

## PROTEC: UN SOFTWARE PARA COORDINACION DE PROTECCIONES EN ALIMENTADORES RADIALES DE DISTRIBUCION

Manuel J. Villarroel\*  
Sergio E. Carter  
Georgina I. Gutiérrez  
Hugo H. Mora  
Carlos F. Neira

*En este trabajo se presenta un programa computacional desarrollado en lenguaje FORTRAN, totalmente interactivo, que permite elegir, coordinando en forma adecuada, las protecciones eléctricas de un Alimentador de Distribución Radial. El programa se ha corrido en un microcomputador IBM compatible y como características más relevantes aparecen su gran rapidez de cálculo y pequeño requerimiento de memoria, lo que lo muestra como una herramienta de mucha utilidad en el diseño del sistema de protecciones de redes de distribución radial. De las diversas pruebas a las que ha sido sometido, se ilustra la aplicación a un alimentador que consta de once "puntos singulares". Los resultados son muy satisfactorios y, en el caso particular del alimentador citado, no aparecen diferencias importantes respecto a los obtenidos utilizando otros medios. Como ventajas presenta que se logra un gran ahorro de tiempo y que permite considerar otras soluciones alternativas.*

### INTRODUCCION

La selectividad es una de las principales características que deben tener los sistemas de protecciones. Esto significa que es necesario efectuar una adecuada coordinación de la operación de los diferentes elementos de manera que, en el caso de fallas, se aislen en forma rápida las zonas afectadas.

Cuando se trata de sistemas eléctricos de pequeño tamaño, los estudios de

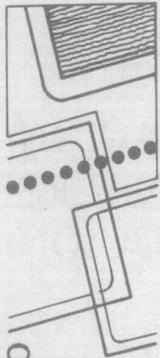
coordinación de protecciones pueden realizarse en forma manual (Silva y Briones, 1982). Sin embargo, cuando la cantidad de protecciones involucradas es considerable, se hace necesario emplear computadores digitales (Leal, 1978; Langhans, 1980; Damborg, 1984; Ramaswami *et al*, 1984; Arriagada *et al*, 1988).

Para realizar un proyecto de coordinación se requiere contar con las características de operación (corrientes nominales, curvas tiempo-corriente, etc) de las protecciones, las que son entregadas por los fabricantes (Mc Graw Edison Co, 1980) en forma de tablas de valores y(o) curvas.

Para la coordinación de protecciones utilizando computadores digitales, algunos trabajan en procesos BATCH (Leal, 1978), otros utilizan técnicas gráficas (Langhans, 1980). La gran mayoría, sin embargo, se preocupa en particular de las redes enmalladas de transmisión, para lo cual consideran relés direccionales (Damborg, 1984; Ramaswami, 1984; Arriagada *et al*, 1988).

En este trabajo se consideran sistemas radiales, típicos en redes primarias de distribución, con sus protecciones asociadas, esto es, desconectores fusibles, reconectores y seccionalizadores. Para ello se ha desarrollado un programa computacional interactivo que, considerando las características del

\* Departamento de Ingeniería Eléctrica. Facultad de Ingeniería y Administración. Universidad de la Frontera. Casilla 54-D. Temuco, Chile.



PROTEC: UN SOFTWARE PARA CO

En este trabajo computacional en lenguaje FORTRAN que permite ele adecuada, las Alimentador d El programa e tador IBM co más relevan cálculo y pa lo que lo m mucha utili protector De las di sometido alimen singular: satisfi alimen impor utiliz pres tien sol

sistema y las curvas de operación de los dispositivos de protección, determina el conjunto más adecuado de éstos que satisfaga los requerimientos de rapidez y selectividad.

**PROGRAMA COMPUTACIONAL**

**Consideraciones preliminares**

La gran cantidad de cálculos que requiere el proyectar un sistema adecuado de protecciones así como el hecho de que éstos son de tipo repetitivo, hace pensar en la conveniencia de establecer algoritmos que permitan efectuar el proceso usando un computador digital. A continuación se resumen los diferentes aspectos considerados en la implementación del programa, así como las características y limitaciones que éste presenta.

