regresar maniobras y volver al estado inicial o estado normal, todo este periodo se conoce como de reconfiguración y normalización.

Una transición de estado es el tiempo que toma el pasar de un estado de operación a otro, parte de estas transiciones, son involuntarias (ya sea por operaciones de recierres o automatismo en los circuitos de distribución), mientras que otras son voluntarias (cuando se ejecutan maniobras manuales o a control remoto) por causas diversas. En la figura 2.1 están representadas por flechas.

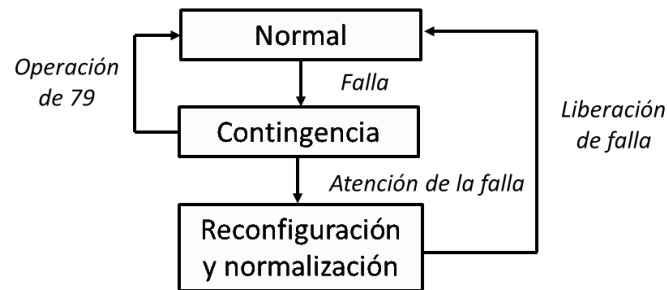


Figura 2.1: Estados operativos en un sistema eléctrico de distribución

2.2.2 EL CONCEPTO DE RECONFIGURACIÓN

El principal objetivo de la reconfiguración en un sistema de distribución, es el de optimizar el servicio, ya sea durante alguna falla, libranza o cualquier contratiempo en la red, para lo cual es necesario identificar las diferentes opciones de reconfiguración, analizarlas y finalmente ejecutar las maniobras necesarias para realizar la transición. Para llevar a cabo la reconfiguración, generalmente existen muchas opciones posibles, que podrían formar un conjunto relativamente grande de maniobras, por tal motivo el operador debe considerar una lista de factores y evaluar cuales tienen mayor peso para definir dicha configuración, estos factores se muestran a continuación:

1. Sobrecargas individuales por alimentador
2. Sobrecargas por restaurador sobre la trayectoria de algún enlace
3. Capacidad del conductor que queda de respaldo
4. Ajuste del pick up de los equipos de protección (relevadores y restauradores)
5. Bajos voltajes que podrían resultar de la reconfiguración
6. Consideración de servicios importantes o zonas geográficas de mayor importancia
7. Número de maniobras que se deben realizar de forma local
8. Tiempo de ejecución de las maniobras (sobre todo las que se realizan de forma local)

9. Número de maniobras que se pueden realizar de forma remota
10. Confiabilidad del sistema durante el tiempo que esté reconfigurado
11. Desarrollo de la demanda durante el tiempo que dure la reconfiguración
12. Pérdidas eléctricas mínimas

A continuación, se hará la definición de los doce conceptos mencionados con la ayuda de la figura 2.2 en la cual, se muestran dos subestaciones diferentes con un desconectador disponible de enlace.

Sobrecargas individuales por alimentador. Supongamos la falla en el alimentador “A” del circuito de la subestación 1, el alimentador vecino “B”, debe tener la disponibilidad para respaldar la carga del circuito fallado a través del enlace “E” sin que “B” llegue al tope del ajuste de su protección; esta consideración del pick up aplica tanto para los alimentadores de circuito “A” y “B”, como para el alimentador del transformador de la subestación vecina, el objetivo es no llegar a un disparo por sobrecarga en ninguno de los dos.

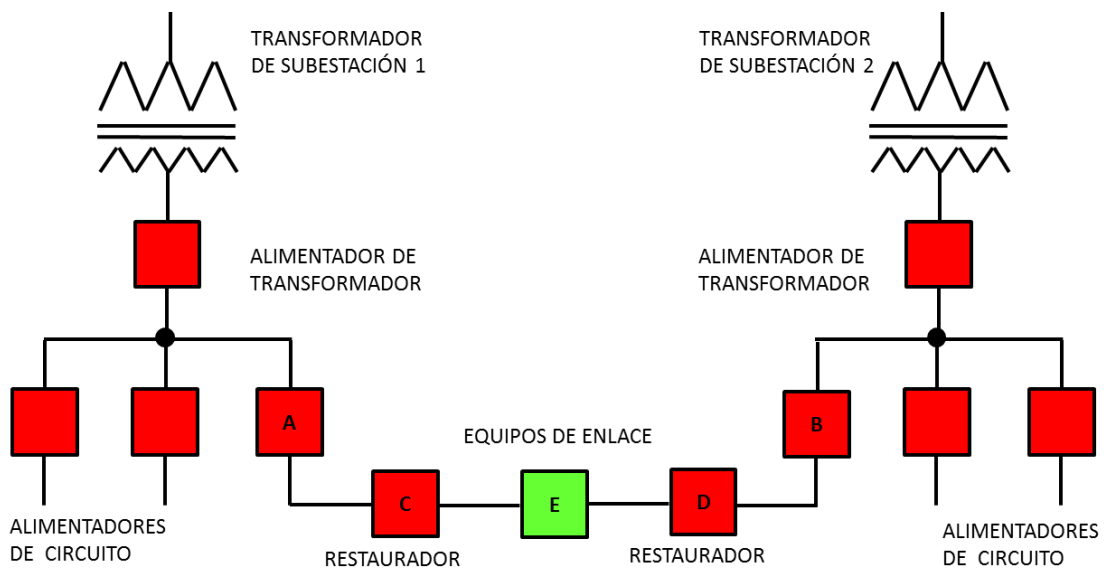


Figura 2.2: Equipos de un sistema de distribución

Sobrecargas por restaurador sobre la trayectoria de algún enlace. Es común encontrar restauradores sobre la trayectoria principal de un circuito como son “C” y “D” en la figura 2.2 y por el cual, circularía la corriente al utilizar el equipo de enlace “E”, debe ser tomado en cuenta el ajuste de estos equipos de protección secundaria, para evitar disparos de estos por sobrecarga.

Capacidad del conductor que queda de respaldo. A través de las trayectorias de los circuitos se debe confirmar la capacidad del conductor sea la adecuada para soportar la mayor de las contingencias, sobre todo de los tramos delante de restauradores que

ven hacia los enlaces ya que pudiera ser necesario utilizarlo en demanda máxima tomando más de la carga de un circuito.

Ajuste del pick up de los equipos de protección. Todos los equipos de protección, ya sea en la subestación o en los restauradores instalados a lo largo del circuito deben ser configurados a fin de que al haber una transferencia de carga, no se alcance el valor de pick up con el que esté ajustado y así evitar disparos indeseados. Este es un punto muy importante en la reconfiguración ya que, dependiendo de las maniobras planeadas varias protecciones de sobrecorriente de tiempo inverso pueden quedar con un sentido de corriente primaria inversa respecto del flujo normal, por tal motivo debe realizarse un reajuste a la protección para evitar se pierda la coordinación con los equipos que están antes y después de éste.

Bajos voltajes que resulten de la reconfiguración. No es deseado que resultante de una reconfiguración de la topología normal, se creen trayectorias con varios kilómetros de distancia, ya que los usuarios más alejados de la fuente quedarán con bajo voltaje, que decrementará significativamente la calidad del servicio.

Consideración de servicios importantes o zonas geográficas de mayor importancia. Dependiendo de la zona geográfica a la que suministre energía el circuito, la reconfiguración debe hacerse considerando servicios importantes, zonas turísticas o grandes montos de carga.

Número de maniobras que se deben realizar de forma local, tiempo de ejecución de las maniobras y número de maniobras que se pueden realizar de forma remota. La tendencia actual hacia la automatización, ha vuelto más frecuente la instalación de equipos de protección electrónicos sobre la trayectoria del circuito, de esta manera, el tiempo de restablecimiento al presentarse una falla, cada día es menor; hasta segundos en algunos casos cuando se establecen condiciones de automatismo, es decir, restablecimiento sin intervención humana. Sin embargo, aún existen seccionamientos o enlaces que son operados por personal de campo de forma local.

Un punto muy importante en la restauración, implica tomar en cuenta los puntos de instalación de los seccionamientos de operación local, ya que el desplazo del personal al punto del equipo puede ser de varios minutos, valiosos para los índices de restablecimiento que tenga la empresa. De esta manera, debe ser bien planeada la instalación de estos equipos de manera que, sólo sean utilizados en caso de contingencias secundarias y darles prioridad a los equipos electrónicos operados de forma remota, a la atención de un mayor número de contingencias.

Confiabilidad del sistema durante el tiempo reconfigurado y Desarrollo de la demanda durante el tiempo que dure la reconfiguración. Para una reconfiguración

debe tomarse en cuenta el tiempo que ésta se mantendrá, ya que pudiera iniciarse en un escenario de demanda mínima y no ser normalizada hasta bastantes horas o días después, obviamente esta configuración atravesaría por varios escenarios de demanda, lo que debe ser bien analizado para su correcta aplicación y conservar la confiabilidad de la red.

Pérdidas eléctricas mínimas. Al realizarse una reconfiguración deben tomarse en cuenta las pérdidas que podrían aparecer por caídas de voltaje en los puntos más alejados de la fuente en la red reconfigurada, ya que esto podría influir negativamente en la calidad de la energía que se entrega al cliente. Es indispensable realizar un análisis de pérdidas para reconfiguraciones definitivas no siendo necesario para reconfiguraciones por falla, donde deben mantenerse los límites operativos establecidos.

Como se puede observar, son demasiados los criterios para una reconfiguración y no existe una receta que seguir, ya que tratándose de una misma falla para el mismo sistema, la reconfiguración pudiera variar en condiciones o demandas diferentes.

2.2.3 EL CONCEPTO DE RESTABLECIMIENTO

El restablecimiento del servicio, es el retorno de la energía eléctrica a los consumidores después de una interrupción (ya sea transitoria a definitiva). Si se trata de una interrupción, donde tenga que intervenir más que el recierre de una protección, los operadores del sistema deben realizar maniobras con rapidez a fin de energizar todas las partes del sistema que no están falladas, liberar la falla para posteriormente normalizar el sistema eléctrico a su condición inicial.

El restablecimiento es un concepto que va aunado al de reconfiguración en el caso de una falla permanente, ya que involuntariamente al presentarse, habrá maniobras que restaurarán el servicio y al mismo tiempo estarán reconfigurando la red, pero no aplica para una falla transitoria donde el recierre restablece el servicio sin sufrir ningún cambio en la topología de la red.

El restablecimiento básicamente trata de utilizar enlaces disponibles que puedan soportar tramos de carga afectada durante el tiempo que dure la falla. Es un problema de razonamiento lógico más que de cálculo numérico donde la experiencia del operador de la red de distribución da la pauta para la toma de decisión más acertada.

El restablecimiento de una falla permanente, conlleva las acciones necesarias para energizar el servicio de los usuarios, considerando que la falla ha sido localizada y que los estados de los desconectores (con o sin protección) estén disponibles para el operador de la red.

CAPÍTULO III. PROTECCIONES Y AUTOMATIZACIÓN EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

La protección por medio de relevadores en sistemas eléctricos, es una subdivisión de la ingeniería eléctrica que se encarga del diseño y aplicación de lógicas para minimizar daños en el sistema eléctrico de potencia, al detectar condiciones anómalas de operación.

La función primordial de una protección es aislar lo más rápidamente del resto de la red cualquier elemento sujeto a un cortocircuito o que cuando opere en una condición anormal no pueda causar daño ni se propague a otra parte del sistema. En muchos casos la protección proporciona señalización que ayuda al personal a determinar la localización y el tipo de falla. La rapidez de respuesta es una característica importante de los sistemas de protección por relevadores, por esto es que los esquemas se diseñan para operar sin intervención humana.

3.1 PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTE

Posiblemente las fallas más comunes en los sistemas eléctricos de potencia, tienen que ver con el aumento de corriente para la que fueron diseñados, ya sea como protección principal o de respaldo, el relevador de sobrecorriente es uno de los elementos más simples y que se usa ampliamente, especialmente en alimentadores radiales de distribución. Se utiliza una combinación de los relevadores de sobrecorriente de corriente definida, tiempo inverso y en algunos casos también la función de direccionalidad para dichos relevadores.

A continuación se da una breve descripción de los relevadores de sobrecorriente más empleados.

3.1.1 PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTE INSTANTÁNEAS

El principio de operación es muy sencillo; al igualar o sobrepasar al umbral de la corriente de operación, el relevador mandará la orden de apertura al interruptor relacionado sin ningún retardo de tiempo. Estos relevadores, como unidades aisladas únicas, solos son poco aplicadas en los sistemas eléctricos de potencia, generalmente se utilizan en combinación con otras protecciones, con el fin de complementar sus características, los tiempos de operación son del orden de los 10 a los 60 milisegundos.

3.1.2 PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTE DE TIEMPO DEFINIDO

Una protección simple de tiempo definido, podría obtenerse usando un relevador instantáneo en conjunto con un elemento temporizador, que produzca el retardo necesario. En los relevadores de estado sólido se utiliza un elemento comparador que actúa a través de un temporizador, el relevador opera sólo si la sobrecorriente se mantiene durante el tiempo ajustado, en caso contrario, el relevador se repone.

3.1.3 PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTE DE TIEMPO INVERSO

La principal característica de este tipo de relevadores es que, mientras mayor sea la corriente aplicada, menor es su tiempo de operación, de ahí el nombre de “tiempo inverso”. Esta propiedad, hace que, se clasifiquen este tipo de relevadores según su curva de operación como: inversa, muy inversa o extremadamente inversa. Obsérvese en la figura 3.1 que, para un mismo valor de sobrecorriente la curva con mayor extremidad opera primero, todas han sido ajustadas para tener una separación entre ellas de 0.2 s para la misma corriente de cortocircuito.

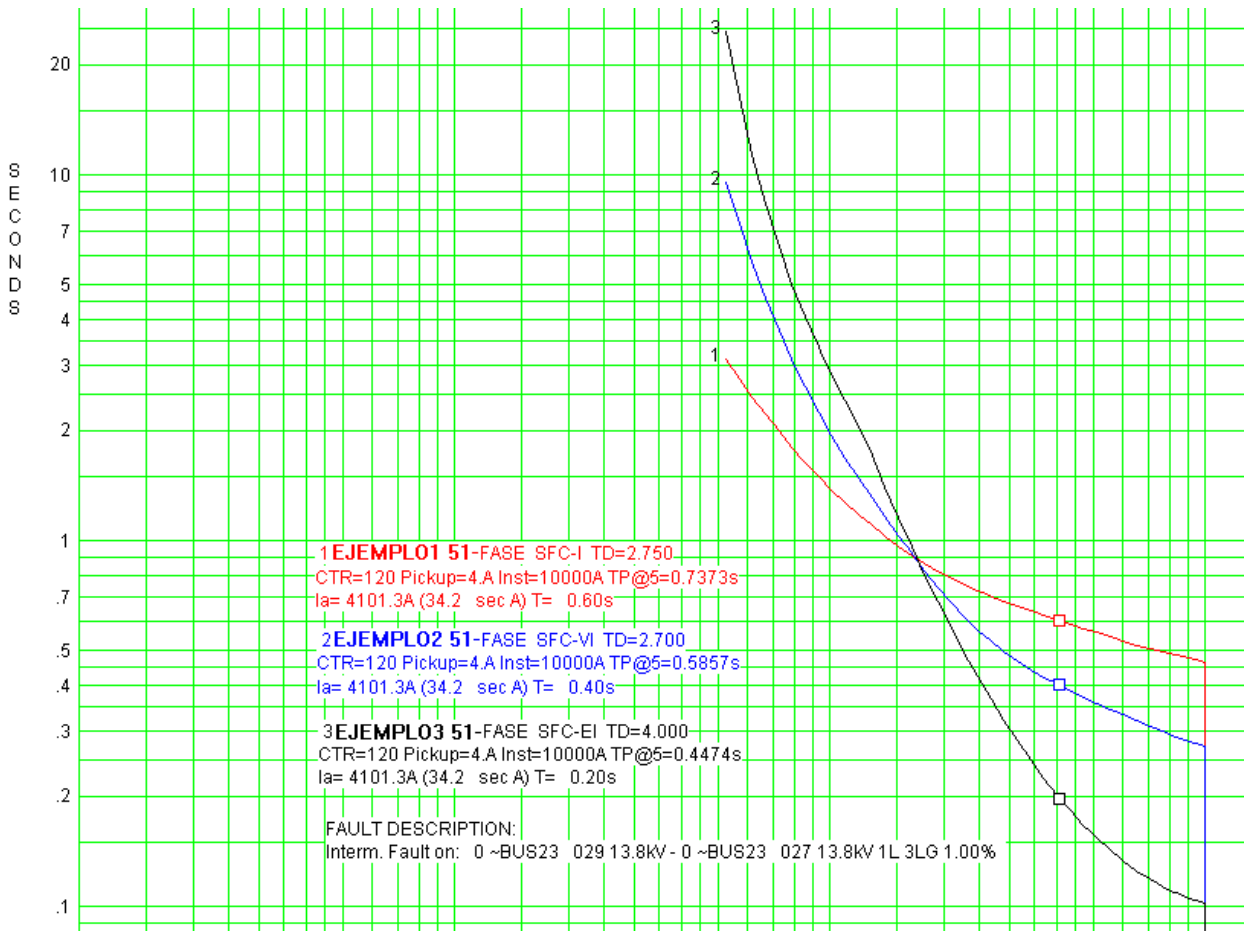


Figura 3.1: Curvas características de relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso

Para un sistema radial, la coordinación de protecciones de sobrecorriente, selecciona los ajustes de los relés temporizados, de tal manera que operen rápidamente para fallas en su zona y den respaldo a los relés de las zonas ubicadas antes de estos. Puesto que los circuitos de distribución, tienen generalmente una topología radial, la corriente de cortocircuito disminuye, conforme la falla se aleja de la fuente, la curva de tiempo inverso, es conveniente para ofrecer operación rápida ante fallas en la zona propia del relé y respaldo a los relés ubicados delante de este.

3.1.4 RELEVADORES DIRECCIONALES DE SOBRECORRIENTE

La protección direccional, se utiliza donde es necesario proteger el sistema ante corrientes de falla que circulan hacia ambos lados, ya que una protección de sobrecorriente sin direccionalidad, podría desconectar elementos innecesarios en los circuitos, por la falta de coordinación en un sentido para el que no fue diseñado. Aunque en los sistemas de distribución, la configuración radial es preferentemente utilizada, la implementación de equipos de protección electrónica a través de la trayectoria de los circuitos, hacen dinámica la red de distribución, pudiéndose cambiar la topología relativamente rápido ya sea por maniobras programadas, para mejorar la calidad de la energía, por respaldo de carga, por contingencia o por otro fin distinto. De esta manera, los sentidos de corriente en los que las protecciones, normalmente operan en una configuración radial pueden ser invertidos en varios de estos equipos, perdiéndose la seguridad y selectividad.

Un relevador de protección de sobrecorriente direccional, prácticamente contiene dos ajustes independientes de corriente, una por cada sentido, de manera que el sistema esta monitoreado por la protección en ambos sentidos según le corresponda. Su construcción, contiene una unidad de sobrecorriente y otra direccional de referencia, para medir el ángulo de la falla y así determinar, si el relevador debe operar o no, generalmente la señal de referencia de secuencia cero o secuencia negativa ya sea de voltaje o corriente.

3.2 COORDINACIÓN EN CIRCUITOS RADIALES

En general, en los sistemas de distribución para asegurar la selectividad en diferentes escenarios, el pick up de un relevador se ajusta por arriba que el de otros relevadores más cercanos a la falla, también debe tener un tiempo de retardo con los relevadores de los elementos adyacentes, este ajuste deberá hacerse para las condiciones de flujo de corriente máxima en la localidad del relevador. Como ejemplo obsérvese la figura 3.2; para la falla mostrada el relevador localizado en el interruptor 2 debe dispararse e interrumpir el flujo de la corriente del cortocircuito antes de que el relevador del interruptor 1 pueda llegar a operar, podemos expresar el tiempo de funcionamiento del relevador requerido en el interruptor 1 en función del tiempo de funcionamiento del relevador en 2 por la siguiente consideración:

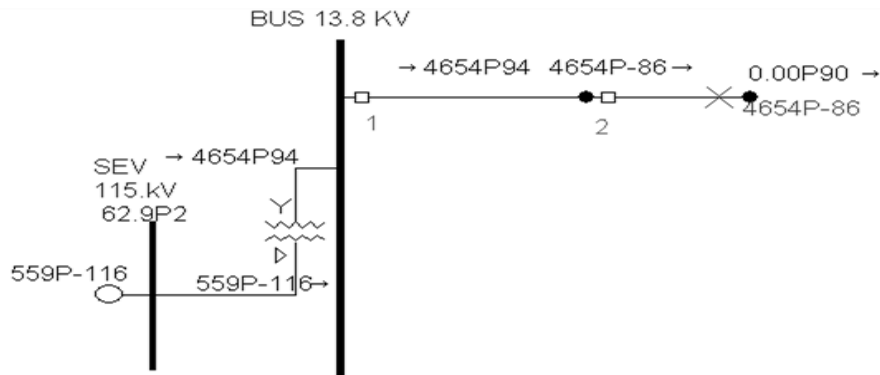


Figura 3.2: Ejemplo de coordinación en circuitos radiales

$$t_1 = t_2 + t_3 + F$$

Donde:

- t_1 = Tiempo de funcionamiento del relevador 1
- t_2 = Tiempo de funcionamiento del relevador 2
- t_3 = Tiempo de interrupción de la I_{CC} del interruptor 2
- F = Factor de seguridad en segundos

En general será suficiente un valor de 0.2 a 0.3 segundos para el factor de seguridad para que no operen en cascada los interruptores/relevadores al haber una falla.

Se utiliza una amplia variedad de equipos para proteger las redes de distribución, el tipo de protección depende del elemento a proteger y su importancia. Los dispositivos más utilizados para la protección del sistema de distribución son los siguientes:

- Relevadores de sobrecorriente
- Restauradores
- Seccionalizadores
- Fusibles

El trabajo en cuestión, presenta una coordinación entre restauradores electrónicos y los relevadores de una subestación y toma en cuenta la operación de fusibles, por lo que a continuación, se describirá el funcionamiento básico de cada equipo y la coordinación entre ellos, omitiendo a los seccionalizadores por la tendencia actual a su desuso y a que en esta investigación no se utiliza ninguno.

3.2.1 RESTAURADORES

De acuerdo con la norma ANSI C37.60 el restaurador, es un interruptor con reconexión automática, instalado preferentemente en líneas de distribución, es un equipo auto-controlado para interrumpir y cerrar un circuito de corriente con una predeterminada secuencia de operaciones de cierre-apertura ante condiciones de sobrecorriente, seguidas por un restablecimiento o apertura definitiva.

El objetivo de un restaurador, es interrumpir una falla antes de que se convierta en una permanente reduciendo el tiempo de restablecimiento y si llegara a ser definitiva, coordinar con otros dispositivos de protección, para aislar la línea en el punto más cercano minimizando así su extensión. Si la falla que origina la operación de apertura todavía existe, entonces el restaurador permanecerá abierto después de realizar un número preestablecido de operaciones, de tal manera que quede aislada del resto del sistema.

Es importante la coordinación con otros equipos a fin de garantizar que, cuando se produzca una falla, se desconecte una sección del circuito reduciendo al mínimo la interrupción del suministro a los clientes. Esto se logra básicamente ajustando el tiempo y la secuencia de operaciones del restaurador para coordinar con los elementos lado fuente y lado carga del restaurador.

Existe una variedad de restauradores; monofásicos, trifásicos, de mecanismo de operación hidráulica o microprocesado, con interrupción en aceite, vacío o SF6. En este proyecto se hará referencia únicamente a los restauradores electrónicos independientemente del medio de extinción ya que en la actualidad, son implementados cada vez más en las redes de distribución, algunas fotos de estos equipos son mostradas a continuación en la figura 3.3.

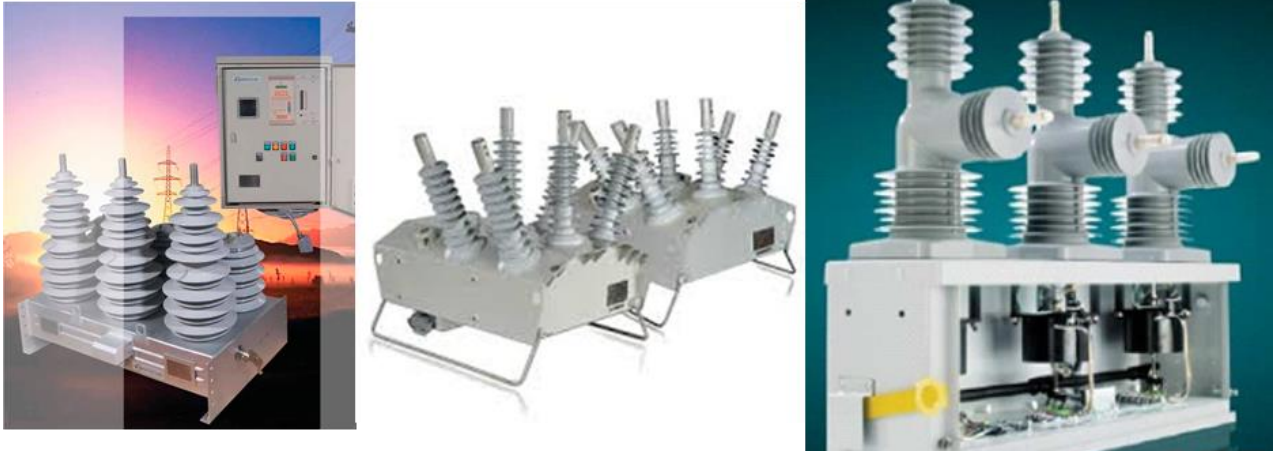


Figura 3.3 Ejemplos de restauradores electrónicos por marca, de izquierda a derecha: ARTECHE, NOJA y ABB

3.2.2 FUSIBLES DE DISTRIBUCIÓN

Su protección está constituido por el elemento fusible, el cual está dentro del cartucho de conexión. Este dispositivo se selecciona de acuerdo con el valor de corriente nominal que va a circular por él. Su principio de acción es por calor, este se calienta directamente por el paso de corriente y se destruye una vez que la corriente es superior al valor establecido, los fabricantes diseñan fusibles prácticamente de cualquier valor de corriente de ruptura, las especificaciones se realizan en base a la norma ANSI C 37-42 para 13.2KV y ANSI C 37-41 para 34.5KV. El elemento fusible más común, se fabrica fundamentalmente de cobre electrolítico con aleación de plata, o cobre aleado con estaño.

La mayoría de los fusibles para usos en la red de distribución, operan con el principio de expulsión, esto es, cuentan con un tubo para limitar el arco y dentro de este, el elemento fusible. La zona de operación está acotada por dos factores; el tiempo mínimo necesario para la fusión del elemento y el tiempo máximo de fusión.

Para los sistemas de distribución, son muy usados los fusibles designados como tipo K para una velocidad de apertura rápida y tipo T para una velocidad de apertura lenta, aunque existen fusibles con otras características dependiendo del fabricante. En el Anexo 1 se muestran como ejemplo curvas mínimas de fusión y máxima de despeje para fusibles tipo K y T de la marca S&C Electric.