**Estructura topológica**

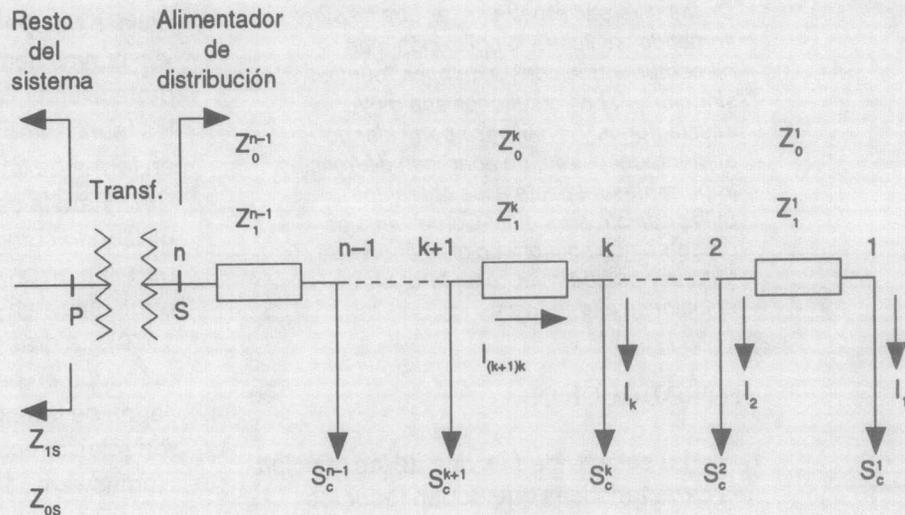
La Figura 1 muestra el diagrama unilineal representativo del sistema típico.

**Cálculo de cortocircuitos**

Para determinar las corrientes de cortocircuito, es necesario conocer los datos indicados anteriormente. Las impedancias deben estar expresadas en tanto por uno respecto a una base común y en el caso del cortocircuito monofásico se requiere disponer de la conexión del transformador y la impedancia de falla.

Las expresiones empleadas (Mc Graw Edison Co., 1980) son:

$$I_{3f}^k = \frac{V_0}{Z_{eq}^k} \cdot \frac{S_B}{\sqrt{3} V_B} \quad \text{Ecuación 1}$$



- n : número de puntos singulares del alimentador.
- $Z_1^n, Z_0^n$  : impedancias de secuencia positiva y cero de la línea entre los puntos singulares k y k+1.
- $Z_1^k, Z_0^k$  : impedancias de secuencia positiva y cero equivalentes de la subestación.
- $Z_{1s}, Z_{0s}$  : impedancias de secuencia positiva y cero del resto del sistema.
- $S_c^k$  : potencia aparente en Volt-Amperes consumida en el arranque k.

FIGURA 1. Estructura topológica del sistema.

Para la coordinación de protecciones utilizando computadores digitales, algunos trabajan en procesos BATCH otros utilizan técnicas gráficas. La gran mayoría, sin embargo, se preocupa en particular de las redes enmalladas de transmisión

$$I_{11}^k = \frac{3 V_0 S_B}{Z_{0s} + 3 Z_1 + \sum_{k=1}^n (Z_0^k + 2 Z_1^k)} \sqrt{3} V_B$$

Ecuación 2

en las que:

- $I_{3f}^k, I_{1f}^k$  : corrientes de falla trifásica y monofásica en el punto singular k, en amperes
- $V_0$  : tensión de operación del alimentador (en tanto por unidad)
- $S_B, V_B$  : potencia y tensión base
- $Z_1$  : impedancia de falla
- $Z_{eq}^k$  : impedancia de secuencia positiva (en tanto por uno) vista desde el punto singular considerado hasta el centro de generación y cuyo valor es:

$$Z_{eq}^k = Z_{1s} + \sum_{k=1}^n Z_1^k$$

Ecuación 3

### Cálculo de corrientes nominales

Las corrientes en los arranques se evalúan según la expresión:

$$I_N^k = \frac{S_c [FP^k + j \text{sen}(\cos^{-1} FP^k)]}{\sqrt{3} V_0}$$

Ecuación 4

en que el signo negativo o positivo depende de si el consumo es inductivo o capacitivo y  $FP^k$  es el factor de potencia de la carga en el arranque k. En este caso  $V_0$  debe estar en volts.