Existen otros tipos de fusibles como los de potencia para un nivel de voltaje de 13.8KV, 25KV y 34.5KV pero tienen usos particulares, en el presente estudio no se tratará con ninguno por lo que no serán mencionados.

3.2.3 COORDINACIÓN DE FUSIBLES, RESTAURADORES Y RELEVADORES

La filosofía de operación para la coordinación entre dispositivos, es que la protección primaria (de la zona a proteger) debe liberar la falla, antes que alguna protección de respaldo y que de existir una falla permanente, deberá limitarse la afectación a la mínima parte del sistema, durante el menor tiempo posible. Cuando existe una configuración en la cual el elemento más cercado a la falla es un fusible, podría presentarse una coordinación, para la cual el elemento de respaldo (restaurador o relevador) presentase una sola operación con el objetivo de librar la falla y así salvar el fusible.

A continuación, se presentan los criterios resumidos de coordinación entre dispositivos, omitiendo la coordinación fusible-fusible, y la de seccionalizador para todos los casos ya que no serán utilizados en el presente trabajo.

3.2.3.1 COORDINACIÓN RELEVADOR-RELEVADOR

Este tipo de arreglos se da principalmente en una subestación, como ejemplos: la protección del transformador lado alta vs. lado baja tensión, la protección lado baja tensión del transformador vs. la protección para los circuitos de distribución, o lado baja del transformador vs. banco de capacitores conectado al bus de media tensión, también se puede utilizar en líneas de transmisión radiales. Para todos los casos es aconsejable dejar un margen de 0.2 – 0.4 segundos entre las curvas de cada dispositivo para la máxima corriente de corto circuito que compartan y de ser posible respetar la inversidad de las curvas para mantener la distancia entre ellas en diferentes valores de corriente.

3.2.3.2 COORDINACIÓN RELEVADOR-RESTAURADOR

Para este caso los relevadores deben ser ajustados con el suficiente tiempo de retraso, para permitir la operación de todos los restauradores delante de este, su instalación en los sistemas de distribución puede ser de dos maneras:

- a) Cuando el juego relevador-restaurador se encuentra dentro de una instalación
- b) Cuando no comparten una instalación, es decir, el relevador está en alguna subestación y el restaurador se encuentra sobre la trayectoria del circuito que protege el alimentador.

Para la aplicación del primer criterio se debe establecer un margen de operación holgado para la operación entre las curvas del relevador y restaurador, ya que la operación del relevador de respaldo podría afectar la continuidad de varios elementos del sistema, este relevador normalmente protege la troncal del circuito donde está el restaurador o podría ser la protección del transformador lado baja tensión, el cual generalmente no tiene recierre, por ello debe establecerse dicho margen de seguridad.

Para el segundo caso es permisible en ocasiones la operación de ambos equipos para el último recierre del restaurador o que el relevador de respaldo opere cuando por condiciones de distancia entre los equipos no se pueda hacer una coordinación en los instantáneos.

3.2.3.3 COORDINACIÓN RESTAURADOR-RESTAURADOR

Su configuración es similar a la de un relevador, estos equipos cuentan con un grupo de curvas lentas y rápidas que se pueden elegir según el uso deseado, se determinan

también parámetros como pick up, palanca de tiempo, número de operaciones, tiempo de recierre para cada operación y tiempo de reset, guardándose en la memoria del equipo; existen localidades de memoria en las cuales se pueden guardar distintas configuraciones, a cada una de estas se le denomina “grupo de ajustes”. Generalmente los equipos independientemente de la marca se diseñan con cuatro grupos de ajustes, pero sólo uno de estos puede estar operando a la vez.

La coordinación entre dos restauradores sobre la misma trayectoria se obtiene seleccionando correctamente la corriente de pick up y la palanca de tiempo en cada uno. Los restauradores electrónicos pueden coordinarse más estrictamente que lo que se hace con los hidráulicos ya que su accionamiento es a base de dispositivos electrónicos de estado sólido y no de campos magnéticos y grandes mecanismos como en los hidráulicos, donde la inercia en la operación juega un papel importante. Para las configuraciones típicas el restaurador más alejado de la fuente debe operar más rápido que el que está cercano a ésta y su tiempo de liberación menor al que está instalado más cerca de la fuente, en ambos casos se debe tomar un factor de seguridad y así evitar operaciones de dos o más restauradores en cascada.

3.2.3.4 COORDINACION RELEVADOR-FUSIBLE

En esta configuración el relevador generalmente está ubicado en una subestación como protección principal y el fusible en alguna localidad fuera de ella como protección de ramales, teniendo un margen de separación mínimo de 0.3 segundos entre la curva de operación del relevador y la del máximo tiempo de fusión del fusible, para la máxima corriente de cortocircuito común y así evitar operaciones indeseadas de ambos equipos, observe la figura 3.4 donde se ejemplifica para un tiempo de separación entre curvas de 0.6 segundos.

Para las fallas transitorias puede ser deseable que el fusible no se queme antes que el relevador quede abierto, la habilitación de un relevador instantáneo para el primer disparo es una opción, protegiendo así el fusible y evitando cambios de piezas para cada falla, éste operaría para una falla en el ramal, activándose posteriormente la función de recierre y permitiendo así la coordinación de curvas de tiempo inverso con la del fusible.

Como los restauradores electrónicos hoy en día tienen características muy similares a los relevadores instalados en una subestación; teniendo la funcionalidad de 50 y 51, el criterio de relevador-fusible hasta aquí descrito aplica también para el de restaurador-fusible.

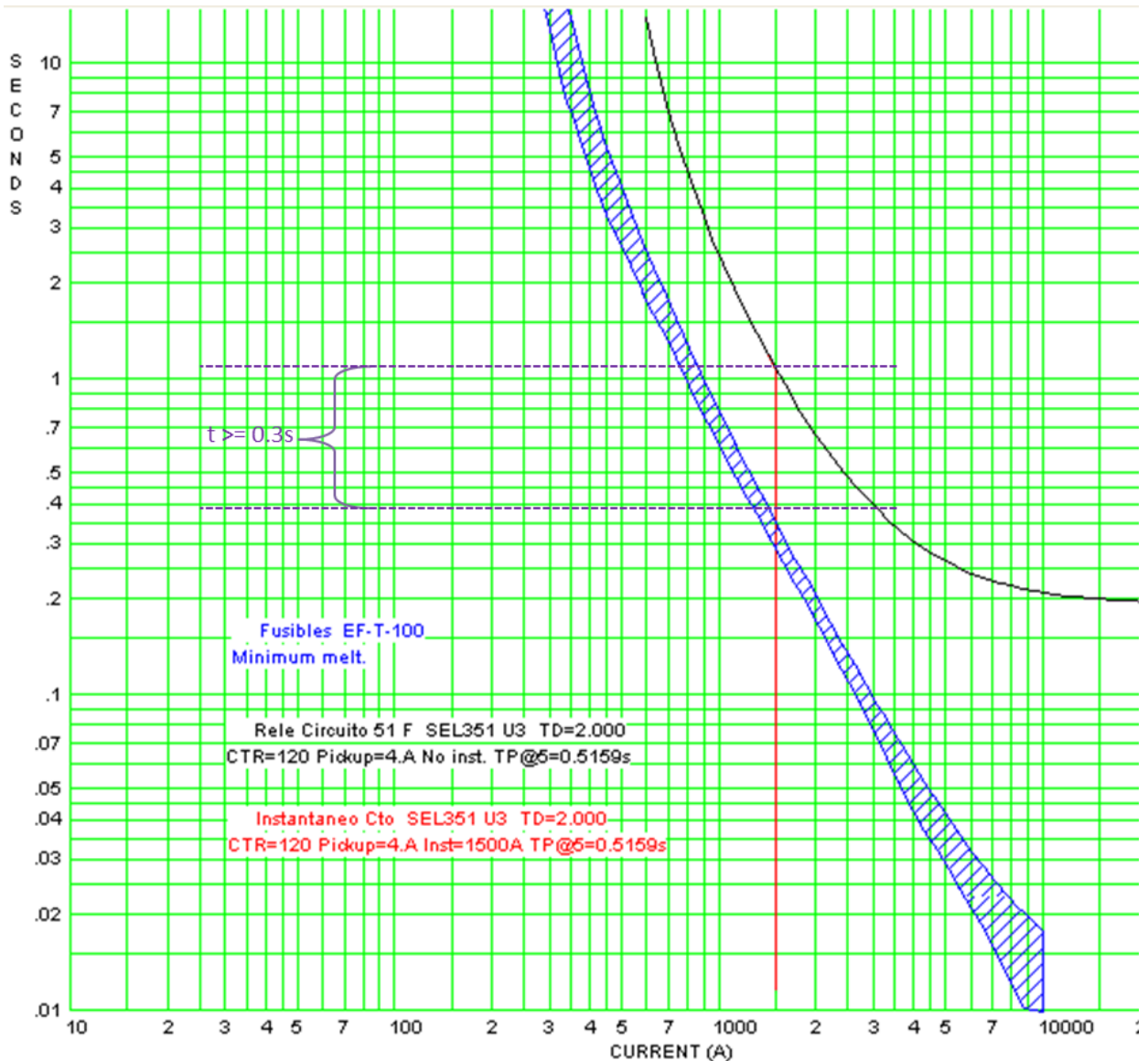


Figura 3.4: Coordinación curva de tiempo inverso e instantáneo con curva de fusible

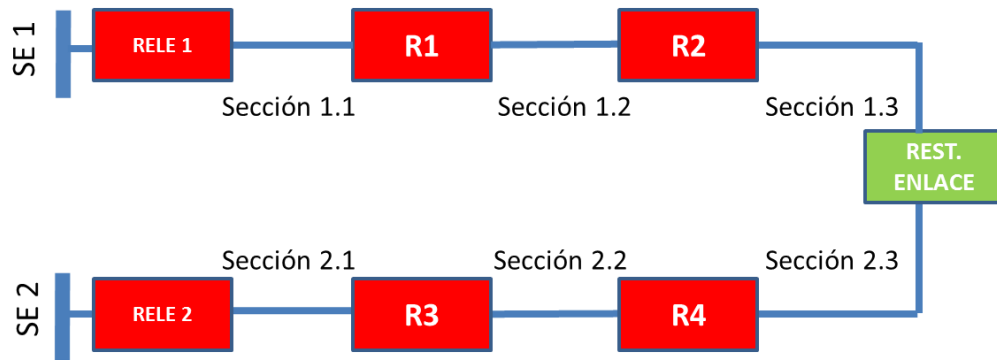
3.3 AUTOMATIZACIÓN EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Respecto a la automatización hasta la fecha se puede decir que la tendencia de las redes de distribución es "...lograr mayor efectividad operativa en la automatización de la distribución..."[3]. Con el fin de lograr este objetivo diversas empresas en el ramo eléctrico han diseñado equipos con enfoques desde el punto de vista de operación centralizada y descentralizada, independientemente del enfoque, el automatismo considera básicamente el seccionamiento de fallas sobre los circuitos, monitoreando variables como la corriente, el voltaje, y los estados operativos de los equipos, aunado a esto, se encuentra una estructura de comunicación y control para tener una visualización y telecontrol de los equipos en cuestión para la mayoría de los casos.

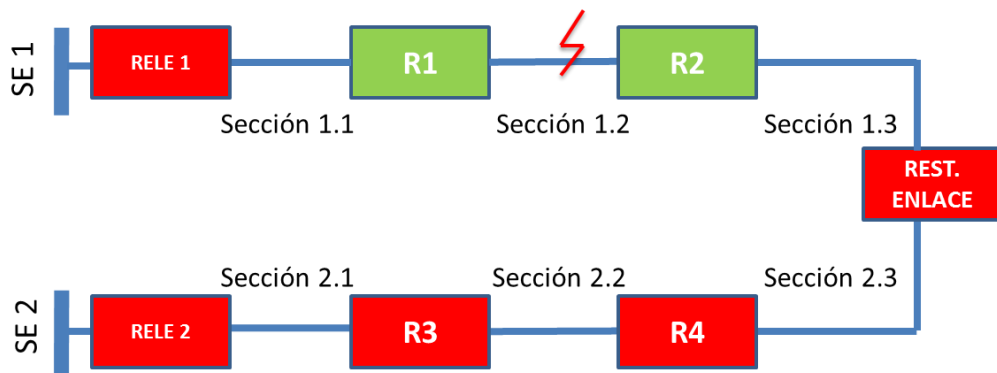
En la figura 3.5 se muestra el funcionamiento básico de un circuito con automatismo. En el inciso a se muestra una red de ejemplo con dos subestaciones, un circuito por cada

una, varios restauradores con automatismo a lo largo de cada circuito y un equipo común de enlace disponible en cualquier momento.

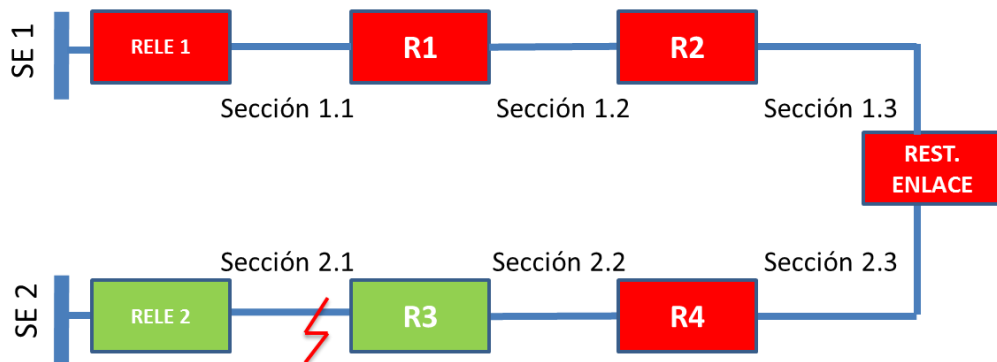
Básicamente al ocurrir una falla en un tramo, los restauradores instalados a lo largo de los circuitos operarán para abrir o cerrar (según corresponda a cada equipo) dejando sin potencial la sección fallada (sección 1.2 para el inciso *b* y 2.1 para el inciso *c* de la figura 3.5) y energizados los tramos restantes, este funcionamiento puede ser centralizado o descentralizado dependiendo de la infraestructura, las características de los equipos y los deseos de la empresa de distribución.



a) Red de distribución en estado normal



b) Red con falla permanente (caso 1)



c) Red con falla permanente (caso 2)

Figura 3.5: Ejemplo de automatización en una red de distribución

En el automatismo de distribución, se consideran funciones en los equipos con el fin de tener capacidad para procesar el restablecimiento de servicio en tiempos mínimos, incluso para responder a esquemas de reconfiguración sobre los alimentadores y fallas en redes eléctricas extensas con disponibilidad a entrelazar otras redes, actualmente esto sigue siendo un reto y se continúan desarrollando por diferentes empresas de equipo eléctrico equipos con algoritmos innovadores.

3.3.1 AUTOMATISMO CENTRALIZADO

Este tipo de automatismo tiene más tiempo desarrollándose por su naturaleza, la coordinación entre los equipos así como los tiempos de operación para ir energizando la carga ante una falla lo dicta un equipo único o centralizador que generalmente es la unidad terminal maestra, en ésta se tienen monitoreadas las variables y estados de los equipos involucrados, además ya se encuentran definidas las condiciones que hacen iniciar el algoritmo de restablecimiento automático, la red puede ser tan extensa y compleja como se desee, sin embargo, tiene una gran limitante y es que para que se lleven a cabo las maniobras todos los equipos y cada una de las variables monitoreadas que tengan que ver con el automatismo deben estar presentes en la unidad central a la hora de la falla. Tomando como ejemplo la red de la figura 3.5, al ocurrir una falla en la sección 1.2 como en el inciso *b*, la unidad central detecta el disparo definitivo de *R1* y manda la apertura de *R2* y el cierre de *restaurador de enlace* coordinadamente, dejando seccionada la parte fallada. Como ya se comentó esto lo realiza siempre y cuando se tengan visualizados los estados y mediciones de los equipos involucrados en el automatismo ya que es una premisa de ejecución del algoritmo de restablecimiento.

En casos donde la red sea muy extensa, con grandes cambios en la demanda o donde sea una red muy dinámica podría realizarse una validación humana, que sería hecha por el operador de la red para comenzar con los movimientos referentes al automatismo.

3.3.2 AUTOMATISMO DESCENTRALIZADO

En este tipo de automatismo todos los equipos involucrados son configurados antes de su entrada en operación y cada uno tiene habilitadas funciones de acuerdo al papel que tenga en el restablecimiento automático, el objetivo como en el apartado anterior es dejar seccionada la parte fallada y energizar todas las demás. De una forma óptima se lleva a cabo con equipos de la misma marca, sin embargo, no es una limitante ya que independientemente de la marca tienen funciones similares.

A continuación se dará una explicación de las funciones básicas en el automatismo descentralizado con ayuda de la red en la figura 3.5.

3.3.2.1 FUNCIÓN DE CIERRE POR PÉRDIDA DE POTENCIAL

Esta es la función principal en el automatismo, en esencia el equipo normalmente abierto o de enlace es el encargado de realizar el cierre una vez que sus sensores mandan al gabinete de control la señal de ausencia de potencial de algún lado, tiene un temporizador ajustado el cual debe quedar con un tiempo mayor a lo establecido como falla transitoria, así, después de los recierres de los restauradores sobre la trayectoria de los circuitos el equipo cerrará tomando parte de la carga afectada. Esta función va

siempre en coordinación en tiempo con la función de bajo voltaje y de direccionalidad que se explican en seguida.

3.3.2.2 FUNCIÓN DE BAJO VOLTAJE

Los restauradores electrónicos cuentan con sensores de potencial en las boquillas de la bancada, de esta manera se obtiene la medición de voltaje de operación de la línea. La función de bajo voltaje funciona como un comparador ajustable el cual en todo momento sensa el nivel de voltaje de operación, cuando éste caiga debajo del umbral establecido y se llegue al tiempo ajustado del temporizador el equipo abrirá. El objetivo principal de esta función es evitar que al ocurrir una falla se energicen tramos no deseados por el restaurador de enlace con cierre automático, por ejemplo; evitar energizar el bus de una subestación o limitar la carga y así proteger el conductor del circuito de respaldo.

3.3.2.3 BIDIRECCIONALIDAD

Todos los restauradores electrónicos tienen la posibilidad de ajustarse con curvas de tiempo inverso independientes para el sentido de operación, esto es muy útil ya que la condición normal de operación conlleva una coordinación con todos los equipos que operan en ese sentido. Al realizar un cambio de topología por haber cierres/aperturas por el automatismo habrá equipos que queden alimentando tramos de carga en un sentido en el que originalmente no fueron planeados. Esto implica un análisis de protecciones previo a la puesta en servicio donde se analicen los casos posibles y que en cada uno se tenga una correcta coordinación.

3.3.2.4 EJEMPLO DE AUTOMATISMO DESCENTRALIZADO

Los conceptos del automatismo descentralizado se ejemplificarán a continuación:

En el inciso a de la figura 3.5 se muestra el sistema de ejemplo en estado normal, con dos circuitos, una fuente para cada uno, dos restauradores en cada uno y un equipo de enlace común. Se propone una falla permanente en la sección 2.1, tal y como se muestra en el inciso c, para entender el proceso automático de restablecimiento se deben considerar las siguientes funciones previamente ajustadas para cada equipo:

- El primer restaurador de cada subestación (R1 y R3) debe tener habilitada la función de bajo voltaje.
- Los restauradores intermedios (R2 y R4) deben tener habilitada la protección de sobrecorriente direccional con ajustes independientes en cada sentido.
- El restaurador de enlace, debe tener habilitada la función de cierre por ausencia de potencial y también debe contar con ajustes de sobrecorriente para cada lado.

Supóngase ahora una falla en la sección 1.2 como en el inciso b, para una operación transitoria operará la protección de sobrecorriente de R1 y quedará energizado con algún recierre (no operando ninguna otro equipo). Para una falla permanente en este tramo, una vez ejecutado el último disparo de R1 el temporizador del restaurador de enlace comenzará su conteo hasta llegar a su tiempo configurado y cerrará; energizando la falla ahora por el equipo de enlace, en ese momento la protección de R2 y del restaurador en enlace sensarán la corriente de falla, pero al estar coordinadas sus

curvas de sobrecorriente de tiempo inverso R2 disparará únicamente, dejando el tramo fallado (entre R1 y R2) sin potencial.

Supóngase ahora la falla en la sección 2.1 como en el inciso c, si fuera una operación transitoria, operarán los recierres del relevador 2 hasta quedar el circuito como en sus condiciones normales. Para una falla permanente, una vez ejecutado el último disparo del relevador, el temporizador del restaurador de enlace (cierre automático) y de R3 (apertura por pérdida de potencial) comenzarán a avanzar hasta llegar a su tiempo configurado, R3 abrirá primero; ya que su tiempo ajustado es más corto, posteriormente el relevador de enlace cerrará, dejando así seccionado el tramo fallado.

La misma analogía de operación aplica para los tramos 1.1 y 2.2 ya que la configuración de las funciones de operación es la misma, obsérvese que en ningún caso es necesaria la comunicación con la terminal central de control ni entre equipos ya que cada equipo está ajustado para operar independientemente. Después de las maniobras automáticas de restablecimiento es necesaria la intervención en campo para la eliminación del daño, esto implica trabajos sobre el tramo que ha sido seccionado, por lo que siempre es recomendable realizar la apertura de cuchillas de los equipos que han quedado abiertos.

CAPÍTULO IV.- MARCO METODOLÓGICO

4.1 ALGORITMO PARA EL REAJUSTE DE PROTECCIONES

4.1.1 PROPÓSITO

El propósito del algoritmo se explicará conjuntamente con la figura 4.1, en ella se tienen tres subestaciones, cada una alimentando un circuito de forma radial y cada uno de los circuitos con un número de restauradores igual al número asignado de la subestación, es decir:

Subestación 1: 1 Restaurador a lo largo del circuito

Subestación 2: 2 Restauradores a lo largo del circuito

Subestación 3: 3 Restauradores a lo largo del circuito

En condiciones normales los ajustes de sobrecorriente de cada equipo deben estar coordinados con la protección previa, como ejemplo observe los equipos de la subestación 3, donde R3.1 estará coordinado con el relevador de la subestación 3, R3.2 en coordinación con R3.1 y R3.3 con R3.2, misma analogía para los equipos de las demás subestaciones.

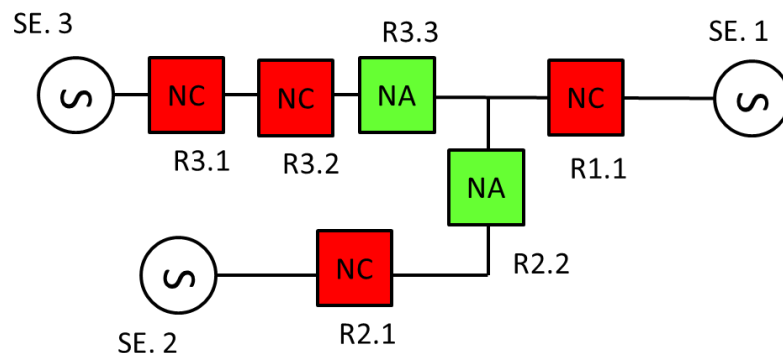


Figura 4.1 Red ejemplo para explicar propósito del algoritmo

El problema aparece cuando por cualquier condición se realiza un cambio topológico, ya que los ajustes en las protecciones también deben cambiar conservando en todo momento la coordinación. La solución parcial de este problema ha sido atacada por las marcas de los propios restauradores electrónicos (Arteche, Noja y Sel entre otros) ya que su lógica interna de operación contempla una protección direccional al sentir un cambio en el ángulo del sentido de la corriente [4]. Estos grupos de ajustes deben configurarse previamente a la puesta de operación de los equipos, básicamente es una tarea del ingeniero de protecciones analizar las configuraciones posibles de la red, en ambos sentidos y asegurar la coordinación de todos los equipos en estado normal, así como cuando se tenga un cambio de flujo por alguna modificación de la topología de la

red, en el siguiente párrafo se demostrará que este reajuste no es suficiente para algunos casos. Existen propuestas innovadoras como es el caso del artículo [5] en el cual se describe un esquema de protecciones adaptable con un enfoque de operación centralizado, el cual incluye varias capas en su lógica de operación: una capa de coordinación, una de comunicación y otra de ejecución, para su aplicación al momento de modificar la estructura de la red, sin embargo, el realizar cambios en las protecciones de esta magnitud podría significar cambiar el firmware de los propios relevadores para algunos casos o el algoritmo de la marca, algo que en un futuro podría suceder con la globalización, no obstante no es aplicable hoy en día en varios escenarios. Mientras que las propuestas en otros artículos como [6][7] se enfocan más a la generación distribuida, el presente proyecto se puede aplicar a configuraciones actuales y con un cambio en la homologación de los grupos de ajustes, también redirigirse en casos de generación distribuida.

En la figura 4.2 se muestra la misma red que la de la figura 4.1 pero se han realizado cierres y aperturas a diferentes equipos, de manera que se tienen ahora tres escenarios diferentes de la misma red; el inicial, de la figura 4.1 y dos de la figura 4.2. Estos switcheos pueden realizarse de forma remota por el operador de la red, de forma local con personal en campo o por lógica automática debida al restablecimiento de carga por alguna falla permanente. De cualquier manera, véase que para el caso del inciso a de la figura 4.2 el restaurador marcado como R2.2 debe tener un ajuste por debajo de R3.3 ya que queda como la cuarta protección en cascada desde el relevador de la subestación 3. Para la reconfiguración del inciso b el mismo equipo (R2.2) ahora debe quedar coordinado con R1.1 como la segunda protección en cascada desde el relevador de la subestación 1.

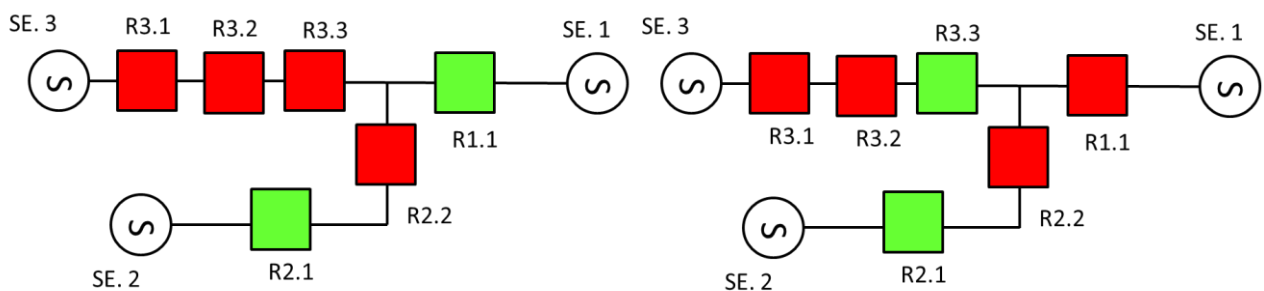


Figura 4.2 a) Red modificada caso 1

b) Red modificada caso 2

En estos dos casos, sería necesario que R2.2 contara con dos grupos alternos de ajustes para el sentido de corriente contrario al normal; es decir, uno para cada opción de cambio en la topología, muy probablemente necesitaría un tercero o cuarto si existiera una red más compleja o con más equipos de enlace o fuentes disponibles. En la práctica es imposible que lo haga el equipo automáticamente con las herramientas de

hoy en día, ya que no hay manera de que él determine que otro equipo actúa como su fuente de alimentación y menos conocer los ajustes que este tiene. La consecuencia es que existan configuraciones en las cuales no se conserve la coordinación entre restauradores o en el mejor de los casos que quede limitada la protección para el respaldo de carga con un ajuste muy bajo.

La mejor solución para estos casos sería que los equipos tuvieran precargados diferentes grupos de ajustes (analizados cada uno por el departamento de protecciones a cargo) y que el operador de la red cambiara dichos grupos al realizar una reconfiguración así para cada condición se actualizarían las protecciones, sin embargo, en la práctica pudiera no ser factible realizarlo, ya que en la mayoría de los casos estos cambios serían por atención de contingencia, en la cual la continuidad del servicio es valiosa hablando de segundos, por ello realizar un análisis de cada caso y cambio para cada equipo no es práctico por lo menos al instante de la falla o en todo caso vendría siendo el menor de los males.

Resultaría de gran ayuda para el operador de la red contar con una herramienta que cada vez que se realizara una reconfiguración en la red, se hiciera un barrido automático de las protecciones a lo largo del circuito y se cambiara el grupo de ajustes asegurando su coordinación y por ende la seguridad del sistema. El propósito del algoritmo de este trabajo es cubrir esta necesidad, se presenta una red de ejemplo en Matlab y se hacen varios cambios, a cada uno de ellos se aplica la lógica del algoritmo y se muestran los resultados priorizando conservar la coordinación de protecciones en cada uno.

4.1.2 ALCANCE Y LIMITACIONES

El algoritmo puede ser aplicado a cualquier sistema sin límite de nodos y fuentes, para todos los casos comienza desde los nodos fuente y el barrido de los equipos se realiza hacia los nodos más alejados.

Para poder aplicar el algoritmo no deben existir circuitos alimentados por dos fuentes al mismo tiempo, es decir, que dos fuentes estén paralelado, ya una premisa de su aplicación es tratar con circuitos radiales, de esta manera pueden realizarse un sin número de maniobras sobre la red origen y al finalizar cada fuente debe quedar con circuitos radiales.

El algoritmo simula la integración de restauradores electrónicos únicamente, esto es porque independientemente de la marca tienen la característica de poderse precargar grupos de ajustes independientes, mismos que con un comando remoto pueden ser cambiados.

Previo a la aplicación del algoritmo deben homologarse grupos de ajustes, ya que el algoritmo no propone cambio de tap, curva o palanca en la protección. Estos deben ser establecidos por la ingeniería de protecciones previo estudio, de manera que se

propone se establezcan los siguientes criterios en los grupos de ajustes: El *Grupo1* debe coordinar con el *Grupo2*, el *Grupo2* debe estar coordinado con el *Grupo3* y así sucesivamente hasta el *GrupoN* que será el número máximo de grupos que se pueda precargar en cada uno de los restauradores. Los grupos de ajustes ya homologados deben cargarse en la memoria de cada equipo sin importar su ubicación, es decir, en la figura 4.1 todos los restauradores tendrán precargados n grupo de ajustes, la diferencia es que estarán trabajando con un grupo diferente designado por el algoritmo para cada escenario.

4.1.3 LÓGICA DEL ALGORITMO

El algoritmo presentado se basa en un procedimiento conocido en programación como *búsqueda en profundidad* (depth-first search) y se utiliza para búsquedas ciegas en arboles de información o grafos, se encarga de recorrer todos sus nodos de manera ordenada aunque no uniforme, este método parte de un nodo a y va localizando los recorridos posibles de nodos adyacentes n y en caso de no poder continuar vuelve al punto inicial a para verificar si existen nuevos recorridos y así sucesivamente, hasta terminar con todos los vértices (nodos) en el grafo [8]. Este algoritmo tiene aplicaciones en ámbitos de inteligencia artificial, por ejemplo, en los juegos de ajedrez por computadora donde el software debe encontrar la mejor opción al mover una pieza con el objetivo de poder dar jaque mate al usuario [9] o en procesos que se han vuelto cotidianos para algunas personas como el acceder a los datos de una memoria externa, donde se debe encontrar el camino más rápido para el acceso a la información [10]. En el presente proyecto se utiliza este método para recorrer la estructura topológica de la red de distribución a partir de una fuente o subestación e ir asignando progresivamente los grupos a cada una de las protecciones aguas abajo.

A continuación se explican las variables y estructuras matriciales necesarias para la ejecución del algoritmo:

La matriz de adyacencia: Se usa para representar la relación de los nodos (vértices) contenidos en el gráfico a analizar, es una matriz de $n \times n$, donde n es el número de vértices del gráfico, para propósito de nuestro proyecto un vértice es un equipo con protección sobre la trayectoria del circuito, aquellos sobre los cuales el algoritmo realiza los cambios en las protecciones. Suponga la estructura de la figura 4.3, su matriz de adyacencia viene dada por 1's y 0's; 1 si existe relación del nodo de la fila i , con el nodo de la columna j y es 0 si no la hay.

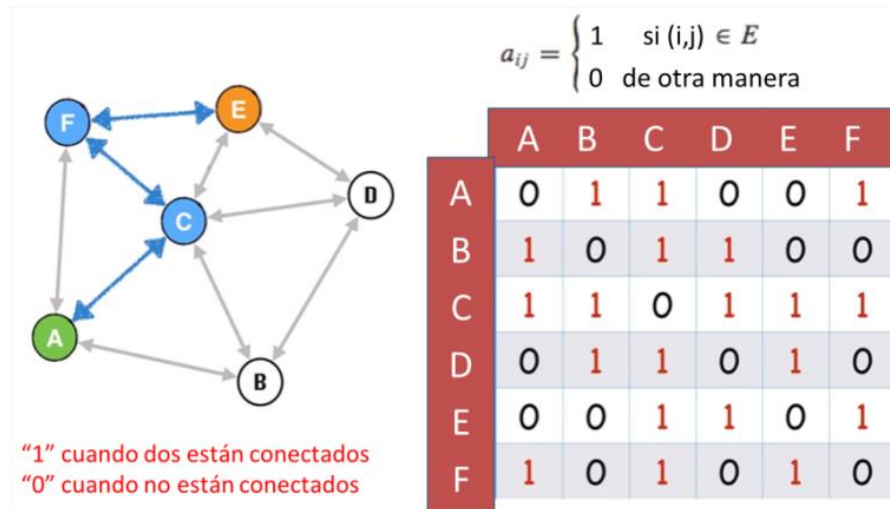


Figura 4.3: Matriz de adyacencia

Matriz de visita: El principio fundamental de una búsqueda por profundidad consiste en verificar si un nodo ha sido analizado o no, para esto existe una matriz vinculada a cada vértice llamada *de visita*, con una longitud $1 \times n$ que, básicamente es un vector donde se colocan banderas en los nodos que se van analizando, al inicio todos sus valores son ceros, cada vez que el algoritmo va haciendo el recorrido marca el nodo a analizar con un 1, indicando que el nodo ha sido visitado, esto evita que un nodo y sus ramificaciones sean revisados más de una vez.

Matriz de grupo de ajuste: A diferencia de otros métodos de búsqueda, la búsqueda en profundidad se encarga de analizar todos los nodos que se encuentren *delante* del nodo que está siendo analizado, antes que los que están a su mismo nivel, esta manera de explorar un grafo es más parecida a la naturaleza de las redes de distribución donde la forma de alimentar la carga es idealmente radial, por eso su elección como el algoritmo a utilizar. Se utiliza una variable como contador de grupos, esta se incrementa cada vez que se avanza un nivel de profundidad en el árbol topológico, estos cambios se guardan en un vector ligado a cada vértice del sistema, que es la matriz de grupos de ajuste de longitud $1 \times n$. Estos grupos están basados en una homologación que se menciona en la sección 4.5.1.

Pila: Es una estructura de datos de acceso restrictivo, en la cual el último elemento en entrar es el primero en salir. Solo se tiene acceso al elemento de la cabeza de la pila por eso se conoce como una estructura LIFO (*Last In, First Out*). En el presente proyecto la pila se utiliza para ir guardando la posición del nodo en el nivel de la búsqueda, es decir, cada que se inicia una búsqueda en un nodo este se coloca en la pila, si se llegara a encontrar otro nodo delante de este, ahora este pasaría a la última posición de la pila y así sucesivamente, se irán liberando las posiciones de la pila, cada vez que en un nodo se terminen de revisar todos los adyacentes.

La estructura básica de la búsqueda por profundidad es la siguiente:

1: DFS-Visit (<i>Ady</i> , <i>s</i>)	
2: For $v \in \text{Ady}[s]$	donde:
3: If <i>visitado</i> [<i>v</i>] no visitado	<i>v</i> : vértice o nodo
4: <i>visitado</i> [<i>v</i>] marca como visitado	<i>s</i> : nodo fuente
5: DFS-Visit (<i>Ady</i> , <i>s</i>)	<i>Ady</i> : matriz de adyacencia

El pseudocódigo muestra una función que se encarga de visitar todos los vértices definidos en la matriz de adyacencia a partir de un nodo definido como fuente (fila 2), de esta manera, si el nodo a analizar no está marcado como visitado, entonces, marca como visitado (fila 4) y analiza recursivamente dicho nodo (fila 5). Para realizar esta acción debe definirse e inicializarse en ceros el vector *visitado*[*n*] antes de comenzar el proceso. El hecho de marcar como visitado un nodo asegura que solo se visiten aquellos vértices que no han sido marcados y así continuar analizando el grafo recursivamente, si se llegara a encontrar algún nodo que ha sido visitado simplemente se omite su análisis. Este parte del algoritmo no visita por completo la red, solamente aquellos nodos que están conectados al nodo fuente *s*, por lo que a este pseudocódigo debe agregarse a un ciclo principal en el cual se definan los nodos fuentes que para propósito del proyecto serán las subestaciones que alimenten a los circuitos de distribución, de esta manera se visitaran todos los nodos conectadas a todas las fuentes que es la totalidad del sistema.

Con estos conceptos tomaremos una parte de la red de estudio del presente proyecto (la red completa se describe en la sección 4.1.4) para ampliar la vista del funcionamiento el algoritmo. El primer paso es definir la matriz de adyacencia e inicializar las variables definidas previamente, esto se realiza en la figura 4.4.

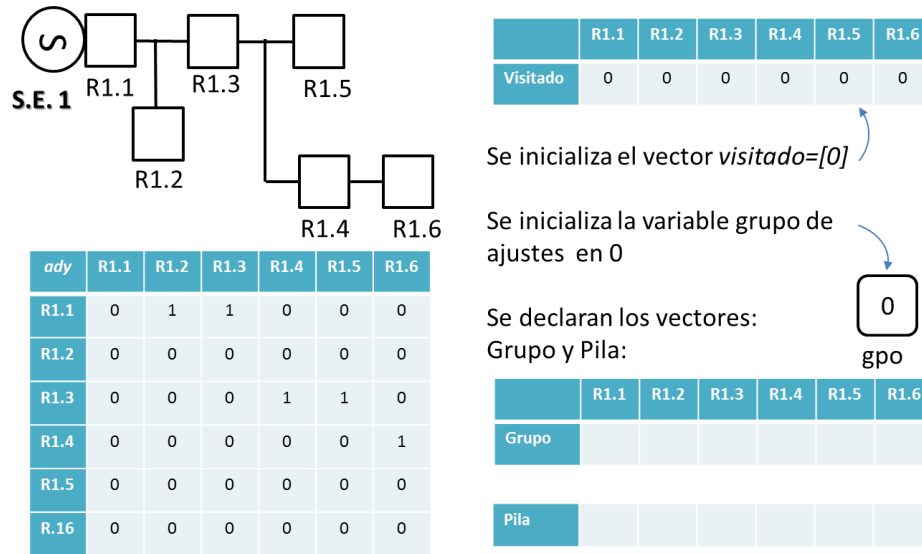


Figura 4.4: Matriz de adyacencia e inicialización de variables del algoritmo

El objetivo del algoritmo es llenar el vector $grupo[n]$ mediante un ciclo recursivo que comienza a partir de las fuentes y termina cuando se visita la última rama del árbol topológico. En la figura 4.4 comienza de R1.1 y se termina en R1.6, la forma de realizarlo se explica en las siguientes figuras.

Como se observa en la figura 4.5, se comienza asignando el nivel 0 al primer equipo, que es el valor con el cual se inicializó la variable gpo en la figura 4.4, esta se asigna a la primera posición del vector $grupo[1]$ que corresponde a R1.1 (que es el relevador de la subestación).

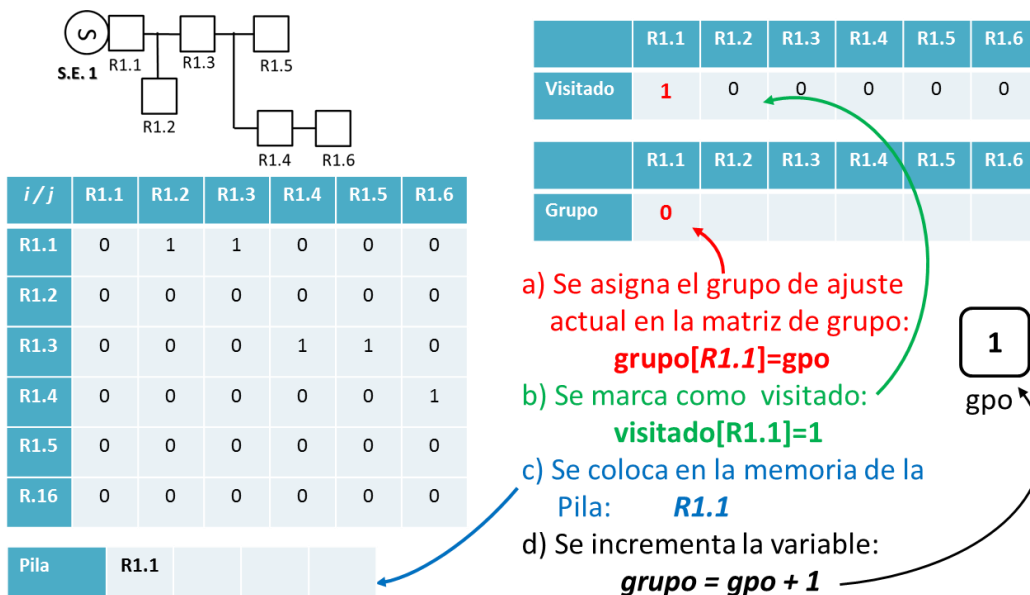


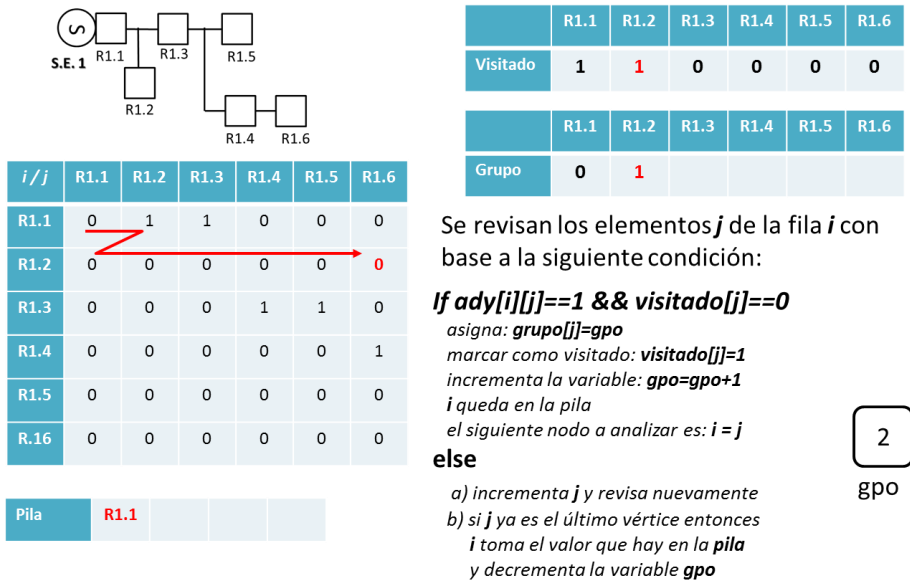
Figura 4.5: Pasos de inicio del algoritmo

Una vez asignado $grupo[R1.1]$, se marca la posición de R1.1 en el vector de visita; $visitado[R1.1] = 1$ y se incrementa la variable; $gpo = gpo + 1$, con el objetivo de revisar el siguiente equipo. El nodo que está siendo analizado se encuentra en la pila y no se libera hasta que se revisan con todos sus nodos adyacentes.

La ruta que traza el algoritmo sobre la matriz de adyacencia para la revisión cambia dependiendo de la topología de la red y esta obedece a la sentencia de comparación mostrada en la figura 4.6. El procedimiento básico del algoritmo consiste en realizar un barrido de las columnas j estando posicionado en una casilla i (fila), pero se detiene a revisar cada nodo que cumple la condición, tomando ahora la variable i la nueva posición, es decir, como si brincara de una fila a otra en la matriz de adyacencia cada que encuentra un nodo con el que hay conexión, y guardando en la pila la posición desde donde se brincó. Los valores de la pila los va tomando cada vez que se llega al valor límite de la revisión de columnas, es decir, cada vez que se llega a R1.6, que significa que ya se han revisado todos los nodos adyacentes del nodo actual .

En la figura 4.6 está marcado con rojo parte del camino que el algoritmo realiza para la revisión de la red mostrada, la cual se explicara a continuación:

- Como se definió, el algoritmo comienza desde la fuente, por lo que el primer valor de i corresponde a R1.1, se asigna su grupo de ajustes en 0 y se marca como visitado, este es el valor actual que tiene la pila en estos momentos.
- De ahí el contador de columnas j va desde R1.1 hasta R1.6, con esto se asegura que se revisen todos los nodos vinculados con el relevador de la subestación, así, el primer valor a validar por el algoritmo es el ubicado en la posición $ady[R1.1][R1.1]$ y como este es 0, entonces se incrementa j en 1.
- El segundo valor a revisar es $ady[R1.1][R1.2]$ y este es 1, la segunda condición a validar es que este no haya sido visitado, pero como únicamente se ha marcado a R1.1 como visitado, se cumple con la condición especificada en la figura 4.6, por lo que se incrementa la variable gpo en 1 y se asigna este valor en el vector $grupo[R1.2]$, se marca en el vector de visita a la posición de R1.2 y se asigna a $i=R1.2$ como el siguiente valor a analizar, esto hace que la pila ahora tenga dos valores: R1.1 y R1.2.
- Como $i=R1.2$, se resetea el contador j para que vaya desde R1.1 hasta R1.6, observe que todos los valores de la fila R1.2 en la matriz de adyacencia son ceros, lo que significa que no tiene relación hacia delante con otros nodos, como se puede confirmar en el diagrama de la red, se ha llegado entonces al final de la revisión de la fila R1.2 por lo que se libera de la pila y se regresa a continuar con el análisis de la fila R1.1 que es el último valor ahora.



Se revisan los elementos *j* de la fila *i* con base a la siguiente condición:

```

if ady[i][j]==1 && visitado[j]==0
  asigna: grupo[j]=gpo
  marcar como visitado: visitado[j]=1
  incrementa la variable: gpo=gpo+1
  i queda en la pila
  el siguiente nodo a analizar es: i = j
else
  a) incrementa j y revisa nuevamente
  b) si j ya es el último vértice entonces
     i toma el valor que hay en la pila
     y decrementa la variable gpo

```

2

gpo

Donde: *i* – índice filas, *j* – índice columnas

Figura 4.6: Camino para revisión de la matriz de adyacencia

El algoritmo continúa así la revisión de la matriz de adyacencia con esta misma lógica, llenando el vector *grupo*[], hasta que se llega al punto donde no quedan más nodos porque todos han sido visitados y revisados.

Desde el punto de vista del usuario lo primero que hace el algoritmo es leer un archivo de entrada donde debe estar establecido el número de fuentes, nodos, circuitos, enlaces, equipos y todas las características del sistema, posteriormente lee otro archivo en el cual debe estar especificado el número de cambios en el sistema, es decir, cierre y aperturas. A partir de estos archivos se arma el árbol del sistema comenzando desde las fuentes y tomando en cuenta los cierres y aperturas, el algoritmo se encarga de ir asignando los grupos de ajustes a cada equipo, la lógica resumida del algoritmo se muestra en la figura 4.7.

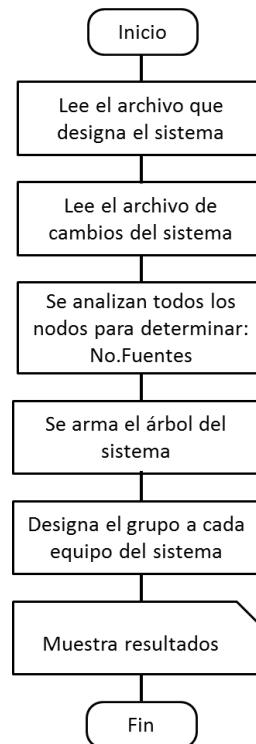


Figura 4.7: Diagrama general del algoritmo

Básicamente existe un número n de fuentes y un número m de nodos para cualquier red, el algoritmo puede aplicarse a cualquier red, lo único que se necesita es establecer un archivo de entrada para la red y un archivo para los cambios que se realizarán en los equipos, es decir, aperturas y cierres, estos archivos y su formato se explicarán en la siguiente sección.

El código del programa se encuentra en el Anexo 2 y consta de dos funciones; *procesa.m* e *interfaz.m*, el primero es el código en el cual se realiza la lectura de los archivos de entrada, la asignación de grupos y se genera el archivo de salida, el segundo archivo se refiere a la interfaz gráfica generada por el GUI de Matlab [11].

4.1.3.1 FORMATO DE LOS ARCHIVOS DE ENTRADA PARA LA EJECUCIÓN DEL ALGORITMO

El algoritmo presentado está realizado en Matlab, para su ejecución debe hacerse referencia a tres archivos de texto, uno con la estructura de la red, otro con los cambios a ejecutarse y el último archivo es creado por el programa y en él se despliegan los resultados, a continuación se describen los formatos que deben tener los archivos de entrada y como queda el archivo de salida.

- **Archivo del sistema original:** Este archivo especifica la red de estudio, el primer renglón define el número de equipos del circuito n ; la cantidad de las líneas subsecuentes debe ser igual a n , en automático el programa la asocia con el equipo correspondiente, es decir, la segunda línea del archivo corresponderá con la descripción del equipo 1, la tercera a la del equipo 2 y así sucesivamente. En cada

fila la descripción del equipo debe realizarse con números separados por un espacio, donde el *primero* es 0 o 1 e indica el estado inicial del equipo (abierto o cerrado); el *segundo* se refiere al grupo de ajustes del equipo, el tercero corresponde al número de elementos con los que tiene una conexión física, del *cuarto* en adelante hacen referencia a dichos elementos con los que se tiene la conexión, no importando si son abiertos o cerrados. Cualquier sistema puede representarse con este formato, la red de estudio del presente trabajo se especifica como lo indica la figura 4.5.

```

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

```

Figura 4.8: Archivo de texto con el formato que designa la red de estudio

- **Archivo de cambios en el sistema:** Es el archivo con los cambios que se realizarán a la red, el formato debe ser el siguiente: la primera línea contiene un número m que indica la cantidad de cambios, en las siguientes m líneas una cifra indicando el equipo que cambia de estado, no es necesario especificar la condición en la que queda, ésta será la contraria a la descrita en el archivo de entrada del sistema original.
- **Archivo de salida:** El programa genera un archivo de texto en el cual se despliega la red y se especifica el grupo final con el cual debe ajustarse cada equipo para conservar la coordinación de protecciones, la figura 4.6 muestra un ejemplo del resultado en la cual se puede observar en la segunda columna los nuevos grupos después de la aplicación del algoritmo:

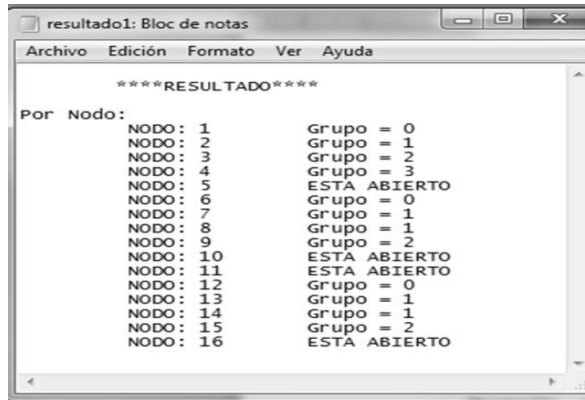


Figura 4.9. Archivo de texto creado como resultado de la aplicación del algoritmo

En el capítulo 5 se presentan ejemplos con la red de estudio y se compararan los cambios en las protecciones sin aplicar el algoritmo propuesto y posteriormente usándolo, priorizando para cada caso las diferencias y mejoras que se obtienen de resultado.

4.1.4 RED DE ESTUDIO

Para la aplicación y demostración del algoritmo se utiliza una red de prueba, esta se obtuvo de la emulación de circuitos reales operando en la red de Puebla y cuenta con los nodos necesarios para realizar diferentes pruebas que permitan aplicar el algoritmo. No tiene un nombre asignado y está formada por tres subestaciones en diferentes lugares, un circuito por cada fuente y diferentes equipos a lo largo de cada uno. Por cuestiones de seguridad de los circuitos involucrados no se incluyen las nomenclaturas reales, ni direcciones de los equipos.

La red de prueba en estado inicial se muestra en la figura 4.7, el estado cerrado de un interruptor/restaurador se muestra de color rojo y abierto de color verde, así, se puede observar que cada fuente tiene un circuito alimentado de forma radial con uno o más equipos abiertos que sirven de enlace con otro circuito.

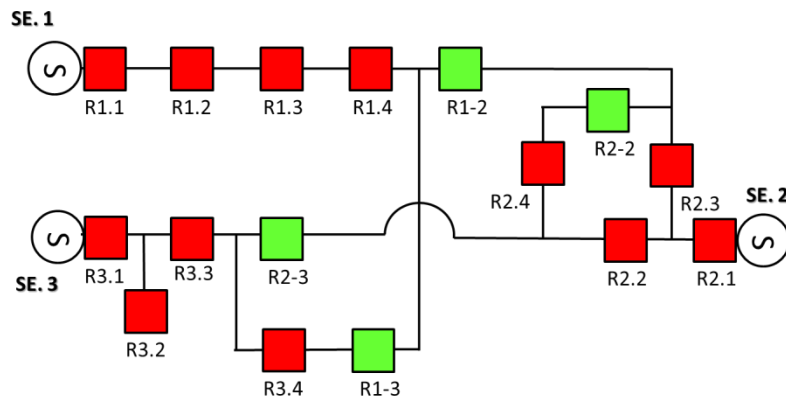


Figura 4.10. Red de prueba para la aplicación del algoritmo en estado inicial (sin alguna reconfiguración)

La red de estudio mostrada es la descrita en el formato de entrada del código de la figura 4.5 (sección 4.1.3.2), y es la que se define para la aplicación del algoritmo.