### Coordinación de protecciones

Una vez conocidas las corrientes nominales y de falla en todos los puntos de

interés del alimentador, se inicia el proceso de coordinación. Para ello se utiliza la configuración de protecciones entregada por el diseñador, con la que el programa selecciona y(o) ajusta los diferentes elementos, considerando las características de operación de éstos y teniendo presente las reglas que permitan asegurar una adecuada selectividad y rapidez (Mc Graw Edison Co., 1980; Mora y Neira, 1983).

### Curvas de operación de fusibles y reconectores automáticos

La representación de estas curvas se hace formando una matriz de orden "m x n", en que (m-1) filas corresponden al número de curvas que contiene la matriz y n es la cantidad de puntos muestreados. La primera fila contiene los distintos valores de corriente considerados.

Aunque en otros trabajos se emplea una representación polinomial de las curvas de las protecciones (Arriagada *et al*, 1988), este método es poco adecuado cuando se trata de elementos con características tales como los fusibles y conectores, debido a que requiere la utilización de polinomios de ajuste de grado elevado. Por ello se ha preferido la representación como matrices de puntos.

Para obtener un valor de tiempo no contemplado en la matriz, se efectúa una interpolación lineal entre los valores anterior y posterior de corriente.

La precisión obtenida depende de la cantidad de puntos de que se disponga para cada curva, teniendo presente que debe ser mayor en aquella parte de la característica que tenga una mayor curvatura.

### Diagrama de flujo general

El programa computacional completo puede dividirse en cinco grandes bloques:

dos de ellos correspondientes a la entrada y salida de datos; mientras que los restantes se refieren al cálculo de corrientes nominales y de falla y a la coordinación de protecciones.

En la Figura 2 se muestra el diagrama de flujo general del programa, en el que se puede apreciar lo siguiente:

- El primer bloque corresponde a la lectura y archivo de todos los datos, lo que se realiza mediante tres programas, que permiten leer y almacenar

vectores y matrices (características de las protecciones), además de los valores de tensión, impedancia, etc., del alimentador mismo.

- A continuación comienza el programa principal con la lectura de la configuración de protecciones, cálculo e impresión de corrientes de cortocircuito y nominales, para, finalmente, ajustar los diferentes elementos de protección.
- El último bloque permite imprimir y archivar los resultados obtenidos.