4.1.5 AJUSTE DE PROTECCIONES

Una de los puntos necesarios para el buen funcionamiento del sistema es la configuración de las protecciones, ya sea antes o después de ser aplicado el algoritmo propuesto, esta configuración debe realizarse por el departamento especializado en el ámbito asegurándose de analizar cada una de las opciones de reconfiguración y dejando debidamente establecidos los grupos de protecciones. La propuesta en este trabajo es homologar grupos de ajustes coordinados entre sí para la red de estudio tomando como valor característico el pick up en cada uno.

Las siguientes consideraciones son aplicables únicamente a la red de este proyecto y es la manera en la cual el algoritmo realiza las modificaciones de las protecciones, dicho reajuste pudiera ser de otra manera, sin embargo, para hacer más notorio el cambio en la protección realizada por el algoritmo se toma el pick up como valor característico de cada grupo y éstos se definen a continuación:

Grupo 0: Es el grupo de ajustes con el valor de ajuste límite para un circuito de distribución, en la práctica generalmente está colocado en el relevador que protege un circuito y coordina con el relevador de baja tensión del transformador en la subestación, para la red de estudio se establece un valor de corriente primaria de pick up de 480 amperes.

Grupo 1 - 4: Es el grupo de ajustes según corresponda, coordinado con el grupo anterior o posterior, es decir, después de asignar el grupo 0 el algoritmo continuará estableciendo los grupos 1, 2, 3 y 4 según el nivel que le corresponda en el arbolado de la topología resultante, cada uno coordinado con el del nivel superior, el valor que diferencia a cada uno es el pick up de acuerdo a como se muestra en la tabla de la figura 4.8:

Número de Grupo	Pick up de fase y neutro de la protección (referenciado al primario en amperes)	
0	480	170
1	440	154
2	400	140
3	360	126
4	320	112

Figura 4.11. Pick up característicos de cada grupo de ajustes

El límite del número consecutivo del grupo se establece en cuatro en este proyecto debido a que; es el número máximo que generalmente (dependiendo de la marca) tienen disponibles los restauradores electrónicos. Si llegaran a quedar más de cuatro

equipos en serie, el algoritmo designa el último grupo disponible en el equipo y con recierre bloqueado, así, en el peor de los casos al haber una falla, operarían los restauradores con el mismo grupo y quedarán abiertos los que tienen recierre bloqueado. Pudiendo el operador de la red energizar tramo por tramo o dejar fuera aquel donde se inició el disturbio. Este número de grupos puede incrementarse en el algoritmo sin ningún inconveniente, por ejemplo; para su implementación futura si se tuvieran equipos con más grupos de ajustes disponibles.

Los valores para los instantáneos no están homologados y se ajustan particularmente a cada equipo de la red de estudio, esta ha sido simulada en el programa Aspen OneLiner [12], básicamente cada equipo de la red tiene cargados 2, 3 o los 4 grupos de ajustes y al realizar la reconfiguración, se hace la corrida de protecciones únicamente con el grupo activada por el algoritmo, teniendo deshabilitados los grupos restantes, como ejemplo se muestra a R3.4 en la figura 4.9, observe que sólo las curvas de neutro y de fase pertenecientes al grupo 2 (G2) están habilitadas.

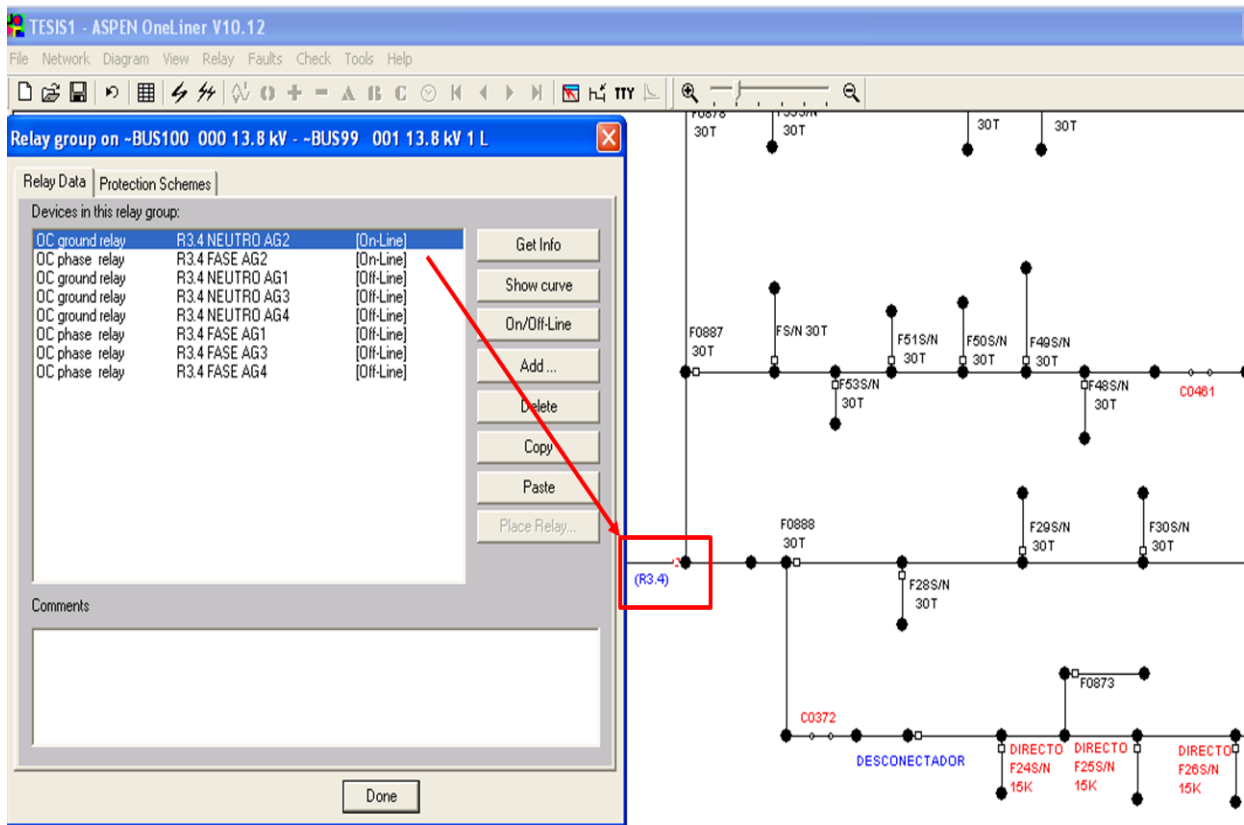


Figura 4.12: Grupos de ajustes designados en Aspen para los equipos de la red de estudio

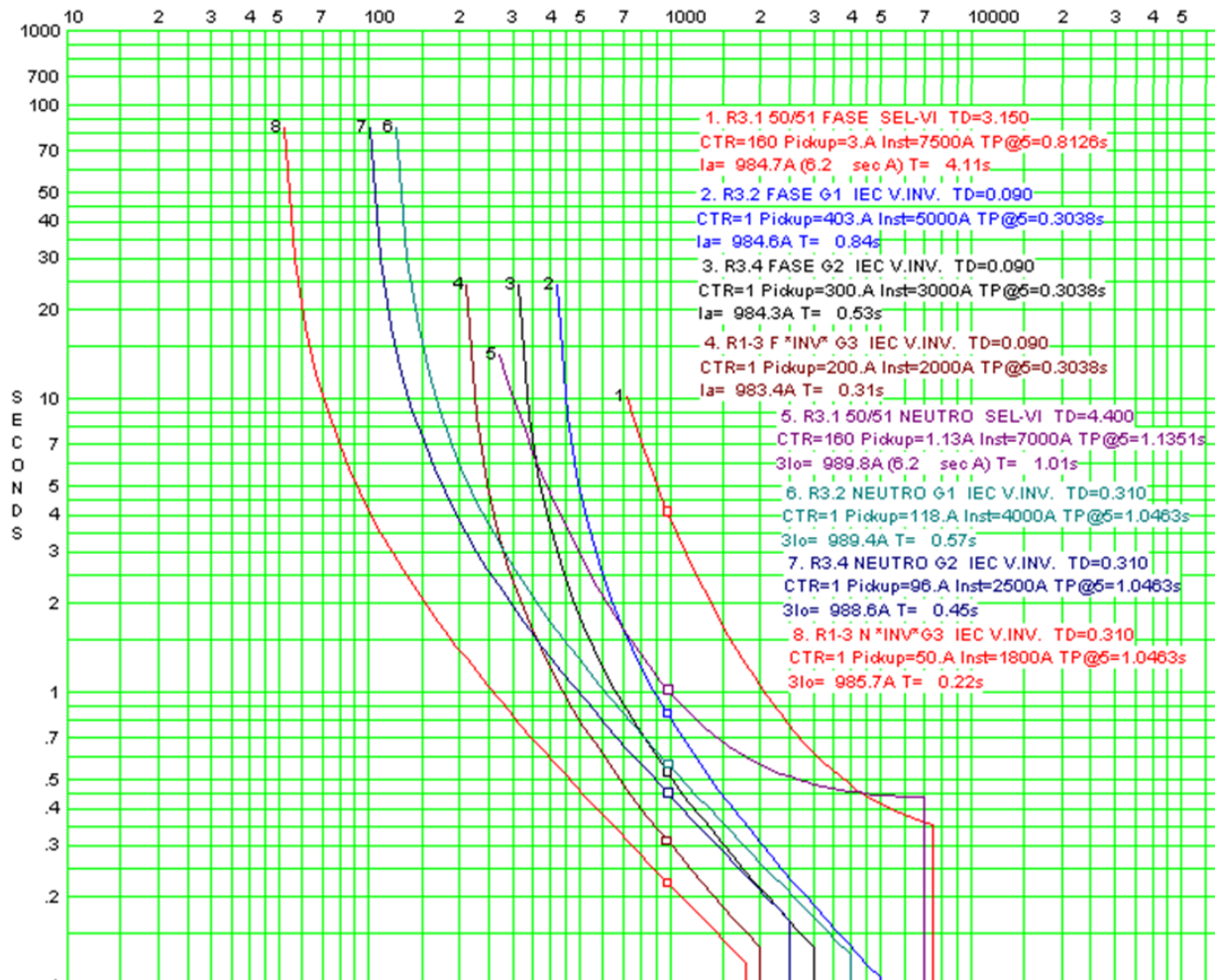


Figura 5.2: Curvas de coordinación sin la aplicación del algoritmo para el ejemplo 1

Con la nueva red se simula una falla en las boquillas del último equipo con protección habilitada que para este caso es R1-3 (sin la aplicación del algoritmo) ya que observe no aparecen las curvas de R1.2, R1.3 y R1.4, la razón es porque para esta configuración, el departamento de protecciones a cargo de estos circuitos tomó el criterio que sólo el equipo de enlace queda con protección bidireccional, los equipos restantes actúan como desconectores bloqueándose su protección al detectar un cambio en el flujo convencional de corriente. Hasta este punto se advierte que existe una correcta coordinación con las protecciones involucradas en esta nueva configuración. A continuación, obsérvese los siguientes puntos:

1.- El ajuste de pick up de R1-3 (último equipo con protección habilitada) es de 200 Amp para fase y 50A para neutro, lo que podría no ser conveniente para establecerlo en otra red, ya que se puede comprometer la carga sobre todo en horarios de demanda máxima.

2.- El hecho de que sólo el equipo de enlace tenga habilitadas las protecciones, compromete a todo el circuito de la subestación 1, ya que una falla en cualquier punto afectara temporal o permanentemente a todos los usuarios del circuito.

3.- Por último, observe en la figura 5.2 los tiempos de operación entre restauradores y el relevador en la subestación, tienen un margen de operación mayor a 0.3s para el neutro y casi 3 segundos para el de fase, lo cual podría aprovecharse para reajustar las curvas de todos los equipos y establecer la bidireccionalidad en todos obteniendo una red más selectiva a fallas.

Ahora se aplican a los equipos de la red los grupos obtenidos de la ejecución del algoritmo, los resultados se muestran en la figura 5.3:

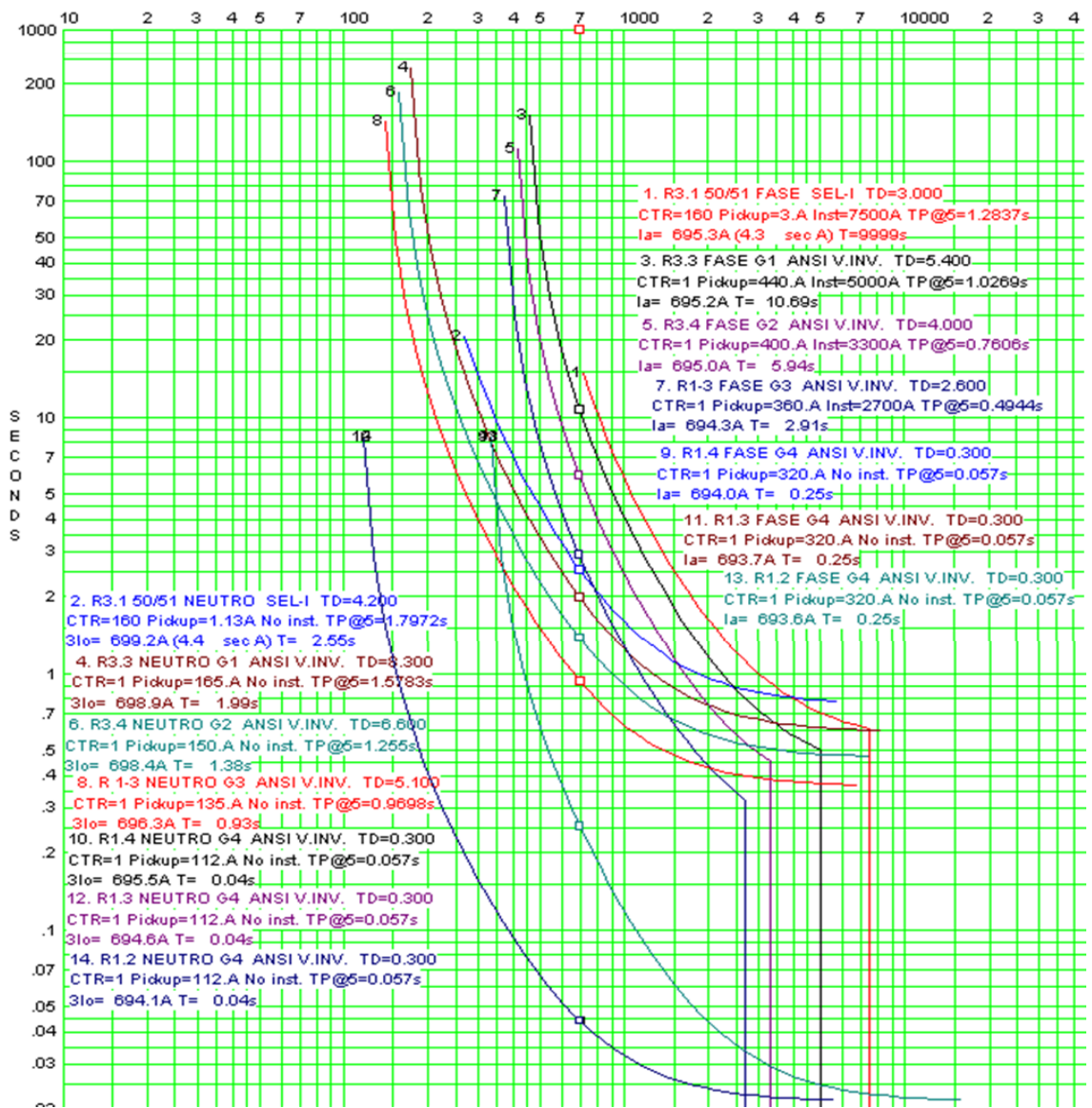


Figura 5.3: Curvas de coordinación con aplicación del algoritmo para el ejemplo 1

Comparando ambas coordinaciones se puede observar que:

1.- En la reconfiguración (figura 5.1) del circuito original de la figura 4.7, se tiene un total de siete equipos en serie de los cuales, cinco quedan coordinados entre sí con la aplicación del algoritmo; R3.1, R3.2, R3.4, R1-3 y R1.4, esto es debido a la homologación de los grupos de ajustes descritos en la sección 4.1.5, observe que los ajustes dados para las curvas 51F y 51N, coinciden con los mostrados en la propuesta de homologación de la figura 4.8, con esto se asegura la selectividad al ocurrir una falla a lo largo del circuito, los dos equipos restantes (R1.3 y R1.2), tienen el último grupo de ajustes, es decir, el grupo 4 y quedan con recierre bloqueado, de esta manera al haber un disparo delante de estos queda seccionada la falla y el equipo detrás entra con recierre. No se puede realizar la coordinación de estos dos equipos, como se hizo con los anteriores por varios motivos:

a) La mayoría de restauradores electrónicos tienen el límite de 4 grupos de ajustes.

b) En algunos casos los tiempos de coordinación, ya no son suficientes para agregar otra curva.

b) Los ajustes son probados para todas las configuraciones posibles, lo que significa que si se tratara de cerrar la coordinación para los últimos equipos para esta configuración, posiblemente en otra se terminaría alterando, por lo que, para cualquier caso es preferible tener equipos que disparen al mismo tiempo y dejen seccionada la falla, a que uno no opere brincándose la falla al siguiente equipo por la pérdida de coordinación, que en resumen es lo que más se presenta en las redes de distribución al realizarse reconfiguraciones provisionales, poniendo el riesgo al personal que trabaja sobre la línea.

2.- El ajuste de arranque de la última protección es de 320/112 amp para 51F/N a diferencia 200/50 amp que se tenía sin la aplicación del algoritmo, lo que da un buen margen para el respaldo de carga en cualquier demanda.

3.- Se sigue conservando la coordinación entre todos los equipos ya que existe un margen mayor a 0.2s entre curvas.

Por lo que se puede concluir que para este caso, la aplicación del algoritmo presenta ventajas significativas sobre la configuración inicial del circuito.

5.2.2 RESPALDO ALTERNO DEL CIRCUITO DE LA SUBESTACION 1

En la red de la figura 5.4, se muestra una forma alterna de respaldar la carga del circuito de la subestación 1, esta puede presentarse cuando por alguna condición el respaldo principal (presentado en el ejemplo anterior) no pueda realizarse, por ejemplo, por sobrecarga sobre el transformador o el circuito de la subestación 3, conductor no disponible entre el tramo R1-3 y R1.4, o como en este caso simularemos la indisponibilidad del equipo R1-3 por daño.

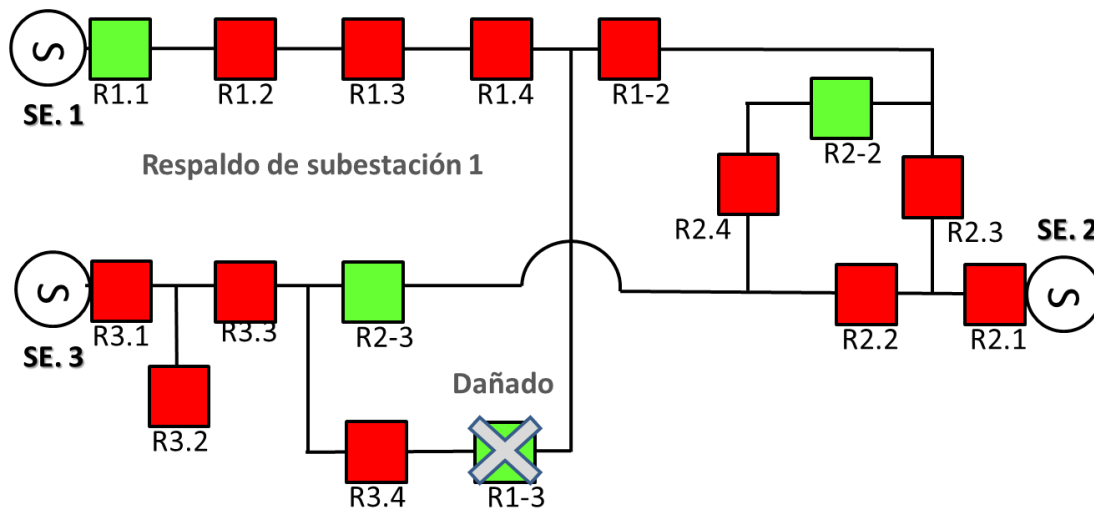


Figura 5.4: Respaldo alterno del circuito de la subestación 1 realizado por R1-2

El circuito de la subestación 2, se utiliza de respaldo para la carga del circuito de la subestación 1 a través de R1-2 como se observa en la figura 5.4, en la figura 5.5, se muestra la hoja de coordinación resultante en la red sin la aplicación del algoritmo con una corriente de falla simulada delante del último equipo con protección, que corresponde a R1-2 (equipo de enlace); los dispositivos después de éste, quedan con la protección bloqueada simulando las políticas regionales en esos circuitos. Una de las desventajas es que; al presentarse una falla en el circuito 1 se compromete la continuidad de todos los usuarios del mismo, la causa de esto es porque únicamente se tienen tres elementos coordinados entre sí; R2.1, R2.3 y R1-2, como se muestra la figura 5.5.

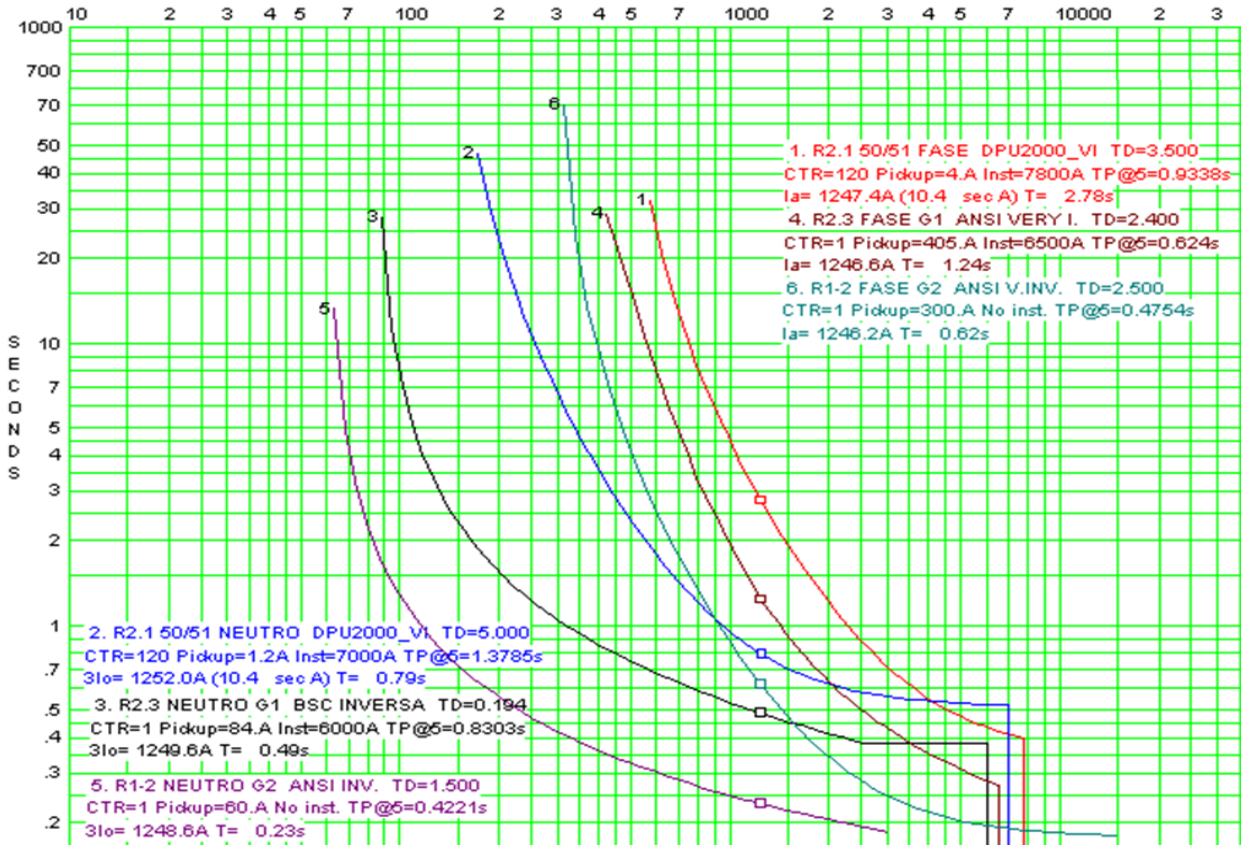


Figura 5.5 Curvas de coordinación por respaldo alterno sin la aplicación del algoritmo

Se aplica ahora a la red de la figura 5.4, el algoritmo y la homologación de ajustes propuestos en este proyecto, con lo cual se obtiene una nueva coordinación en las protecciones de sobrecorriente, los nuevos grupos asignados por el algoritmo son visibles en la figura 5.6 que se muestra a continuación y la hoja de coordinación de estos en la figura 5.7 de la siguiente página.