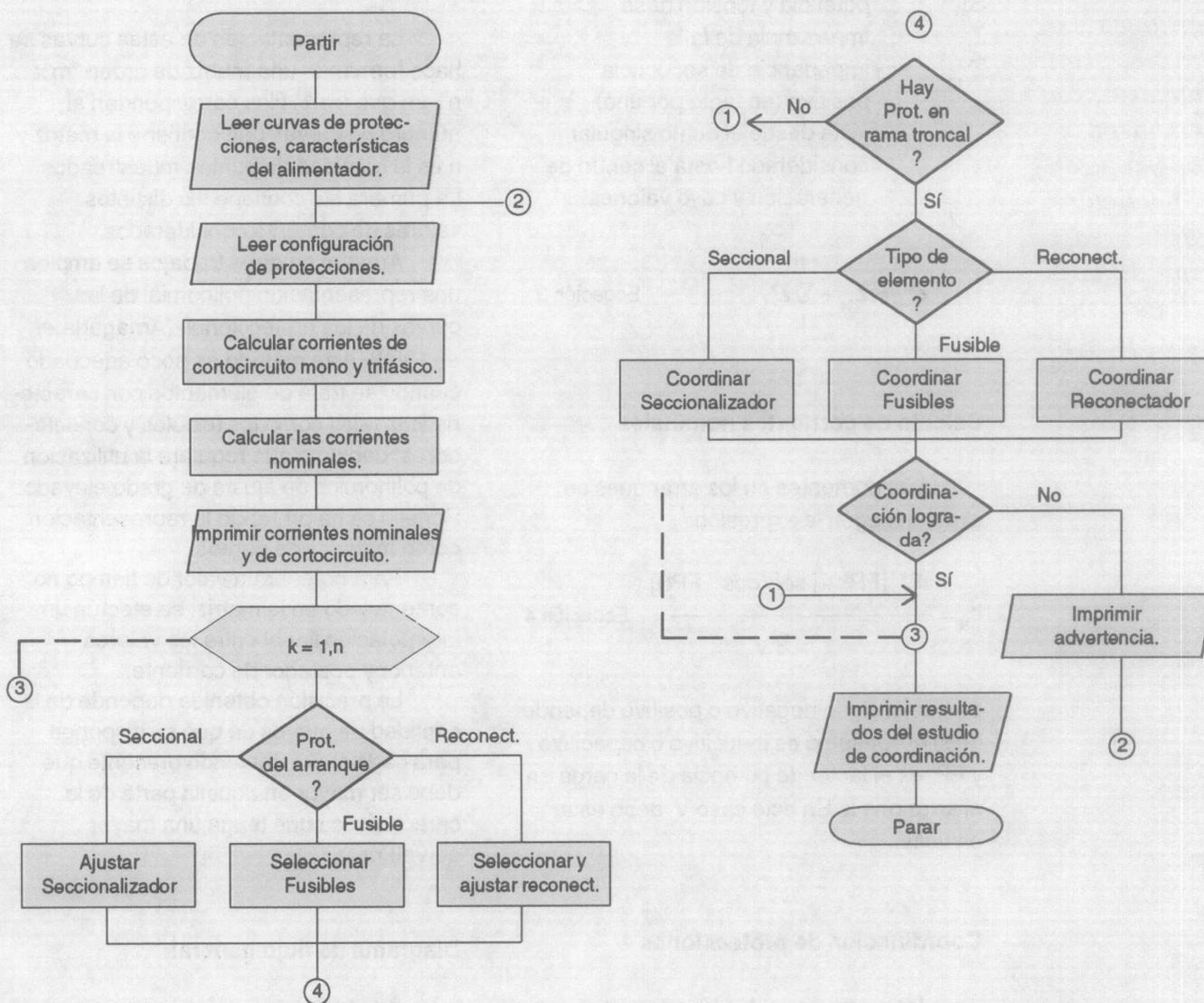


FIGURA 2. Diagrama de flujo general del programa.

*En este trabajo se consideran sistemas radiales, típicos en redes primarias de distribución, con sus protecciones asociadas, esto es, desconectadores fusibles, reconectores y seccionadores.*

### **Características y limitaciones del programa**

- Todos los valores que deben ser archivados son "pedidos" por el programa, en forma totalmente interactiva, lo que facilita el ingreso de datos.
- La configuración de protecciones puede ser cambiada cuando no sea posible coordinar alguna de ellas. En este caso el programa advierte al usuario el problema y sugiere el posible cambio. Desde este punto de vista es conveniente mencionar que no se requiere hacer un estudio previo de elementos por usar, ya que se puede partir con cualquier configuración.
- Si es necesario, se puede solicitar ayuda para emplear el programa, en cuyo caso aparecen en pantalla una serie de definiciones y formatos de entrada de datos.
- Además de las curvas de operación, el programa "pide" al usuario los datos adicionales que requiere un reconector (número de operaciones rápidas, tiempos de reconexión, etc) y un seccionador (tiempo de memoria).

Entre las limitaciones podemos citar las siguientes:

- El número de puntos singulares está limitado solo por la capacidad de memoria del computador. Sin embargo, se ha utilizado en sistemas de hasta 100 puntos singulares, con muy buenos resultados y pequeños tiempos de ejecución.
- La estructura topológica del sistema es fija, considerando "n" puntos singulares, (n-1) arranques, sin subarranques y con tensión constante en todo el alimentador.