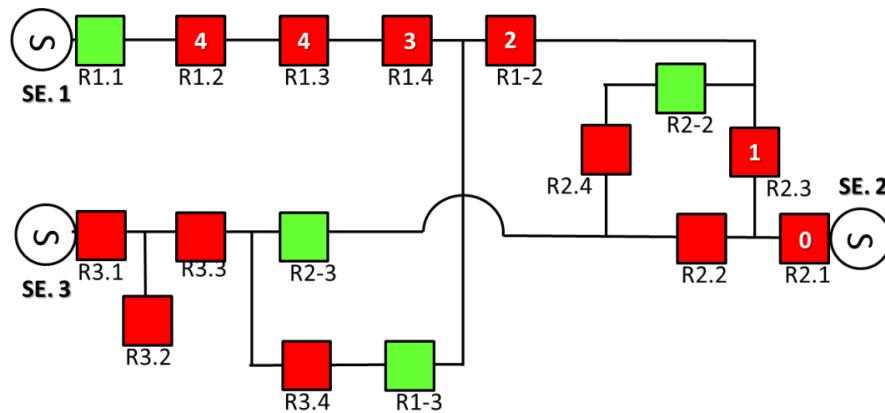


Figura 5.6: Grupos de ajustes asignados por el algoritmo para el respaldo alterno del circuito de la subestación 1

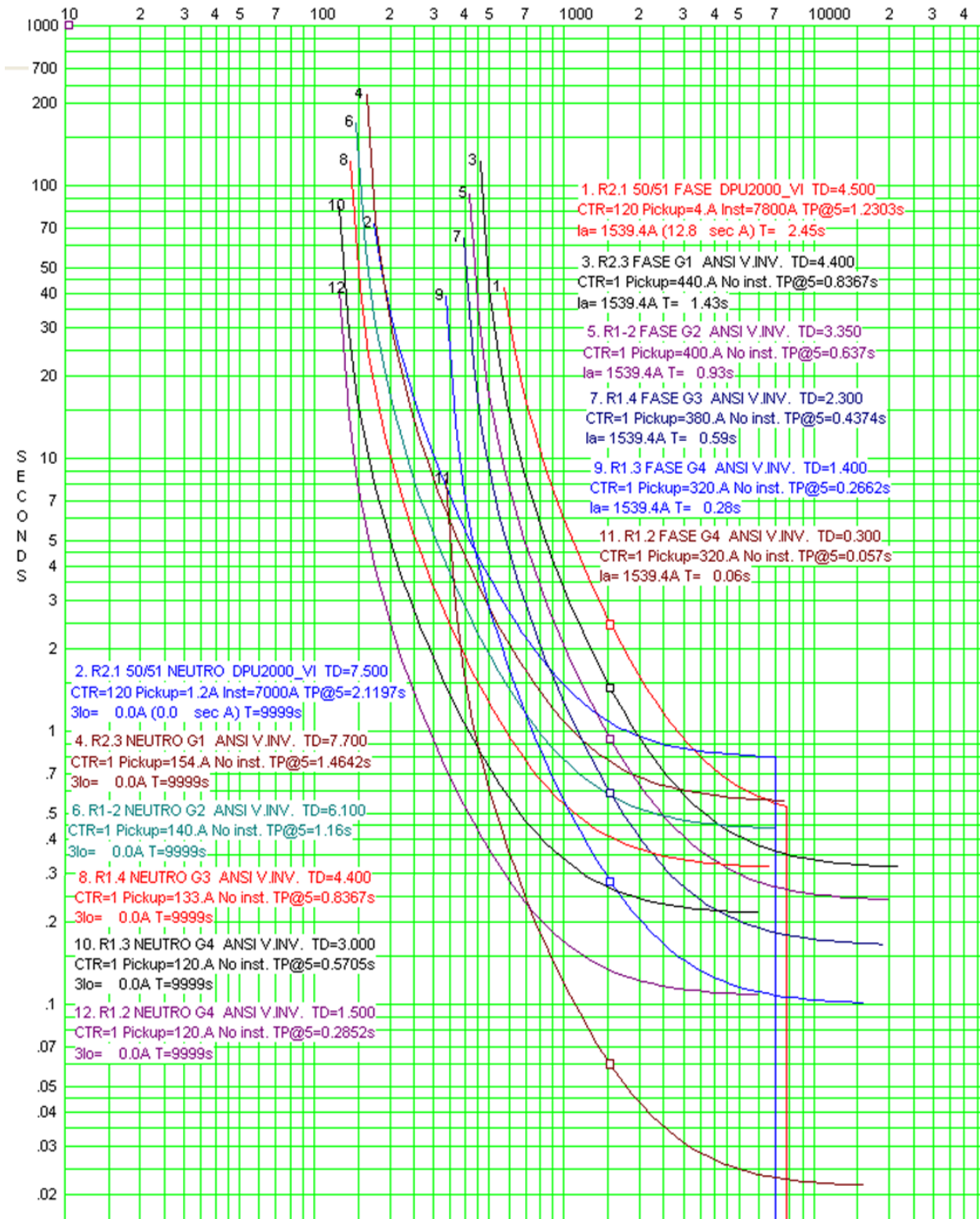


Figura 5.7 Curvas de coordinación por respaldo alterno con la aplicación del algoritmo

La principal ventaja de este reajuste de protecciones, es que las curvas de los equipos están más cerradas que en el ajuste sin la aplicación del algoritmo y aun así conservan la coordinación, no obstante se tienen seis equipos contando al relevador de la subestación como lo muestra la figura 5.6, adviértase que entre cada una de las curvas de neutro y fase de la figura 5.7 existe un tiempo mínimo de operación de 0.2s respectivamente.

El hecho de llegar al límite de grupos permisibles significa que el grupo 4, es asignado a los últimos dos equipos (R1.3 y R1.2), nótese que el Tap de ambos es el mismo tanto para las curvas de fase como las de neutro (siendo este el indicador característico en este proyecto) y para conservar la coordinación tienen diferente palanca de tiempo. Comparando las figuras 5.5 (sin aplicación del algoritmo) y 5.7 (con la aplicación) se observan claramente las ventajas ya que de tener sólo tres equipos coordinados se logran aumentar a cinco, respetando el tiempo de seguridad entre equipos.

Ahora bien, en el análisis de los dos casos de respaldo del circuito 1, el algoritmo se muestra superior reajustando y conservando la coordinación de todos los equipos de la red reconfigurada.

5.2.3 SEGUNDO RESPALDO ALTERNO DEL CIRCUITO DE LA SUBESTACIÓN 1

La figura 5.8 muestra una variante más para el restablecimiento en caso de falla del circuito de la subestación 1, esta vez el respaldo es por la subestación 2 a través de R2-2. Con esta configuración quedan ocho equipos en serie contando el relevador de la subestación 2. Se comentó en el capítulo 4 que la mayoría de los datos se tomaron de una red donde únicamente los enlaces tienen habilitada la protección bidireccional, para este caso se tienen dos dispositivos como enlaces los cuales quedan en serie, los ajustes de la red sin la aplicación del algoritmo se muestran las hojas de coordinación de la figura 5.9.

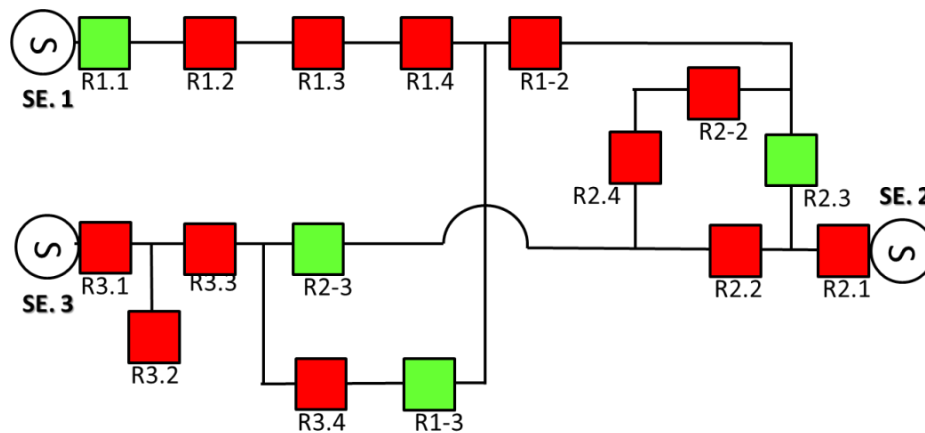


Figura 5.8: Segundo respaldo alterno del circuito de la subestación 1 por R2-2 y R1-2

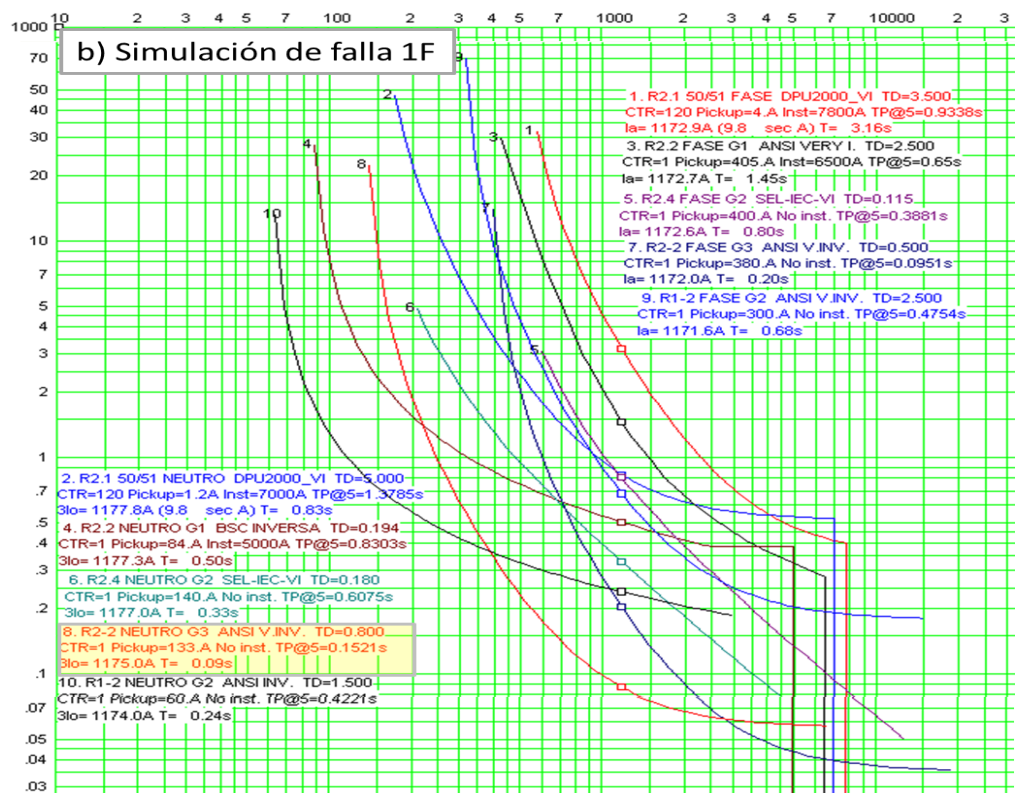
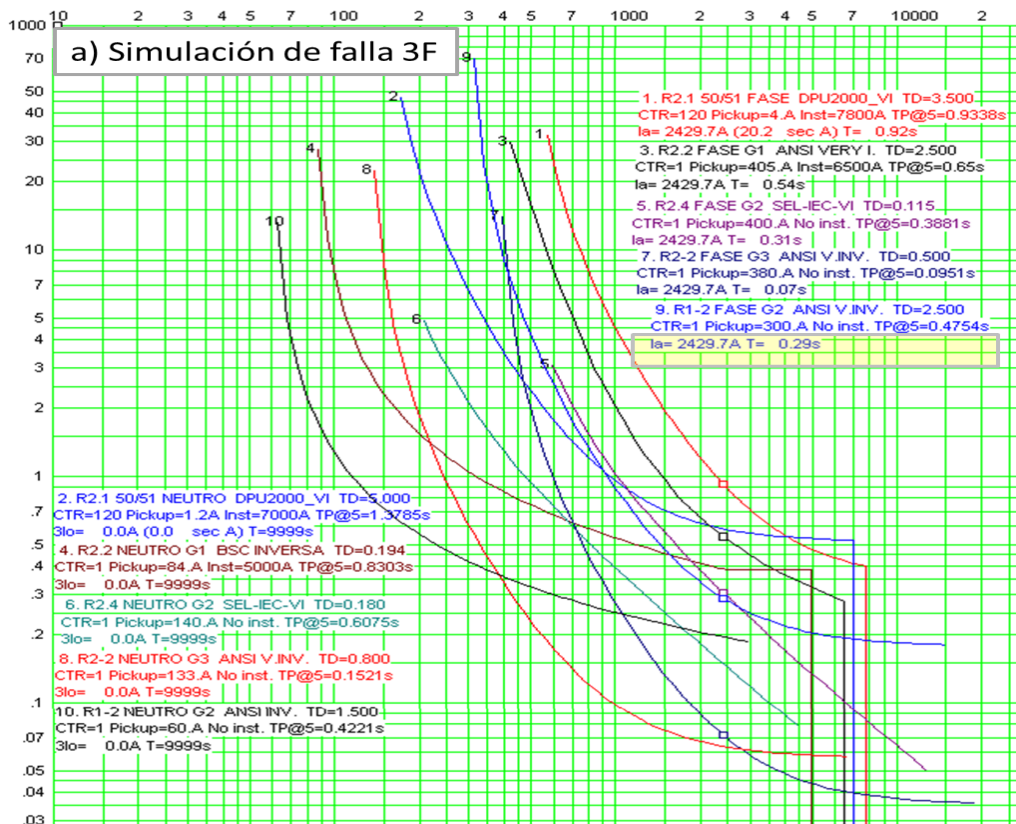


Figura 5.9: Curvas de coordinación por 2° respaldo alterno sin aplicación del algoritmo

En la figura 5.9a se simuló falla delante del último equipo con protección (R1-2), nótese que se pierde la selectividad en la operación de los equipos ya que ante una falla de fase a tierra delante de R1-2 primero opera R2-2 y 0.48 segundos después opera R1-2 como lo muestran las curvas de la figura 5.9b, esto se debe a que para la corriente de falla en el punto indicado el tiempo de operación de R2.2 es 0.2s y para R1-2 es 0.68s. Ahora bien, se tendría la idea que se dejaron mal ajustados dichos equipos y que una revisión en la coordinación sería suficiente, sin embargo, observe las siguientes configuraciones mostradas en la figura 5.10, en éstas se tiene que R2-2 se encuentra respaldando alguna parte de la red y lo más importante es que para cada una de estas se necesitaría de un ajuste diferente para R2-2, sin mencionar a los demás equipos.

En la figura 5.10a, se tiene a R2-2 alimentado desde la subestación 3 y es el cuarto equipo de protección, por otro lado en la figura 5.10b se tiene una configuración menos probable pero aun así posible, en la que R2-2 está alimentado por la subestación 1 y es el octavo equipo de protección.

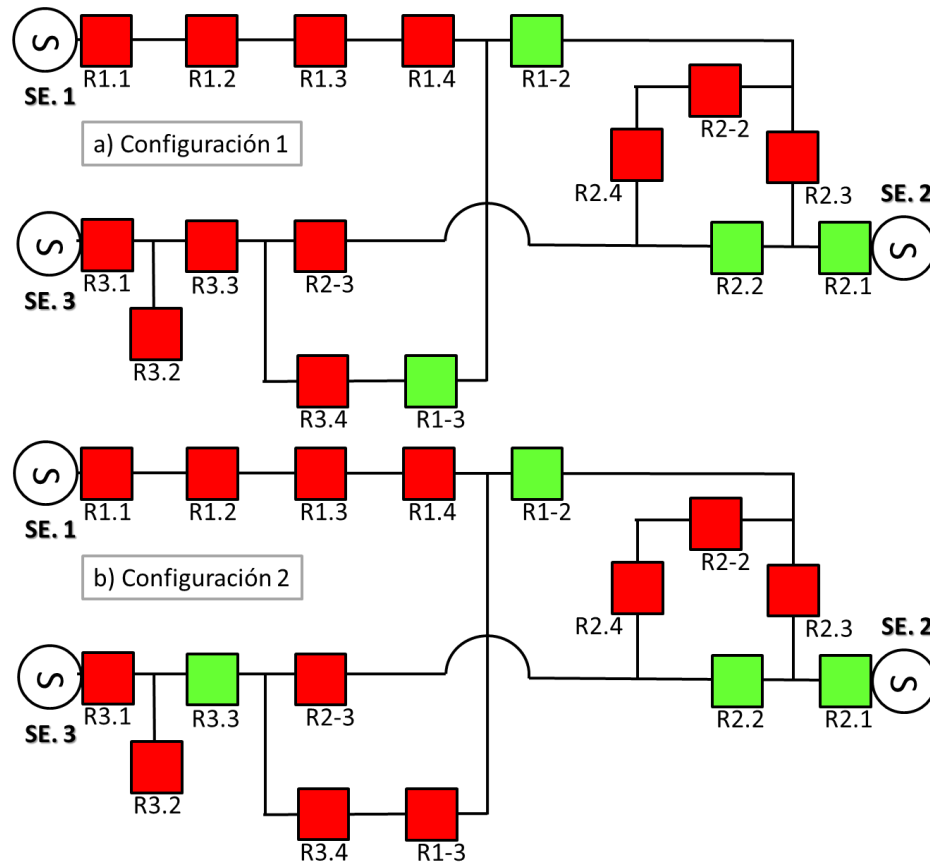


Figura 5.10: Ejemplos de configuraciones donde interviene R2-2.

No es necesaria mostrar la hoja de coordinaciones de cada configuración para observar que en ambas los ajustes de las protecciones deberán ser diferentes para R2-2, ahora bien, sumando a este hecho la configuración de estudio en la figura 5.9, ya tenemos

tres ajustes diferentes para un mismo equipo en un único sentido de corriente, algo que no es posible tener actualmente con las herramientas propias de cada restaurador, sin importar la marca, ya que cada equipo es autónomo en su operación o en el mejor de los casos coordinado con otro. No existe lógica que realice estos cambios en la red, así pues, el realizar una coordinación en un escenario creará conflicto en otros, ya que los equipos por si solos no son multiadaptables en sus ajustes, lo que crea un conflicto en una red dinámica como es la media tensión, en la cual se pudieran presentar los tres escenarios anteriores en un solo día.

Ahora bien, aplicando el algoritmo propuesto a la figura 5.8 obtenemos como resultado para cada equipo un grupo de ajustes los cuales son mostrados en la figura 5.11.

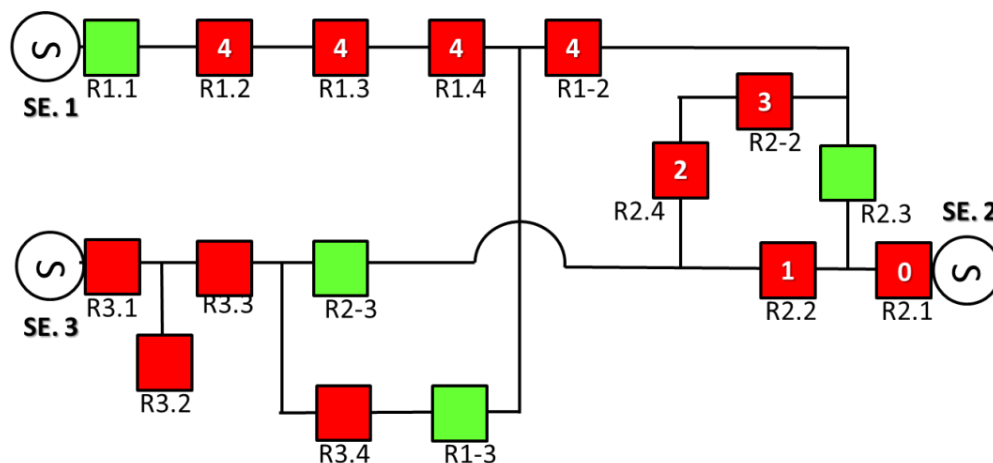


Figura 5.11: Grupos de ajustes resultados de la aplicación del algoritmo para el segundo respaldo alterno del circuito de la subestación 1

Observe ahora la hoja de coordinación la figura 5.12 que es la correspondiente a las protecciones modificadas por el algoritmo.

Es importante puntualizar que los ajustes de los equipos son diferentes, según la configuración de respaldo, tomemos como ejemplo el equipo nombrado R1.4, en el respaldo alterno (sección 5.2.2), donde queda con un pick up de fase de 400 amp y una palanca de 3.35 como lo muestra la figura 5.7 y para el segundo respaldo alterno de esta sección queda con un tap de 320amp y una palanca de 0.5, estos ajustes ya están previamente analizados y cargados en cada equipo en base a la homologación descrita en la sección 4.1.5, el algoritmo únicamente establece el grupo con el que queda funcionando cada restaurador para un caso específico, ningún equipo de la red realiza esta adaptación en la actualidad, por lo que este es un cambio innovador respecto a la coordinación en las protecciones de la red de media tensión.

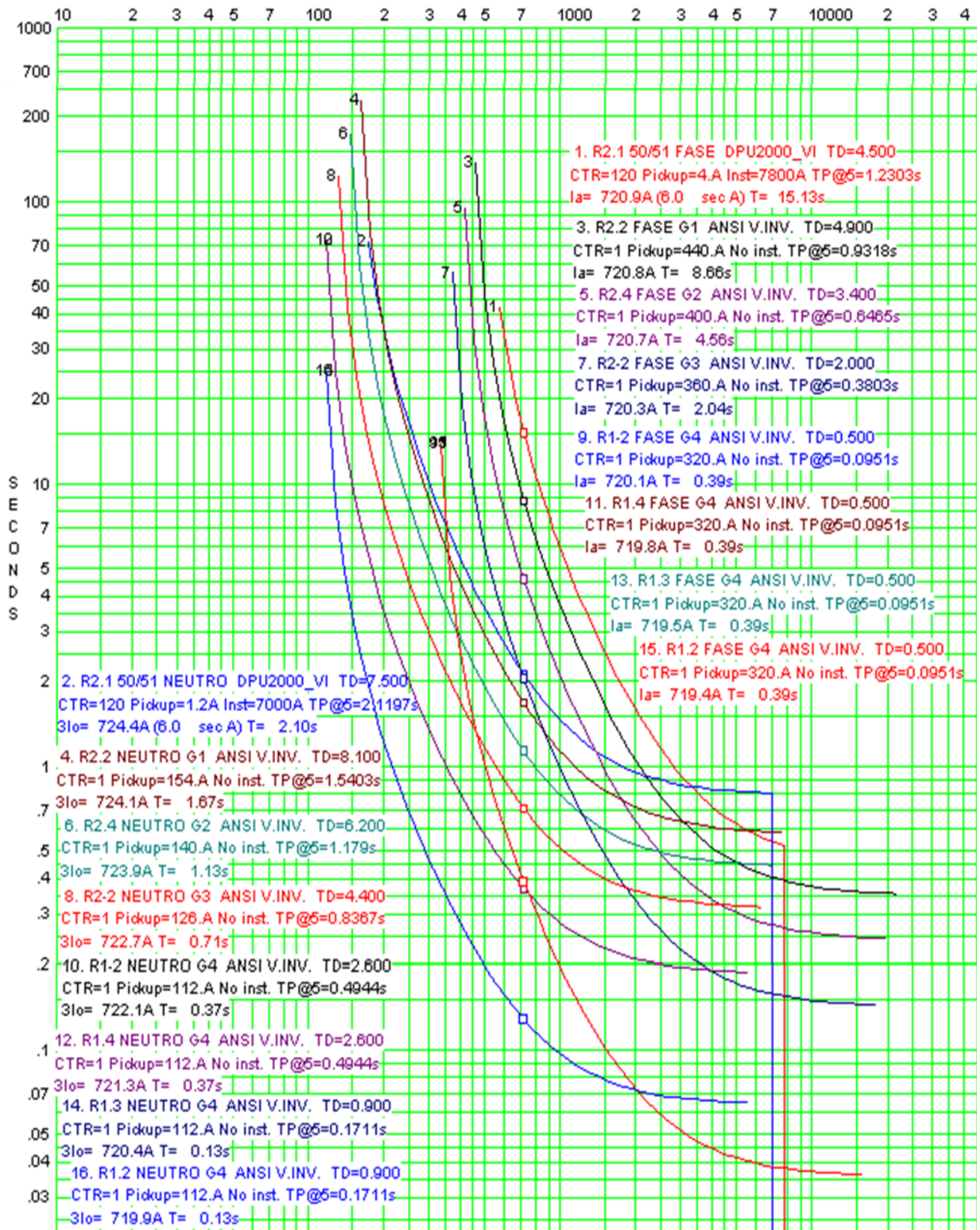


Figura 5.12: Curvas de coordinación por 2° respaldo alterno aplicando el algoritmo

5.3 EJEMPLO 2, RESPALDOS PARCIALES

5.3.1 RESPALDO POR TRAMO DE LÍNEA NO DISPONIBLE DESPUÉS DE R1.2

Uno de los trabajos programados importantes en las redes de distribución, es el cambio de conductor, por lo que en este ejemplo se simula conductor no disponible, que podría también representar a un tramo de conductor dañado, observe la figura 5.13a en la cual se encuentra un tramo seccionado entre R1.2 y R1.3.

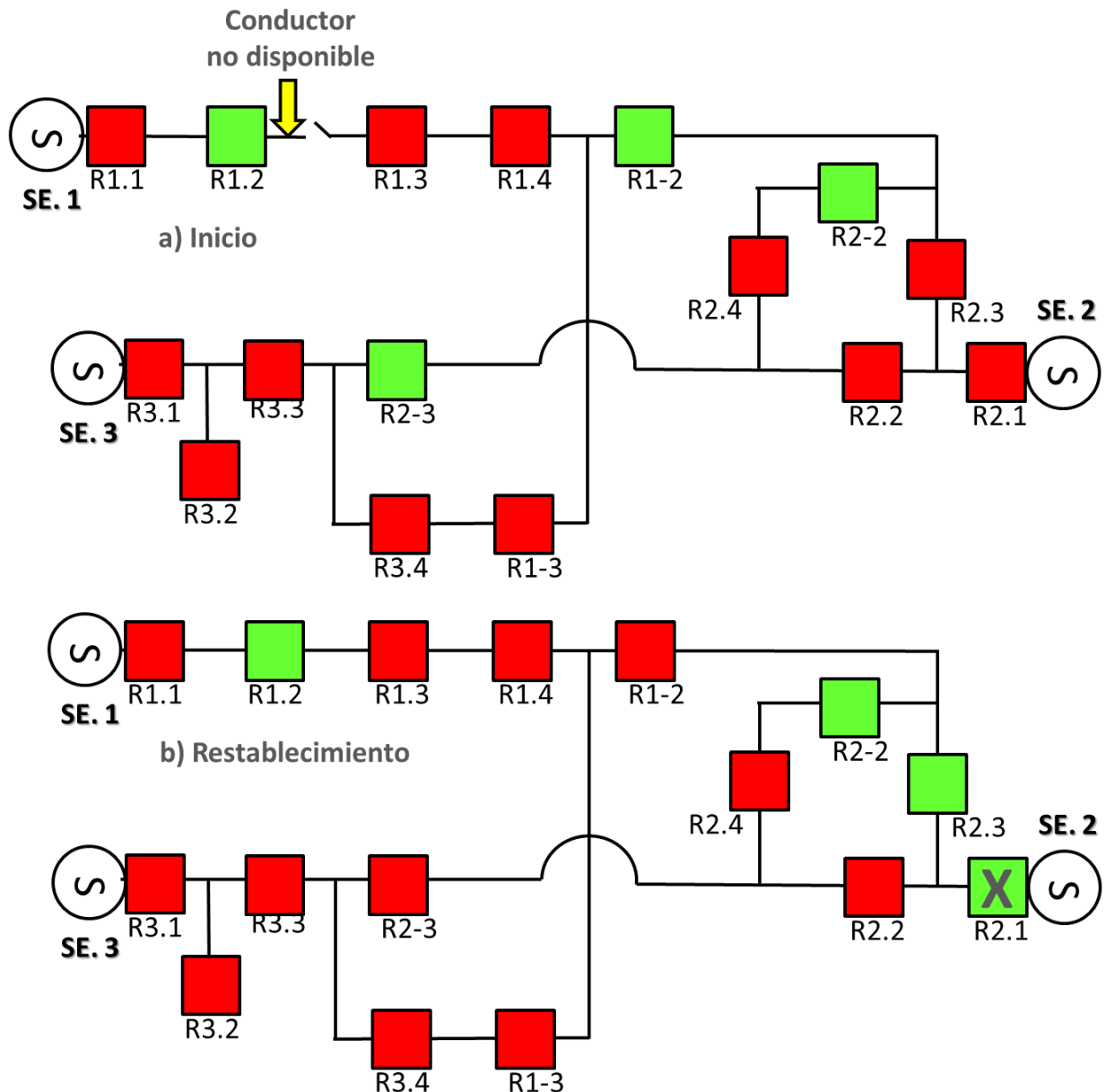


Figura 5.13: Respaldo ejemplificando un tramo de línea desenergizado

Ahora suponga una falla que provoca la operación de R2.1 (relevador de subestación 2) y queda abierto, la carga del circuito de la subestación 2 es respaldada por R1-2 y R2-3

como lo muestra la figura 5.13b, esto requiere cambios en las protecciones de los equipos del circuito de la subestación 2 debido a que cambian los flujos en todos los equipos de la manera que se muestra en la figura 5.14a.

Dentro de las configuraciones posibles de la red, esta podría ser inesperada ya que vendría siendo una segunda contingencia de la red original. Generalmente las protecciones se ajustan para un escenario base y una primera contingencia y no para una segunda o tercera, sin embargo, la homologación en los grupos de ajustes presentada en este proyecto permite que los equipos continúen coordinados sea cual sea la configuración ya que el algoritmo va asignando los grupos uno tras otro sin tener en cuenta el número de movimientos que ocurran en la red, de esta manera aplicando el algoritmo a la red obtenida tenemos los grupos mostrados en la figura 5.14b.

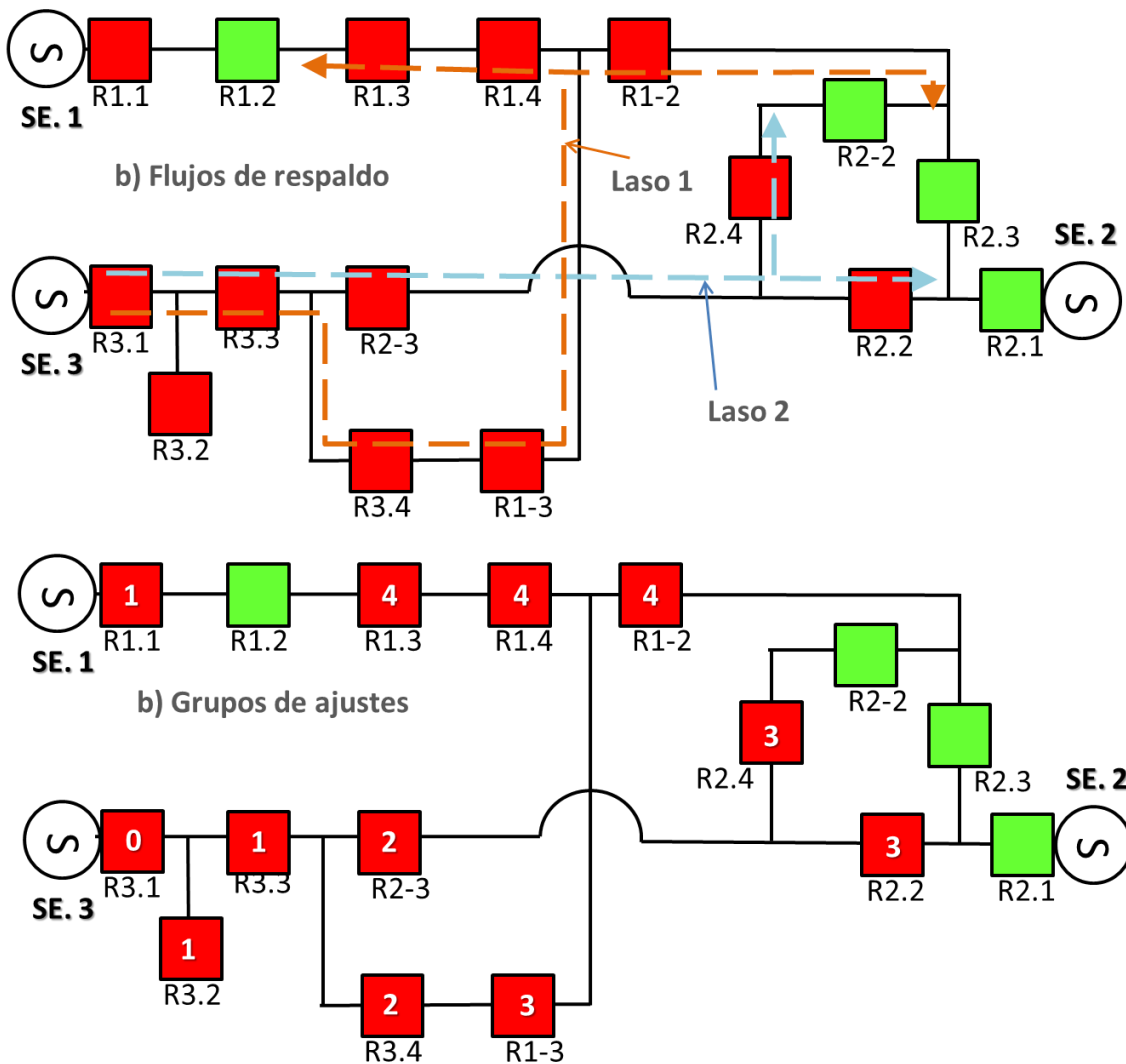


Figura 5.14: Flujos de corriente y grupos de ajustes por respaldo debido a operación en el relevador de la subestación 2 con conductor indisponible

Se presentan las hojas de coordinación de protecciones de los lazos 1 y 2 de la figura 5.14, ambas sin la aplicación del algoritmo, advierta que para el lazo 1 (figura 5.15a) existe coordinación en los equipos aunque R1.3 y R1.4 quedan fuera de esta por presentar un flujo de corriente contrario al de la configuración original.

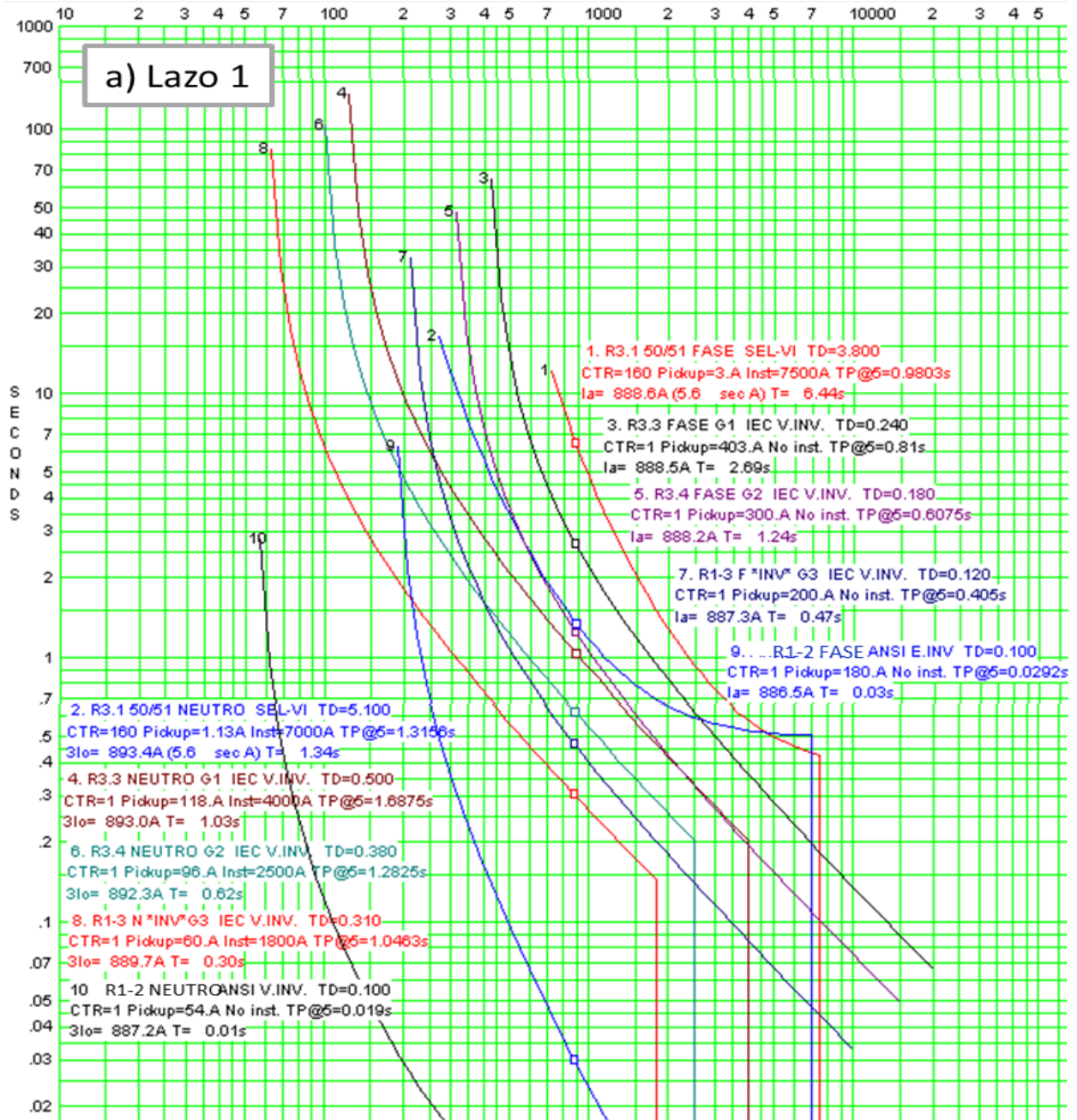


Figura 5.15a: Hoja de coordinación del lazo 1 por respaldo debido a operación en el relevador de la subestación 2 y conductor indisponible sin la aplicación del algoritmo

Ahora observe en la figura 5.15b que para el lazo 2 no se obtiene una correcta coordinación entre los equipos R2-3 y R2.4 en una falla trifásica ya que se tiene un tiempo de operación de 0.17s y 0.18s respectivamente con una falla delante de R2.4, de esta manera, esto contando que únicamente se tienen cuatro equipos en serie, la razón es porque el ajuste de R2.4 esta normalmente coordinado con R2.2 y no hay forma de que este se entere que ahora su alimentación esta por R2-3 y se realice algún cambio correctivo.

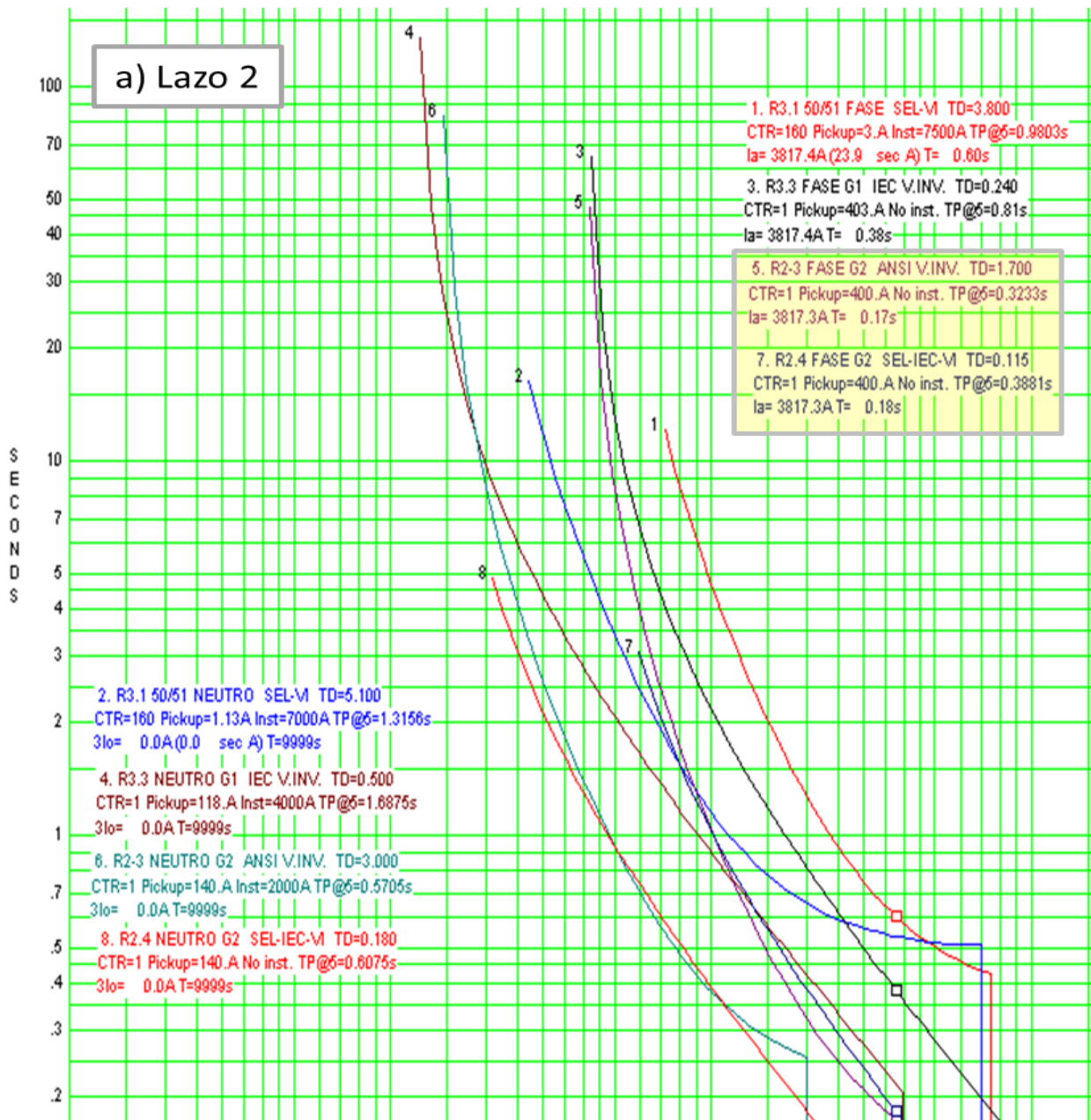


Figura 5.15b: Hoja de coordinación del lazo 2 por respaldo debido a operación en el relevador de la subestación 2 y conductor indisponible sin la aplicación del algoritmo

La solución a este problema queda resuelta con la aplicación del algoritmo, note en la figura 5.14b que el algoritmo ha establecido el grupo de ajustes 2 para R2-3 seguido de R2.4 al que le asigna el grupo 3, con base a la homologación queda en coordinación como lo muestra la figura 5.16.

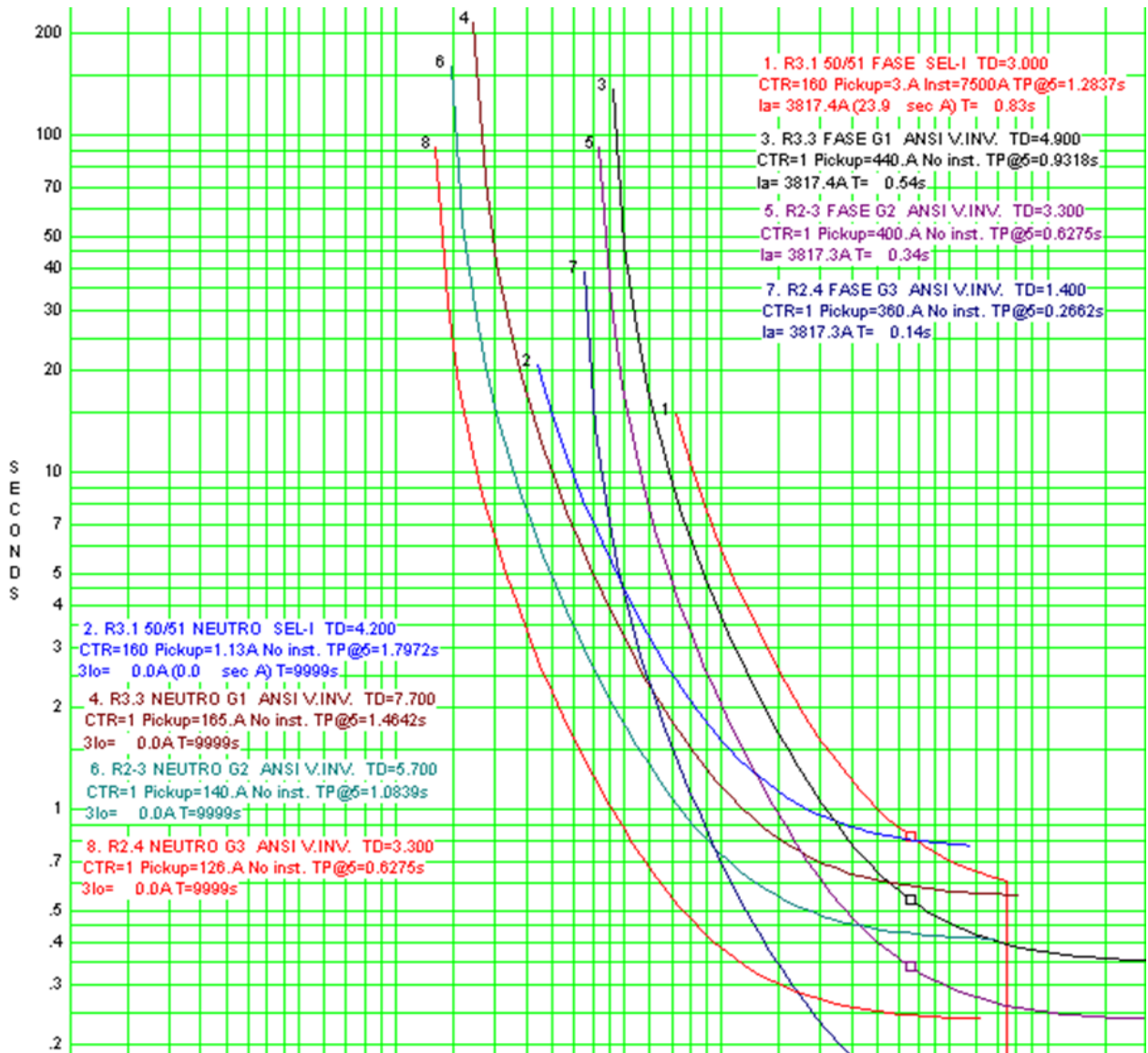


Figura 5.16: Hoja de coordinación del lazo 2 por respaldo debido a operación en el relevador de la subestación 2 y conductor indisponible con la aplicación del algoritmo

Como conclusión de esta configuración se tiene que: la aplicación del algoritmo y la homologación en los ajustes propuestos en este proyecto hacen que ante la segunda contingencia en la red se siga conservando la coordinación en las protecciones y así asegurar la continuidad en el servicio e integridad al personal que llegara a trabajar sobre las líneas energizadas de la red.

5.3.2 RESPALDO CON R1-2 RETIRADO Y CONDUCTOR NO DISPONIBLE

Una condición frecuente en las redes de distribución es la indisponibilidad de un equipo, en este ejercicio se ha simulado la salida de operación de R1-2 que es enlace de los circuitos 1 y 2, combinado con un tramo de conductor no disponible entre R1.3 y R1.4, abriendo un seccionamiento manual, la carga delante de este queda alimentada por R1-3 con R1.4 cerrado, como lo muestra la red de la figura 5.17a.

Ahora se simula la operación de la protección de R3.1 como en la figura 5.17b

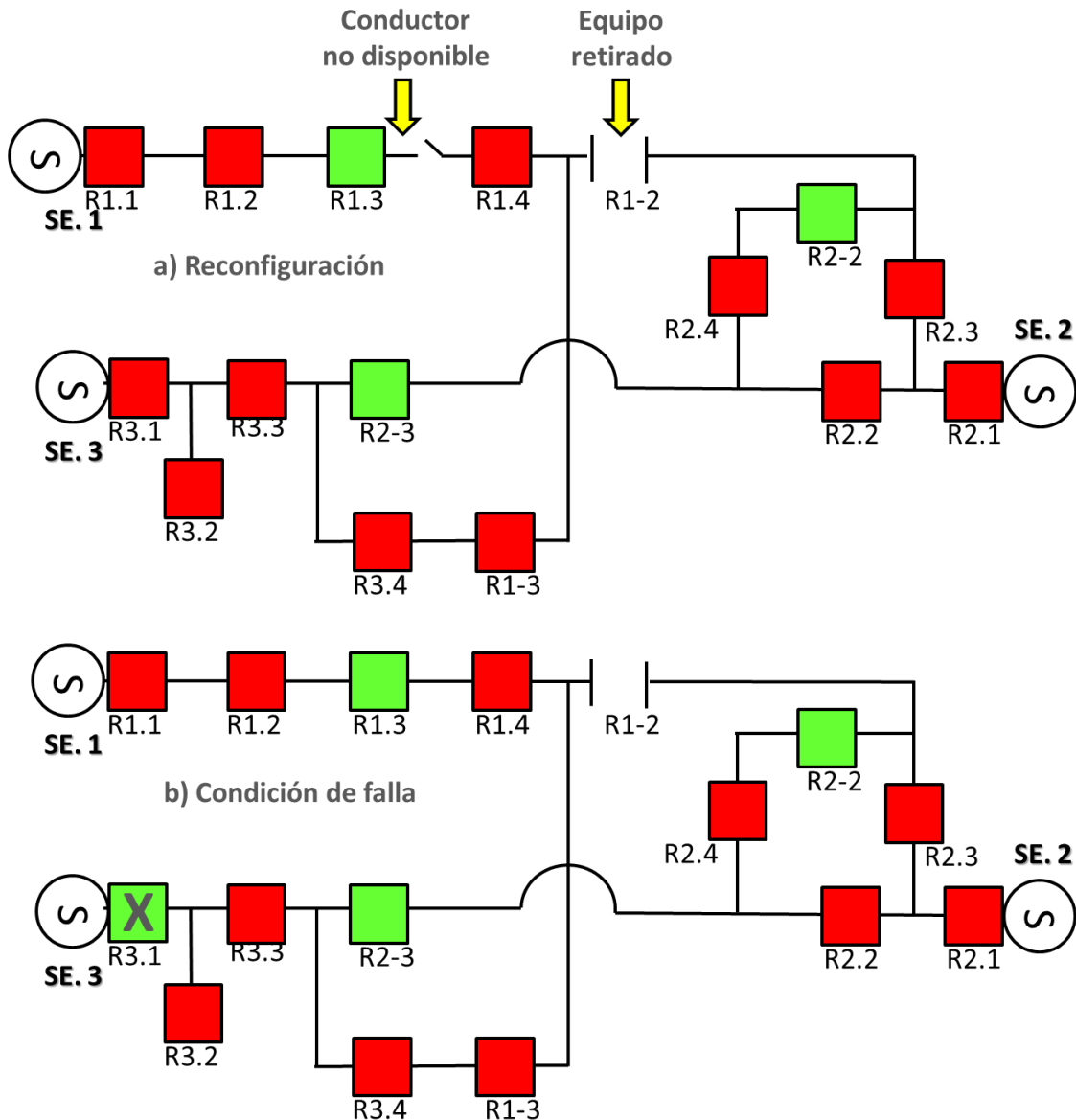


Figura 5.17: Respaldo ejemplificando un equipo no disponible y un tramo de línea desenergizado

Adviértase que para esta configuración la falla en R3.1 también afecta la carga ya respaldada de R1.4 y como R1-2 está fuera de operación la única opción de

restablecimiento es R2-3 el cual queda cerrado, la red final esta especificada en la figura 5.18. En esta configuración más del 80% de la red es respaldada por la subestación 2.

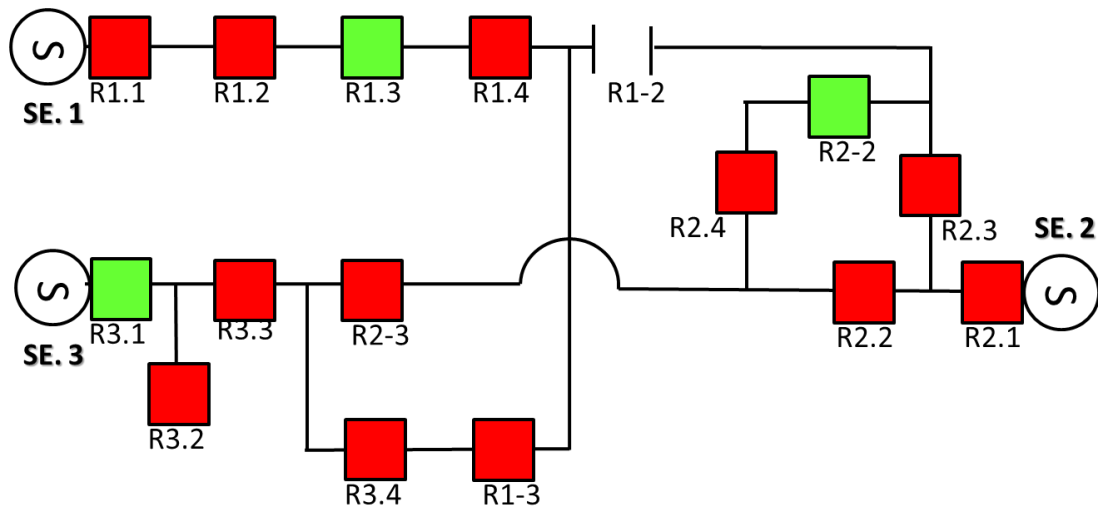


Figura 5.18: Red final ejemplificando respaldo en la red con un equipo no disponible y tramo de línea desenergizado

Para analizar las protecciones de la red primero observe de la figura 5.1 al inicio de este capítulo que el equipo R3.4 está ajustado para coordinar normalmente con R3.3 y este a su vez con R3.1, esto significa que R3.4 es la segunda protección después del relevador de la subestación. Para la configuración resultante en este ejemplo, R3.4 queda alimentado por R2-3 desde la subestación 2 que respalda a la subestación 3, esto es un cambio importante ya que R3.4 pasa de ser la segunda protección desde la subestación a la tercera pero queda con los mismos ajustes, ya que los equipos tienen un único ajuste cuando fluye corriente en un sentido y no hay manera que este se entere del cambio de fuente, el resultado es una descoordinación en las protecciones como lo muestra la figura 5.19, observe que ante una falla delante de R3.4 primero operara R2-3. Podría pensarse en realizar un ajuste para esta configuración en R3.4 pero cualquier cambio se verá reflejado en la coordinación de la red original de la subestación 3 teniendo peores consecuencias. La única solución es que el operador de la red deshabilite manualmente la protección del equipo R3.4 y no se cuente como una protección para evitar confusiones, sobre todo a la hora que personal en campo trabaje en la línea energizada. Como se comentó en el capítulo 4, no siempre es la opción más deseable ya que el operador del sistema atiende completa la red de media tensión y llevar a cabo esta acción para varios equipos en diferentes contingencias no es lo más práctico.