## **RESULTADOS**

### **Proceso**

En el Apéndice se muestran algunas partes del proceso interactivo, a través de

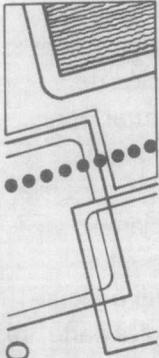
los programas de lectura de datos y principal, así como los resultados obtenidos en el estudio de coordinación de protecciones del alimentador rural "Rio Hurtado", de 13 200 volts, 84 km de longitud, ubicado en la III Región de Chile. Se ha preferido mostrar este ejemplo ya que por contar con solo once puntos singulares, es posible presentar adecuadamente los resultados y por otra parte, se dispone de la información obtenida al hacer el estudio y cálculos en forma manual. Esto permite hacer un análisis comparativo de los resultados.

Para efectos de este estudio, se supone que los dos primeros programas han sido ejecutados y que por lo tanto, las características de las protecciones se encuentran almacenadas.

### **Discusión de resultados**

Considerando los resultados obtenidos mediante este programa y los obtenidos por Silva y Briones (1982) se puede observar lo siguiente:

- Las corrientes nominales y de cortocircuito son prácticamente iguales.
- Los fusibles elegidos presentan diferencias solo en los arranques 4 y 6. Para el primero, la solución manual, (Silva y Briones, 1982) elige 3T, debido a que es el de menor capacidad con que se contaba, en cambio, en la solución computacional se dispuso de los fusibles 1T y 2T, por lo que se escogió el 2T. En el arranque 6 tanto el fusible 15T como el 12T coordinan con el reconector ubicado aguas arriba, por lo que el programa consideró el de menor capacidad (12T).
- La elección de los reconectores presenta diferencias en cuanto a la corriente de mínima operación, menor en este trabajo, siendo ambos



**PROTEC: UN SOFTWARE PARA CO**

**E**n este trabajo se presenta un software desarrollado en lenguaje FORTRAN que permite el diseño de un sistema de protecciones para un alimentador radial. El programa es compatible con IBM compatible y más relevante es el cálculo y programación que lo hace muy útil para el diseñador. De las características del software se puede mencionar: alimentación singular, satisfacción al implementar, utilización y presentación de resultados.

valores correctos. Esto trae como consecuencia el que existan discrepancias en las curvas lentas elegidas.

- El ajuste de corriente mínima de los seccionadores está en concordancia con la de los reconectores y por esta razón existen leves diferencias entre ambos estudios.

**CONCLUSIONES**

- Con el *software* presentado, se puede proyectar un sistema de protecciones para un alimentador radial, estando limitado en su tamaño, solo por la capacidad de memoria del computador en que se ejecute.
- El proceso interactivo permite efectuar en forma sencilla todos los cálculos y(o) ajustes. De esta forma, se puede llegar a obtener un sistema adecuado de protecciones sin haberlo diseñado en forma previa.
- En cuanto a las posibilidades de aplicación, éstas no se circunscriben solo al alimentador típico ya que es posible emplearlo en cualquier sistema que contemple protecciones en cascada.
- Del análisis de los resultados obtenidos se puede asegurar que el conjunto de protecciones proyectado está acorde con los requerimientos del sistema. Sin embargo, esta solución no es la única técnicamente aceptable. En general, los alimentadores radiales admiten varias soluciones, sin pérdida de confiabilidad.

**REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS**

1. Ariagada, A. *et al. Software para coordinación de protecciones direccionales de sobrecorrientes en sistemas eléctricos enmallados. Anales II Seminario IEEE* Vol. 1, p. 91-97, Noviembre 1988.
2. Damborg, M. J. *Computer aided Transmission Protection System Design, Part I, Algorithms. IEEE TRANS ON PAS-103* Vol. 1, p. 51-57, January 1984.
3. Langhans, J. D., Ronat, A. *Protective Devices Coordination via Computer Graphics. IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 1A-16 no. 3, p. 404-412, May/June 1980.
4. Leal, F. **Selección, coordinación y ubicación automática de las protecciones eléctricas en un sistema de distribución radial**, Memoria Ingeniero Civil, Universidad Técnica del Estado, Departamento de Electricidad, Santiago de Chile, 1978.
5. Mc Graw Edison Company, Power Systems Division. **Distribution System Protection Manual**. Bulletin no. 71022, 1980.
6. Mora, H. H., Neira, C. F. **Coordinación computarizada de protecciones en un alimentador de distribución radial**. Memoria Ingeniero de Ejecución en Electricidad, Universidad de la Frontera, Departamento de Electricidad, Temuco, Chile, 1983.
7. Ramaswami, R. *et al. Computer aided transmission protection system design. Part II, Implementation and results. IEEE TRANS ON PAS-103*, Vol. 1, p. 60-65, January 1984.
8. Silva, M. E., Briones, S. C. **Aplicación de los reconectores y seccionadores electrónicos en alimentadores de distribución**, Memoria Ingeniero de Ejecución en Electricidad, Universidad de la Frontera, Departamento de Electricidad, Temuco, Chile, 1982.