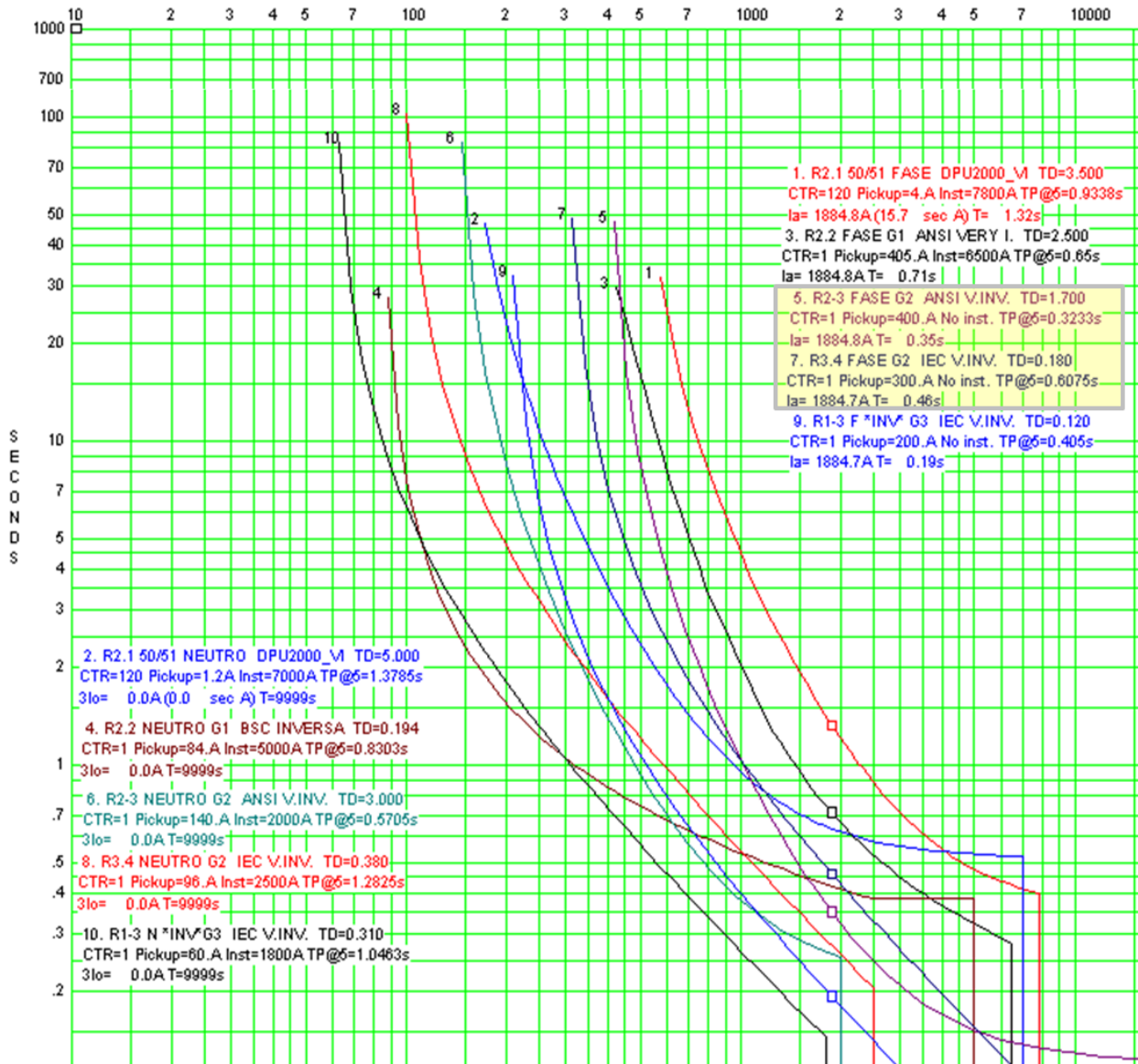


Figura 5.19: Hoja de coordinación de protecciones de red de la figura 5.17 sin la aplicación del algoritmo

Aplicando el algoritmo propuesto en este proyecto a la red resultante obtenemos los grupos mostrados en la figura 5.20, como se puede observar al equipo que pierde coordinación (R3.4) le queda reasignado el grupo 3, con lo que su pick up queda de 360amp y no de 300amp como el que se tiene sin la aplicación del algoritmo, además advierte que en la red sin la aplicación del algoritmo se tienen cinco equipos de protección como lo muestra la figura 5.19, sin estar coordinados como ya se mencionó, sin embargo, con la aplicación del algoritmo se extiende a seis equipos con protección habilitada y sin perder la coordinación como lo muestra la figura 5.21.

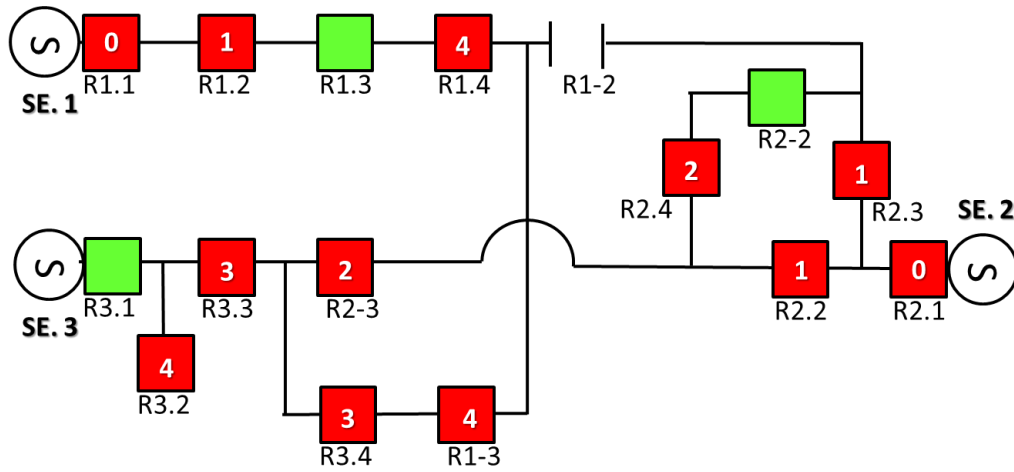


Figura 5.20: Grupos de ajustes asignados por el algoritmo para la red con indisponibilidad de conductor y un equipo

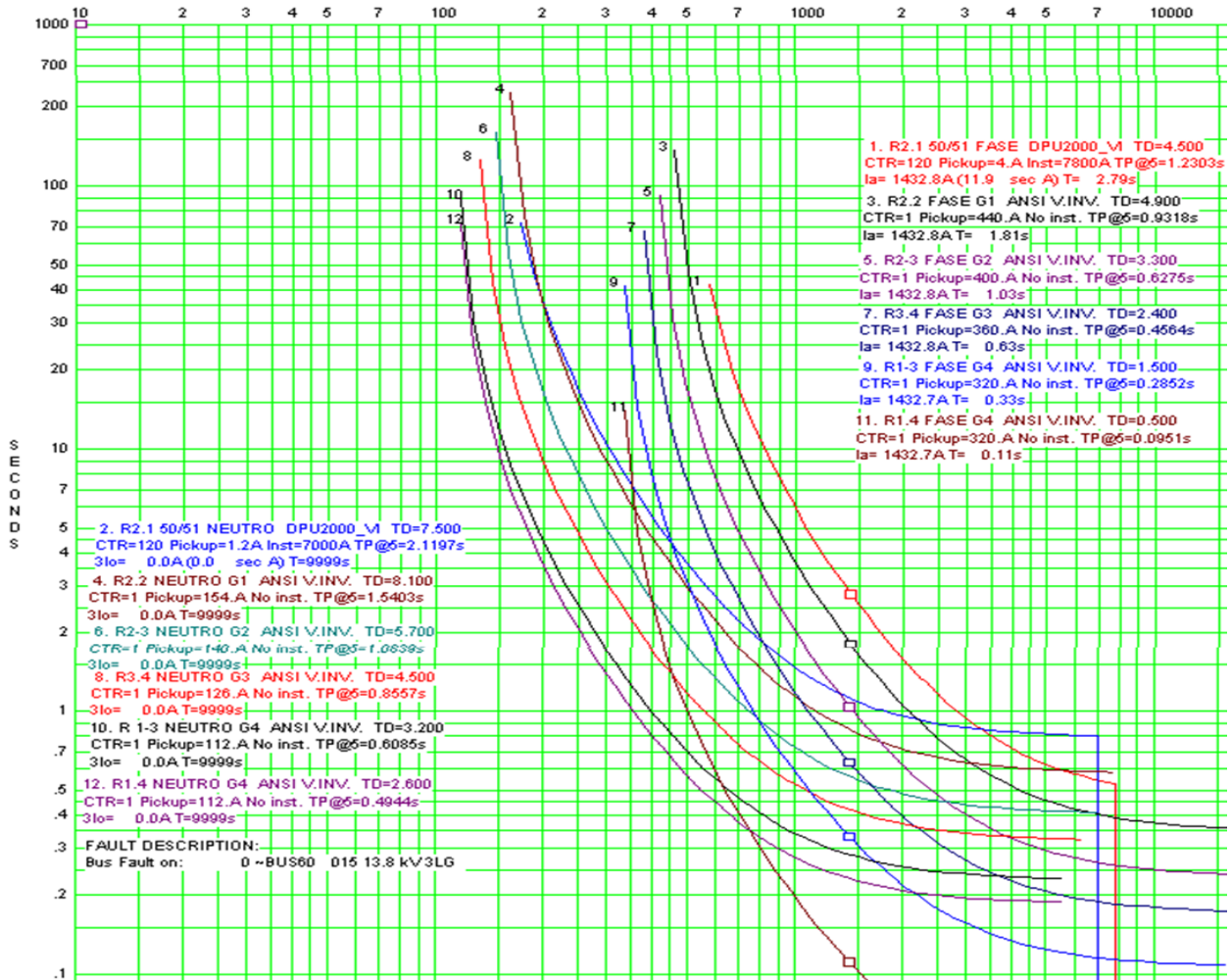


Figura 5.21: Hoja de coordinación de protecciones de red de la figura 5.20 o con la aplicación del algoritmo

CAPÍTULO VI.- CONCLUSIONES

Como se mencionó en el capítulo IV, la función de los dispositivos de protección de sobrecorriente es detectar una falla y aislar el problema lo más rápido posible. Un sistema eléctrico de potencia debe tener la característica de selectividad en sus protecciones, para cumplir este requisito, en configuraciones radiales los relevadores deben ser dimensionados y coordinados entre sí, de tal manera que opere únicamente aquel dispositivo que se encuentre más cercano a la falla, y si por alguna razón éste fallara, deberá operar el siguiente más cercano a ésta, y así sucesivamente. En estado normal, el ajuste de las protecciones se basa en el estudio de la red, realizado por el departamento especializado respetando esta lógica, al haber una o más reconfiguraciones en la red, como en los casos mostrados del capítulo anterior, no se conserva la coordinación para algunos ejemplos sin la aplicación del algoritmo, sobre todo, en los nodos más alejados de la nueva fuente, actualmente esta problemática la atacan algunos proveedores habilitando protección bidireccional en los restauradores, pero solo es una solución parcial, ya que no es suficiente para todos los escenarios mostrados en el capítulo V de este proyecto, así, se pudo concluir de la aplicación del algoritmo que:

1.- Al haber un cambio topológico en la red de distribución radial, el algoritmo propuesto realiza modificaciones de los grupos de ajustes de las protecciones, instaladas sobre la trayectoria de los circuitos de la red de distribución; basado en una homologación de cinco grupos citados en el capítulo IV, el resultado es que se conserva la coordinación en cada uno de los modelos mostrados en el capítulo V, por lo que para estos ejemplos queda demostrado su uso como una herramienta que maximiza la selectividad y asegura la seguridad del sistema y del propio personal que podría laborar en ella. Como se mencionó en el capítulo IV, la red presentada en este proyecto es exclusiva para la demostración del algoritmo y se obtuvo de la emulación de circuitos reales operando en la ciudad de Puebla y cuenta con los nodos necesarios para realizar diferentes maniobras y poder mostrar las bondades del algoritmo.

2.- Al conservar la coordinación de protecciones, se minimiza la afectación del suministro de energía eléctrica si después de una reconfiguración llegara a presentarse una falla. Ésta es otra aportación importante del presente proyecto, ya que, ayuda a conservar o mejorar indicadores relacionados al tiempo de interrupción o restablecimiento de usuarios para las empresas de distribución, volviéndolas más competentes en un mercado con tendencia a la globalización.

3.- El algoritmo tiene dos relaciones posibles para trabajos que se realicen físicamente sobre los conductores energizados (licencias en vivo) y estos son:

a) Cuando el circuito en el cual trabaja el personal está en configuración normal, en cuyo caso el algoritmo no tiene injerencia, ya que no existe reajuste topológico, la operación de la red es la misma que si no existiera el algoritmo.

b) El segundo caso es cuando exista una reconfiguración. Como la aplicación del algoritmo conserva la coordinación en las protecciones de sobrecorriente, el trabajador dependerá de la protección más cercana al lugar de trabajo, en este caso el operador debe realizar el proceso de protección cotidiano que consiste en bloquear el recierre del relevador más cercano, simplificando así el proceso necesario para asegurar la ejecución de trabajos sobre las líneas energizadas de la forma más segura y simple.

4.-Para licencias de ejecución sin potencial sucede un caso análogo, ya que al ejecutar maniobras de transferencia de carga necesarias para la ejecución de los trabajos en muerto, el algoritmo ira ajustando las protecciones después de realizar cada una de las maniobras, se propone que el operador del sistema valide los cambios finales, sobre todo cuando se involucren equipos de operación manual, que no tengan control remoto o en aquellos que se instalaron específicamente para la realización de dichos trabajos.

El **alcance** de este proyecto en la presente tesis es exclusivamente teórico como se ha mencionado en el capítulo III, el siguiente paso consistiría en su implementación en una red de distribución, emparejando con el sistema de adquisición de datos en uso, del cual obtendrían los valores, mediciones y estados de los equipos de la red. La propuesta es tenerlo en ejecución en algún servidor alternativo por algún tiempo sin alterar la operación, donde el algoritmo este en ejecución sin consumir recursos de algún servidor del SCADA, en este tiempo los operadores de la red se familiarizarían con él, sobre todo para la atención de fallas, para finalmente poderlo integrar como una función más en las terminales de operación. El esquema básico de esta propuesta de implementación se muestra en la figura 6.1, aquí se observa un servidor para el algoritmo, el cual obtendría continuamente del SCADA toda la información necesaria para su ejecución en tiempo real. Al presentarse un cambio topológico presentaría su resultado en una aplicación del supervisor, la cual finalmente validaría el operador de la red para su ejecución.

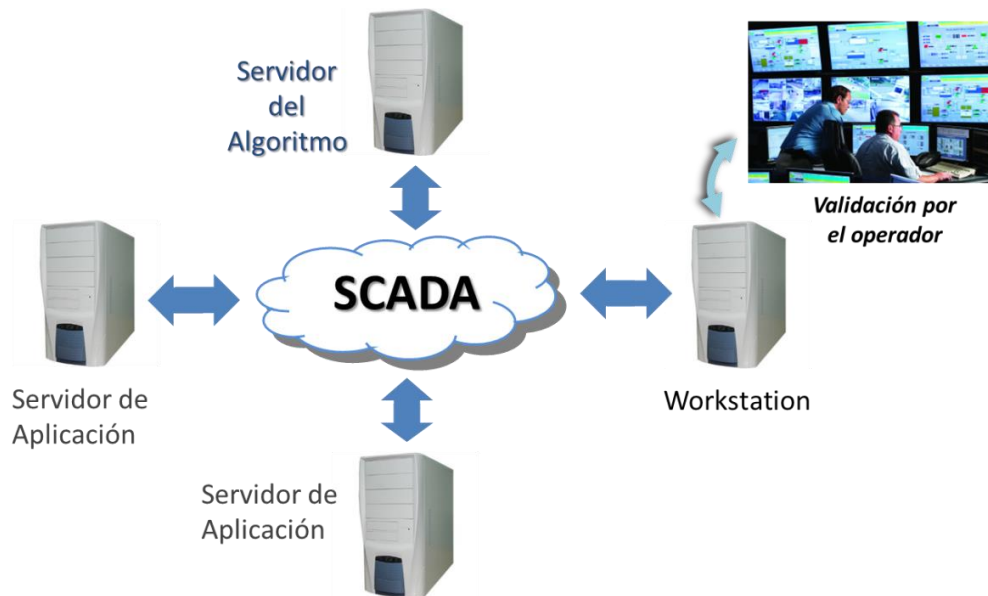


Figura 6.1: Propuesta para la implementación del algoritmo

En cuanto a los **costos** para poder implementarlo, éstos vendrían de dos aspectos; el hardware, donde únicamente se necesita un gabinete que funja como el servidor del algoritmo, en el cual se esté ejecutando en tiempo real. Respecto a software está la necesidad de un programador que cree el ejecutable y que vincule los valores del SCADA para la ejecución del algoritmo, una última opción es plantear esta necesidad a la empresa encargada del software del supervisorio utilizado en el centro de control donde se vaya a aplicar y agregarlo como una herramienta más en las terminales de trabajo (Workstations).

LIMITANTES PARA LA IMPLEMENTACIÓN Y RECOMENDACIONES

El algoritmo aplica exclusivamente en configuraciones radiales, si llegara a presentarse un escenario como el mostrado en el ejemplo de la figura 6.1, donde el equipo que separa los circuitos no es de control remoto, sino, cuchillas de operación manual, el algoritmo no ejecutará ningún cambio en las protecciones, ya que, aunque las cuchillas marcadas como C1 están abiertas, no se reflejaría su cambio en el sistema de adquisición de datos, por no formar parte de este, el algoritmo lo interpretaría como un circuito alimentado por dos fuentes o anillado por lo que no realizaría ningún cambio, ya que una de las premisas para la aplicación del algoritmo es tratar con circuitos radiales.

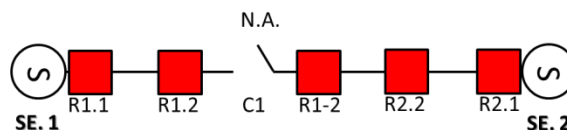


Figura 6.2: Reconfiguración tomando en cuenta maniobras con equipos manuales

La solución propuesta para su implementación es generar cuchillas en el sistema supervisorio con cambios de estado que, puedan ser ejecutadas por el operador en el supervisorio de forma virtual (un pseudo-elemento), de esta manera al realizar una maniobra en campo, también se ejecute dicho cambio de estado en el supervisorio y ya que el estado de estos dispositivos estaría vinculado a la base de datos del supervisorio, este retroalimentaría al algoritmo. En la figura 6.2 se muestra la propuesta como se vería en el supervisorio con las cuchillas como pseudo-elementos.

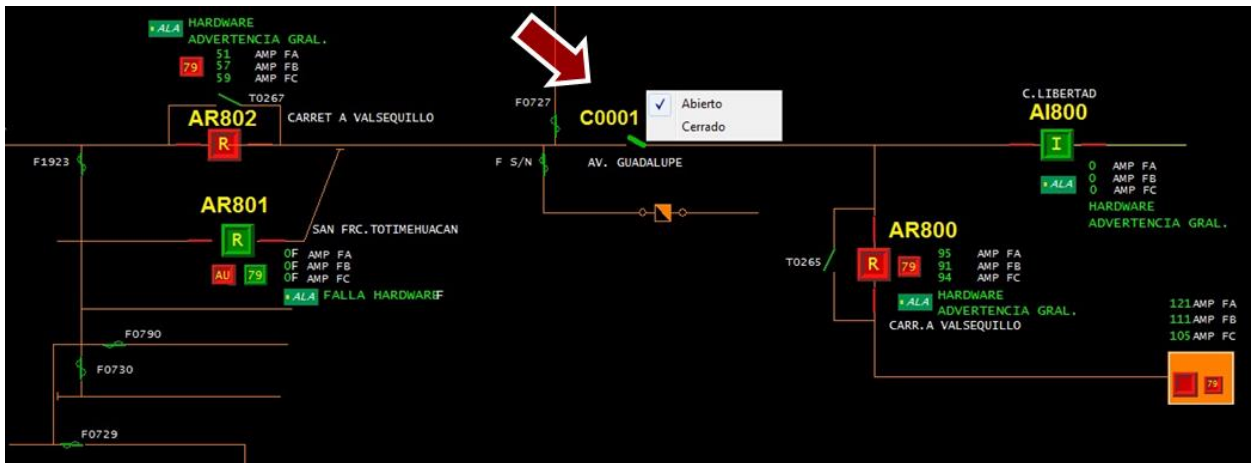


Figura 6.3: Propuesta de equipo de operación manual como pseudo elemento

La aplicación del algoritmo en un sistema de distribución dependería exclusivamente de los valores donde obtenga los valores y cambios de estado de los equipos, es decir la base de datos del supervisorio, que sustituirían a los archivos de entrada en el presente proyecto, por esto, la actualización continua sería básica para su correcto funcionamiento y ésta involucraría cualquier equipo de protección o desconexión sobre la red de distribución, incluyendo los de operación remota y manual.

La aplicación del algoritmo va más allá de la red de estudio y se puede hacer aun cuando se tengan presentes equipos no mostrados en esta tesis; como bancos de capacitores, reguladores, transformadores elevadores o en algún sistema con generación distribuida, esto es porque cada una de estos tipos de sistemas obedecen a la norma IEEE Std 2030 y 1547 en la cual se especifica que ante una falla se debe desconectar la parte del sistema invariablemente, que es finalmente el propósito del algoritmo únicamente se tendría que basar en una homologación para las protecciones diferente a la mostrada en este proyecto.

LISTADO DE FIGURAS

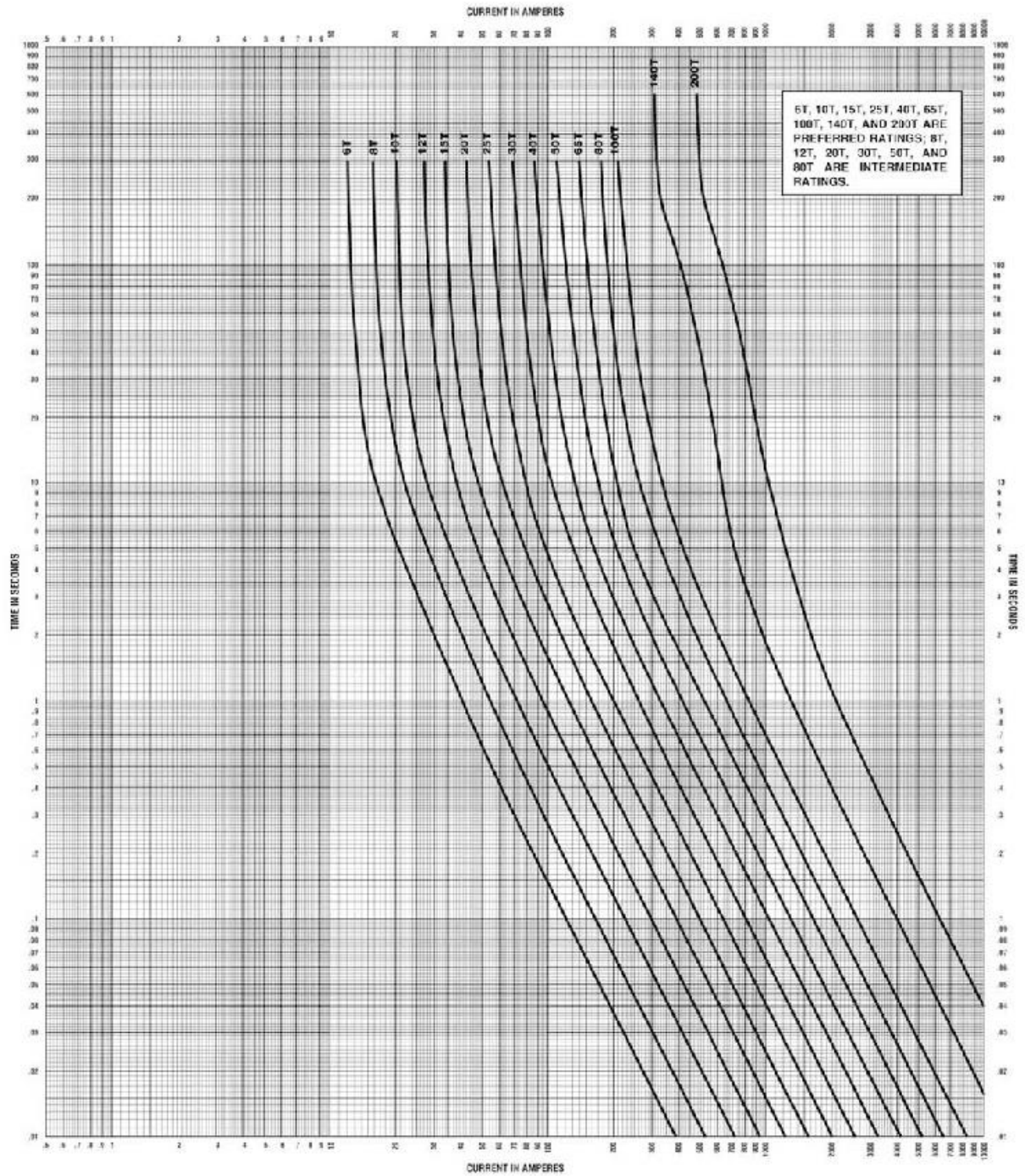
Figura 1.1. Cambios topológicos en una red de distribución	3
Figura 2.1: Estados operativos en un sistema eléctrico de distribución.....	8
Figura 2.2: Equipos de un sistema de distribución	9
Figura 3.1: Curvas características de relevadores de sobrecorriente de tiempo inverso.....	13
Figura 3.2: Ejemplo de coordinación en circuitos radiales.....	14
Figura 3.3 Ejemplos de restauradores electrónicos por marca, de izquierda a derecha: ARTECHE, NOJA y ABB.....	16
Figura 3.4: Coordinación curva de tiempo inverso e instantáneo con curva de fusible.....	19
Figura 3.5: Ejemplo de automatización en una red de distribución.....	20
Figura 4.1 Red ejemplo para explicar propósito del algoritmo.....	24
Figura 4.2 Red modificada caso 1 y 2.....	25
Figura 4.3: Matriz de adyacencia	28
Figura 4.4: Matriz de adyacencia e inicialización de variables del algoritmo.....	30
Figura 4.5: Pasos de inicio del algoritmo.....	30
Figura 4.6: Camino para revisión de la matriz de adyacencia	32
Figura 4.7: Diagrama general del algoritmo	33
Figura 4.8: Archivo de texto con el formato que designa la red de estudio.....	34
Figura 4.9. Archivo de texto creado como resultado de la aplicación del algoritmo.....	35
Figura 4.10. Red de prueba para la aplicación del algoritmo en estado inicial (sin reconfiguración).....	35
Figura 4.11. Pick up característicos de cada grupo de ajustes.....	36
Figura 4.12: Grupos de ajustes designados en Aspen para los equipos de la red de estudio.....	37
Figura 5.1: Ejemplo 1 Respaldo del circuito de la subestación 1 por R1-3.....	38
Figura 5.2: Curvas de coordinación sin la aplicación del algoritmo para el ejemplo 1.....	39
Figura 5.3: Curvas de coordinación con aplicación del algoritmo para el ejemplo 1	40
Figura 5.4: Respaldo alterno del circuito de la subestación 1 realizado por R1-2.....	42
Figura 5.5 Curvas de coordinación por respaldo alterno sin la aplicación del algoritmo	43
Figura 5.6: Grupos de ajustes asignados por el algoritmo para el respaldo alterno del circuito de la subestación 1.....	43
Figura 5.7 Curvas de coordinación por respaldo alterno con la aplicación del algoritmo.....	44
Figura 5.8: Segundo respaldo alterno del circuito de la subestación 1 por R2-2 y R1-2.....	45
Figura 5.9: Curvas de coordinación por 2° respaldo alterno sin aplicación del algoritmo	46
Figura 5.10: Ejemplos de configuraciones donde interviene R2-2.	47
Figura 5.11: Grupos de ajustes resultados de la aplicación del algoritmo para el segundo respaldo alterno del circuito de la subestación 1	48
Figura 5.12: Curvas de coordinación por 2° respaldo alterno aplicando el algoritmo.....	49
Figura 5.13: Respaldo ejemplificando un tramo de línea desenergizado	50
Figura 5.14: Flujos de corriente y grupos de ajustes por respaldo debido a operación en el relevador de la subestación 2 con conductor indisponible.....	51
Figura 5.15a: Hoja de coordinación del lazo 1 por respaldo debido a operación en el relevador de la subestación 2 y conductor indisponible sin la aplicación del algoritmo.....	52
Figura 5.15b: Hoja de coordinación del lazo 2 por respaldo debido a operación en el relevador de la subestación 2 y conductor indisponible sin la aplicación del algoritmo.....	53
Figura 5.16: Hoja de coordinación del lazo 2 por respaldo debido a operación en el relevador de la subestación 2 y conductor indisponible con la aplicación del algoritmo	54
Figura 5.17: Respaldo ejemplificando un equipo no disponible y un tramo de línea desenergizado	55

<i>Figura 5.18: Red final ejemplificando respaldo en la red con un equipo no disponible y tramo de línea desenergizado</i>	<i>56</i>
<i>Figura 5.19: Hoja de coordinación de protecciones de red de la figura 5.17 sin la aplicación del algoritmo</i>	<i>57</i>
<i>Figura 5.20: Grupos de ajustes asignados por el algoritmo para la red con indisponibilidad de conductor y un equipo.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 5.21: Hoja de coordinación de protecciones de red de la figura 5.20 o con la aplicación del algoritmo.....</i>	<i>58</i>
<i>Figura 6.1: Propuesta para la implementación del algoritmo.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 6.2: Reconfiguración tomando en cuenta maniobras con equipos manuales.....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 6.3: Propuesta de equipo de operación manual como pseudo elemento</i>	<i>62</i>

BIBLIOGRAFÍA

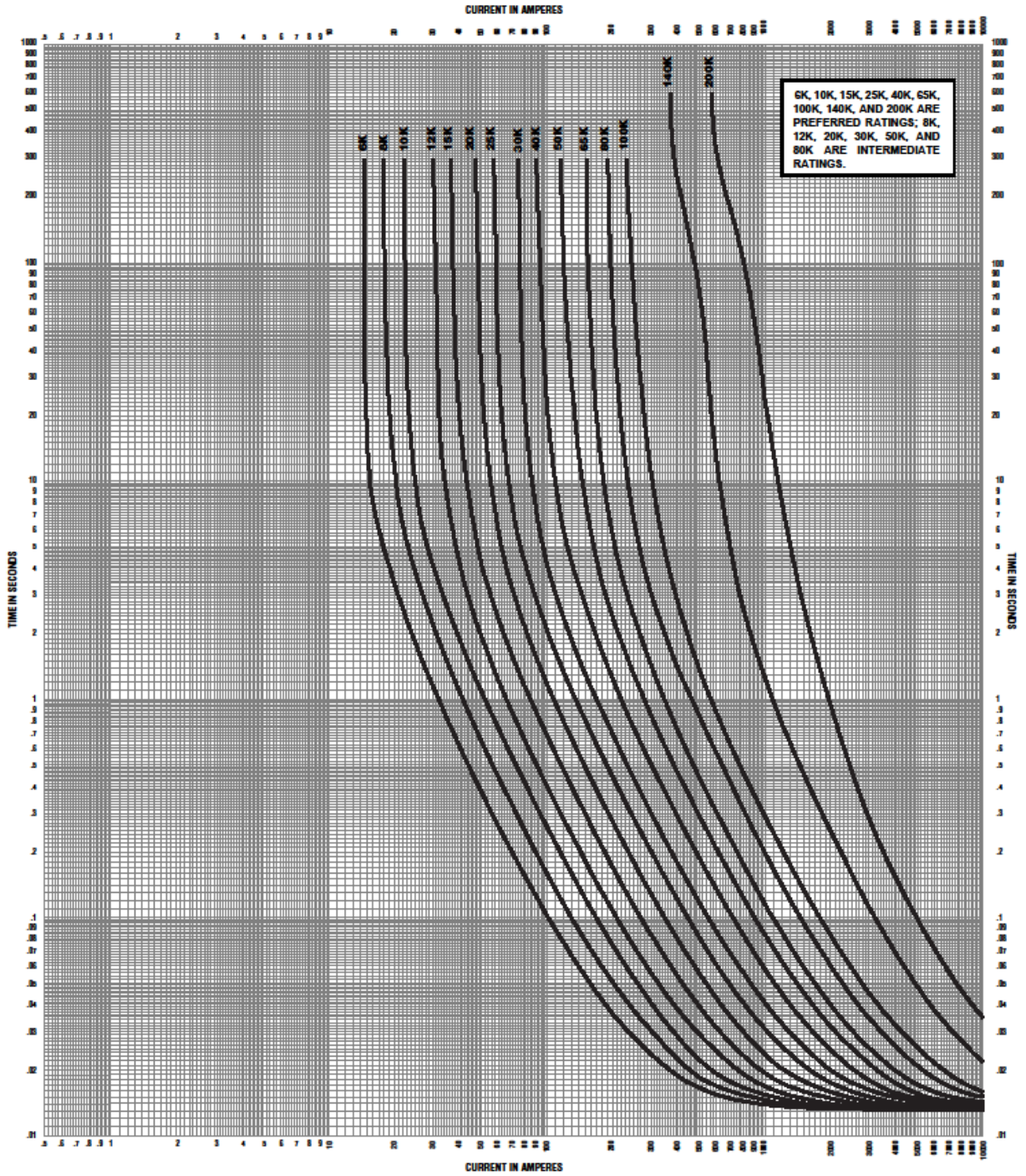
- [1] W.H. Kersting "Introduction to Distribution Systems" en *Distribution System Modeling and Analysis*, Washington , D.C., 2002, pp. 16.
- [2] Comisión Federal de Electricidad, "Misión y Visión" Disponible en:
http://www.cfe.gob.mx/ConoceCFE/1_AcercadeCFE/Paginas/Misionyvision.aspx
- [3] L. Gallegos, C. Picasso y J. M. Gómez, "Tendencia tecnológica" *Boletín IIE*, pp. 56, abril-junio 2011.
- [4] EPRECSA-NOJA-5008-01 OSM15-210, *Manual del Usuario*, Equipos Para Redes Eléctricas del Centro S.A. de C.V., 2014.
- [5] F. Coffele, C. Booth y A. Dysko, "An Adaptive Overcurrent Protection Scheme for Distribution Networks" en *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 30, no 2, pp 561-568, Abril 2015.
- [6] W. El-khattam y T. S. Sidhu, "Resolving the impact of distributed renewable generation on directional overcurrent relay coordination: a case study," *Renewable Power Generation*, IET, vol. 3, pp. 415-425, 2009.
- [7] M. Baran and I. El-Markabi, "Adaptive over current protection for distribution feeders with distributed generators," en *IEEE PES Power Systems Conference and Exposition*, 2004, pp. 715-719.
- [8] D. Jungnickel "Connectivity and Depth First Search" en *Graphs, Networks and Algorithms*, Vol. 5, Berlin: Springer, pp. 254, 2013.
- [9] Y. Bjornsson, T.A. Marsland "Learning Extension Parameters in Game-Tree Search", *Information Sciences Journal*, Vol. 154, no. 3, pp 95-118, Sept. 2003.
- [10] H. Jun-Ho, R. S. Ramakrishna "An external-memory depth-first search algorithm for general grid graphs" en *Theoretical Computer Science*, vol. 374, no.1, pp.170-180, 2007.
- [11] MathWorks, MATLAB, Videos and Webinars, "Introduction to GUI Building with GUIDE in MATLAB", Disponible en:
<http://www.mathworks.com/videos/creating-a-gui-with-guide-68979.html>
- [12] Aspen Inc, OneLiner, "The leading short circuit and relay coordination system", Disponible en:
<http://www.aspeninc.com/web/software/oneliner>

ANEXO 1 CURVAS DE COORDINACIÓN DE FUSIBLES



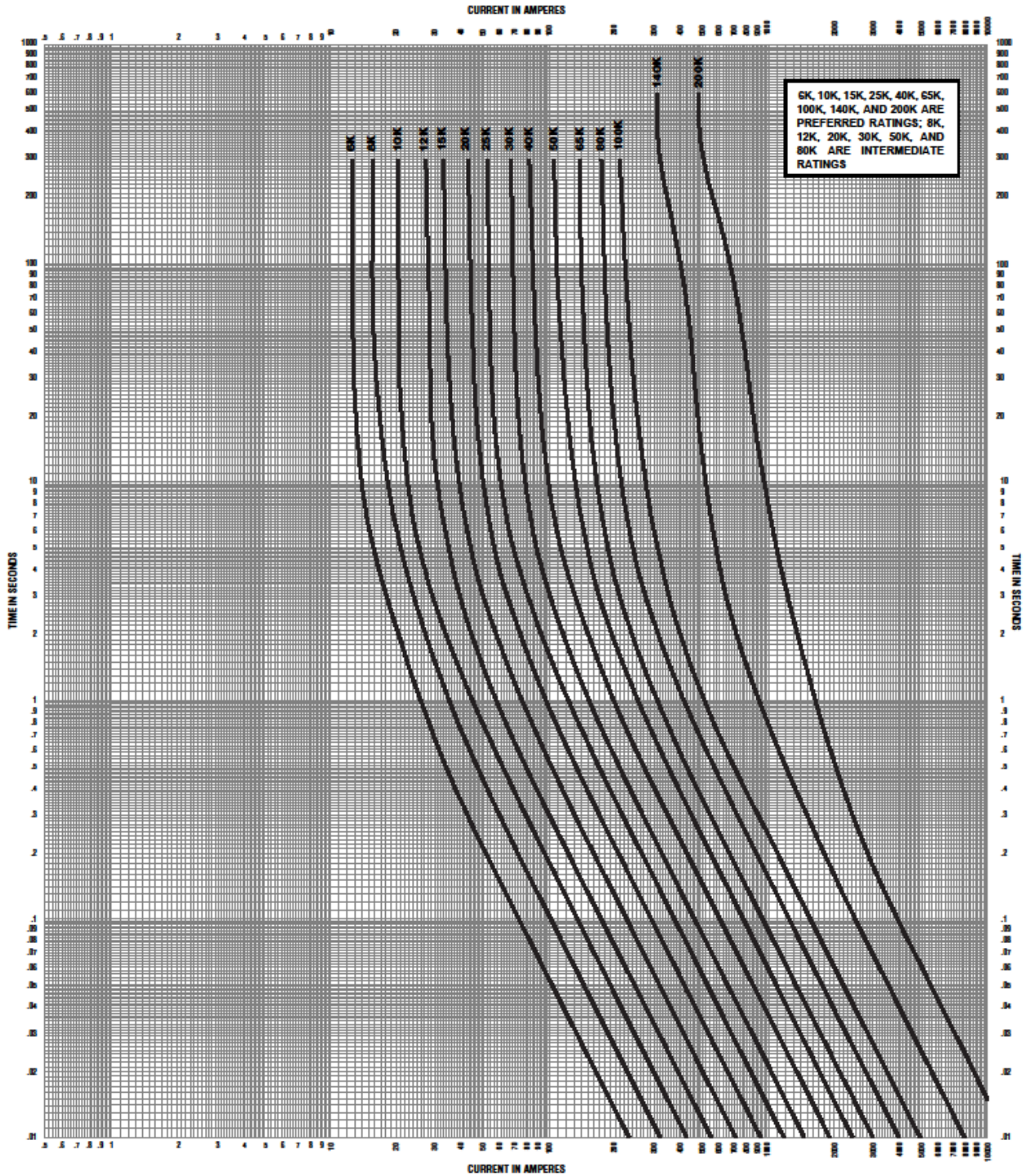
MINIMUM MELTING TIME-CURRENT CHARACTERISTIC CURVES

POSITROL® FUSE LINKS—S&C "T" SPEED



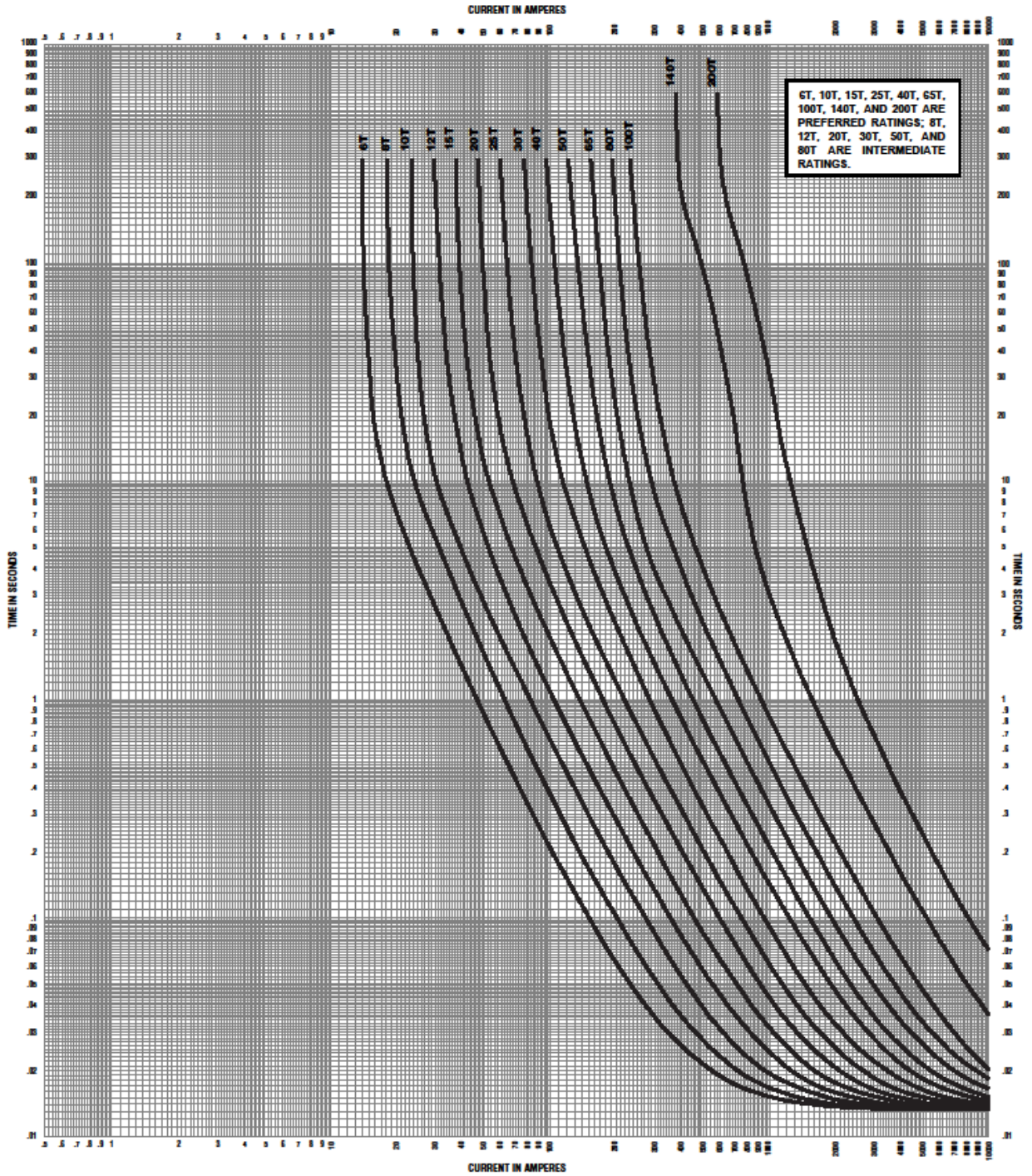
TOTAL CLEARING TIME-CURRENT CHARACTERISTIC CURVES

POSITROL® FUSE LINKS—S&C "K" SPEED



MINIMUM MELTING TIME-CURRENT CHARACTERISTIC CURVES

POSITROL® FUSE LINKS—S&C "K" SPEED



TOTAL CLEARING TIME-CURRENT CHARACTERISTIC CURVES

POSITROL® FUSE LINKS—S&C "T" SPEED

ANEXO 2 CÓDIGO DEL ALGORITMO

```

function [v]=procesa( arc1, arc2, arc3 )
% Se lee el archivo que posee el estado inicial
pf_ar1=fopen(arc1,'r');%abre el archivo con el nombre especificado como de lectura
contenido_línea=fscanf(pf_ar1,'%f');%guarda en la variable el vector con todas
% las características de la red
fclose(pf_ar1);

cantidad_fuentes = contenido_línea(1);
%Por el formato del archivo en la línea 1 se especifica el número de fuentes
apun = 2;%apunta a 2 ya que la línea 1 es para el número de nodos
cont_fuentes = 0;%se inicializa la variable para contar fuentes totales

%% Armado del arbol
for i=1:cantidad_fuentes %se analizan todos los nodos
    arr_es_fuente(i) = 0;%vector n(16), 1 si es fuente 0 si no
    visitados(i) = 0;
    estado(i) = contenido_línea(apun);%se crea variable edo original
    grupo(i)=contenido_línea(apun + 1);%se crea variable gpo original
    if grupo(i)== 0
        %en este if se contabiliza el número de fuentes que tiene el sistema
        %y se generan 3 variables:
        %"cont_fuentes" es un número entero con el número de fuentes
        %"arreglo_fuentes" será n(1)=1, n(2)=6 y n3(12)
        %"arr_es_fuente" será n(16)=1000010000010000
            cont_fuentes = cont_fuentes + 1;
            arreglo_fuentes(cont_fuentes) = i;
            arr_es_fuente(i) = 1;
        end
        %en los siguientes párrafos se genera la variable que tiene la
        %cantidad de conexiones de cada nodo, osea sus hijos y se guarda en
        %la matriz hijos(i=nodo a tratar,j=conexiones de los nodos hijos)
        cantidad_conexiones(i) = contenido_línea(apun + 2);
        apun = apun + 3;%se incrementa en 3 ya que ya se leyo el estado, grupo y
        %cantidad de conexiones, el +3 es donde comienzan a especificarse los nodos hijos
        %como se especifica en el formato del archivo de entrada
        for j=1:cantidad_conexiones(i)
            hijos(i, j) = contenido_línea(apun);
            apun = apun + 1;
        end
    end
end
%hasta este punto solo se ha extraído la información del archivo de
%entrada del sistema especificado y se ha guardado en variables de matlab
estado_nuevo = estado;%se realiza una copia del estado inicial de sistema, de este punto
    %la variable "estado" deja de tener sentido ya que los cambios de estado se asentaran
    %en la variable "edo_nuevo"

%Se lee el archivo de los cambios
pf_ar2=fopen(arc2,'r');
contenido_mov=fscanf(pf_ar2,'%f');
fclose(pf_ar2);

cantidad_cambios = contenido_mov(1);%en el renglón 1 del archivo de cambios se especifica
    %el número de cambios

apun_m = 2;%se genera un nuevo apuntador

for t=1:cantidad_cambios
    %En este ciclo for se realiza el cambio de 1->0 o 0->1 y se guarda en
    %la nueva variable "estado_nuevo"
        if estado(contenido_mov(apun_m)) == 1
            estado_nuevo(contenido_mov(apun_m)) = 0;
        else
            estado_nuevo(contenido_mov(apun_m)) = 1;
        end
        apun_m = apun_m + 1;
    end
end
v=0;%ayuda de la programacion, se puede omitir
%en la siguientes sección únicamente se crea el archivo resultante
pf_sal = fopen(arc3, 'w');
fprintf(pf_sal, '\t****RESULTADO****\n\r\n\r\n\r\n\r');
fprintf(pf_sal, 'Por fuente:');

%% Solución

```

```

for k=1:cont_fuentes %en este for recorre cada una de las fuentes
    nodo_inicial = arreglo_fuentes(k);%en "nodo inicial se guarda el valor de las fuentes"
    visitados(nodo_inicial)=1; %variable que funciona para marcar como visitada la fuente
    grupo_final(nodo_inicial) = 0;%asigna el grupo a la fuente
    padre(nodo_inicial) = -1;%los nodos de las fuentes quedan como -1
    %por no venir de ningun otro
    if estado_nuevo(nodo_inicial) == 1
        ap_i=1;%apunta al usuario a atender
        ap_f=1;%apunta al ultimo usuario a atender
        fprintf(pf_sal, '\n\r\n\r\t FUENTE: %d \tGrupo = %d \n\r\n\r', nodo_inicial,
grupo_final(nodo_inicial));
        %el for siguiente es para formar a los que se tienen que atender (discriminando)
        for l=1:cantidad_conexiones(nodo_inicial)
            if estado_nuevo(hijos(nodo_inicial, l)) == 0 %no lo forma y solo se marca
                %porque esta abierto
                grupo_final(hijos(nodo_inicial, l)) = -1; % grupo(hijos(nodo_inicial, l));
                padre(hijos(nodo_inicial, l)) = -2;
            end
            if visitados(hijos(nodo_inicial, l)) == 0 && estado_nuevo(hijos(nodo_inicial, l))
== 1%forma el nodo ya que esta cerrado y aparte no visitado
                estructura(ap_f)=hijos(nodo_inicial, l);
                %la variable estructura es la fila de atención con los índices ap_i y ap_f
                padre(hijos(nodo_inicial, l)) = nodo_inicial;
                ap_f = ap_f + 1;
                visitados(hijos(nodo_inicial, l))= 1;
            end
        end
        while ap_i < ap_f%ientras existan nodos por atender
            nodo_actual = estructura(ap_i);%en las siguientes líneas asigna el grupo a cada
            % uno de los nodos de visita
            if grupo_final(padre(nodo_actual)) + 1 < 5
                grupo_final(nodo_actual) = grupo_final(padre(nodo_actual)) + 1;
            else
                grupo_final(nodo_actual) = 4;
            end
            fprintf(pf_sal, '\t NODO : %d \tGrupo = %d \n\r\n\r', nodo_actual,
grupo_final(nodo_actual));
            for u=1:cantidad_conexiones(nodo_actual)%ya formando los hijos de cada nodo
                if estado_nuevo(hijos(nodo_actual, u)) == 0
                    grupo_final(hijos(nodo_actual, u)) = -1; % grupo(hijos(nodo_actual, u));
                    padre(hijos(nodo_actual, u)) = -2;
                end
                if visitados(hijos(nodo_actual, u))==0 && estado_nuevo(hijos(nodo_actual, u))
== 1
                    estructura(ap_f)=hijos(nodo_actual, u);
                    padre(hijos(nodo_actual, u)) = nodo_actual;
                    ap_f = ap_f + 1;
                    visitados(hijos(nodo_actual, u))= 1;
                end
            end
            ap_i = ap_i + 1;%se incrementa el puntero de atención hasta =ap_f
        end %
    end %fin de la validación de fuente cerrada o abierta

end%fin del recorrido del for

fprintf(pf_sal, '\nPor Nodo: \n\r\n\r');
for h=1:cantidad_fuentes
    if estado_nuevo(h) == 1
        fprintf(pf_sal, '\t NODO: %d \tGrupo = %d \n\r\n\r', h, grupo_final(h));
    else
        fprintf(pf_sal, '\t NODO: %d \tESTA ABIERTO \n\r\n\r', h);
    end
end
end

fclose(pf_sal);
end

```

```

function varargout = interfaz(varargin)
% INTERFAZ MATLAB code for interfaz.fig
%   INTERFAZ, by itself, creates a new INTERFAZ or raises the existing
%   singleton*.
%
%   H = INTERFAZ returns the handle to a new INTERFAZ or the handle to
%   the existing singleton*.
%
%   INTERFAZ('CALLBACK',hObject,eventData,handles,...) calls the local
%   function named CALLBACK in INTERFAZ.M with the given input arguments.
%
%   INTERFAZ('Property','Value',...) creates a new INTERFAZ or raises the
%   existing singleton*. Starting from the left, property value pairs are
%   applied to the GUI before interfaz_OpeningFcn gets called. An
%   unrecognized property name or invalid value makes property application
%   stop. All inputs are passed to interfaz_OpeningFcn via varargin.
%   *See GUI Options on GUIDE's Tools menu. Choose "GUI allows only one
%   instance to run (singleton)".
% See also: GUIDE, GUIDATA, GUIHANDLES
% Edit the above text to modify the response to help interfaz
% Last Modified by GUIDE v2.5 22-Jun-2015 13:21:20
% Begin initialization code - DO NOT EDIT
gui_Singleton = 1;
gui_State = struct('gui_Name',       mfilename, ...
                  'gui_Singleton',   gui_Singleton, ...
                  'gui_OpeningFcn', @interfaz_OpeningFcn, ...
                  'gui_OutputFcn',  @interfaz_OutputFcn, ...
                  'gui_LayoutFcn',  [] , ...
                  'gui_Callback',    []);
if nargin && ischar(varargin{1})
    gui_State.gui_Callback = str2func(varargin{1});
end
if nargout
    [varargout{1:nargout}] = gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
else
    gui_mainfcn(gui_State, varargin{:});
end
% End initialization code - DO NOT EDIT

% --- Executes just before interfaz is made visible.
function interfaz_OpeningFcn(hObject, eventdata, handles, varargin)
% This function has no output args, see OutputFcn.
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% varargin   command line arguments to interfaz (see VARARGIN)
% Choose default command line output for interfaz
handles.output = hObject;
% Update handles structure
guidata(hObject, handles);
% UIWAIT makes interfaz wait for user response (see UIRESUME)
% uiwait(handles.figure1);

% --- Outputs from this function are returned to the command line.
function varargout = interfaz_OutputFcn(hObject, eventdata, handles)
% varargout  cell array for returning output args (see VARARGOUT);
% hObject    handle to figure
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Get default command line output from handles structure
varargout{1} = handles.output;

function estado_inicial_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to estado_inicial (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of estado_inicial as text
%        str2double(get(hObject,'String')) returns contents of estado_inicial as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function estado_inicial_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)

```

```

% hObject    handle to estado_inicial (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.
if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

function movimientos_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to movimientos (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Hints: get(hObject,'String') returns contents of movimientos as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of movimientos as a double

% --- Executes during object creation, after setting all properties.
function movimientos_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to movimientos (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called
% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

% --- Executes on button press in procesar.
function procesar_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to procesar (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)
% Nombre del archivo con el estado inicial del circuito
archivo1=get(handles.estado_inicial,'string');
% Nombre del archivo con el listado de movimientos
archivo2=get(handles.movimientos,'string');
% Nombre del archivo de salida
archivo3=get(handles.resultado,'string');
[arr_fuentes] = procesa(archivo1, archivo2, archivo3);

function resultado_Callback(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to resultado (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    structure with handles and user data (see GUIDATA)

% Hints: get(hObject,'String') returns contents of resultado as text
%         str2double(get(hObject,'String')) returns contents of resultado as a double
% --- Executes during object creation, after setting all properties.

function resultado_CreateFcn(hObject, eventdata, handles)
% hObject    handle to resultado (see GCBO)
% eventdata  reserved - to be defined in a future version of MATLAB
% handles    empty - handles not created until after all CreateFcns called

% Hint: edit controls usually have a white background on Windows.
%           See ISPC and COMPUTER.

if ispc && isequal(get(hObject,'BackgroundColor'), get(0,'defaultUicontrolBackgroundColor'))
    set(hObject,'BackgroundColor','white');
end

```