## APENDICE

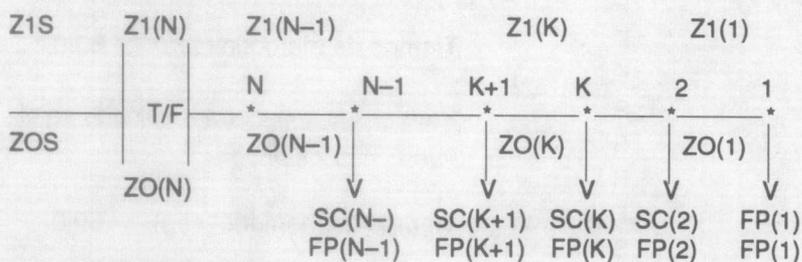
### A. PROGRAMA DE ENTRADA

#### COORDINACION DE PROTECCIONES EN UN ALIMENTADOR DE DISTRIBUCION RADIAL

Cuando desee ingresar sus datos presione la tecla "Return". Si necesita ayuda escriba "SOS" y presione "Return".

"S.O.S."

#### 1.- Estructura topológica del sistema



N = Número de puntos singulares.

Z1(K) y ZO(K) representan las impedancias de SEC(+) y SEC(0) entre los puntos singulares K y K+1.

SC(K) y FP(K) representan el consumo y factor de potencia para el arranque K-ESIMO.

Z1S y ZOS representan impedancia de SEC(+) y SEC(0) del resto del sistema.

#### 2. Definiciones

- Punto singular:** es todo punto donde se consulta el cálculo de cortocircuito.
- Rama troncal :** en un alimentador se considera como rama troncal la

línea que nace en la subestación primaria y distribuye la energía a todos los centros de consumos.

**Arranque :** es una línea que nace en la rama troncal, la que mediante un transformador alimenta consumos en baja tensión.

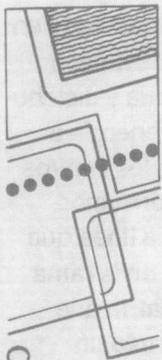
#### 3. Formato para entradas de datos

Puntos singulares	: I3
Tensión base (K.V.)	: G10.2
Potencia base (M.V.A.)	: G10.2
Tensión del alimentador (P. U.)	: 2F10.2
Resistencia de falla en (OHMS)	: G10.2
Conexiones del transformador	: A2
CLAVES : triángulo	: TR
estrella a tierra	: EN
estrella aislada	: EA
Impedancias en general	: 2F10.2
Cargas nominales en (K.V.A.)	: F10.2
Factores de potencia	: F10.2
Si existen cargas capacitivas	: A2
CLAVES : atraso	: AT
adelanto	: AD

### B. PROGRAMA PRINCIPAL

#### COORDINACION DE PROTECCIONES DE UN ALIMENTADOR DE DISTRIBUCION RADIAL

Espere instrucciones



**E**n este trabajo se describe el funcionamiento del lenguaje FORTI que permite eleger la protección adecuada, las características del Alimentador de potencia. El programa es compatible con IBM con los datos más relevantes de cálculo y protección. De las muchas utilidades de protección de las diversas alimentaciones singulares satisfactorias al momento de utilizarlo.

Designe el tipo de protección que se va a usar en los puntos que se indican. La clave es:

- fusible : F
- reconectador : R
- seccionalizador : S

Punto por proteger	Elemento de protección
1 - 1	F
2 - 2	F
3 - 2	F
3 - 3	F
4 - 3	F
4 - 4	F
5 - 4	F
5 - 5	F
6 - 5	F
6 - 6	F
7 - 6	S
7 - 7	S
8 - 7	R
8 - 8	F
9 - 8	S
9 - 9	F
10 - 9	
10 - 10	S
11 - 10	R

- Para el reconectador ubicado en el punto 8-7 debe indicar lo siguiente:

- Número de operaciones rápidas : 2
- Tiempo primera reconexión (seg) : 2.0
- Tiempo segunda reconexión (seg) : 2.0
- Tiempo tercera reconexión (seg) : 2.0

- Para el reconectador ubicado en el punto 11-10 debe indicar lo siguiente:

- Número de operaciones rápidas : 2
- Tiempo primera reconexión (seg) : 2.0

- Tiempo segunda reconexión (seg) : 2.0
- Tiempo tercera reconexión (seg) : 2.0

- Para el seccionalizador ubicado en el punto 7-6 indique:

- Tiempo de memoria (seg) : 60.0

- Para el seccionalizador ubicado en el punto 7-7 indique:

- Tiempo de memoria (seg) : 60.0

- Para el seccionalizador ubicado en el punto 9-8 indique:

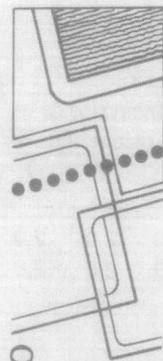
- Tiempo de memoria (seg) : 60.0

- Para el seccionalizador ubicado en el punto 10-10 indique:

- Tiempo de memoria (seg) : 60.0

**C. Resultados**

<i>Coordinación de protecciones en un alimentador de distribución radial</i>	
Tensión de operación .....	13.20 KV
Potencia base .....	100.0 MVA
Puntos singulares .....	11
Resistencia de falla .....	.00 OMHS
Protecciones empleadas:	
Fusibles .....	: 12
Reconectores .....	: 2
Seccionalizadores .....	: 4



**PROTEC: UN SOFTWARE PARA CO**

En este trabajo se utiliza el lenguaje de programación FORTI que permite el cálculo de las corrientes de cortocircuito. El programa es compatible con IBM y permite el cálculo y la impresión de los resultados. De las características más importantes del programa se puede mencionar:

*Corrientes nominales.*

Arranques				Rama troncal			
Ubicación		Magnitud [amperes]	Angulo [grados]	Ubicación		Magnitud [amperes]	Angulo [grados]
1	1	2,540	-31,79	2	1	2,540	-31,79
2	2	3,930	-25,84	3	2	6,462	-28,18
3	3	4,110	-33,90	4	3	10,559	-30,40
4	4	2,370	-36,87	5	4	12,917	-31,59
5	5	3,000	-36,87	6	5	15,906	-32,58
6	6	17,190	-38,74	7	6	33,049	-35,78
7	7	48,440	-41,41	8	7	81,394	-39,13
8	8	27,980	-36,87	9	8	109,358	-38,55
9	9	9,000	-34,92	10	9	118,341	-38,27
10	10	45,960	-31,79	11	10	164,089	-36,46

*Cálculo de cortocircuitos.*

Corriente falla monofásica			Corriente falla trifásica	
Punto singular	Magnitud [amperes]	Angulo [grados]	Magnitud [amperes]	Angulo [grados]
1	62,6242	-37,5133	66,7948	-18,9038
2	71,7132	-37,9608	77,5993	-19,4571
3	90,0731	-38,8720	100,4110	-20,6265
4	122,6436	-40,4820	144,3793	-22,8870
5	153,3797	-40,4790	177,2525	-22,8305
6	356,9108	-40,4685	367,8792	-22,5117
7	1629,2200	-63,1262	1976,1880	-56,5468
8	1881,2780	-64,7902	2198,6370	-59,3614
9	2010,2480	-65,6456	2304,8230	-60,7287
10	2222,5770	-67,0605	2469,1180	-62,8788
11	4166,0810	-80,5892	3517,0050	-78,0502

*Selección de fusibles.*

Ubicación	Hilo fusible	Max. cte. permanente	Cte. nom. en pto.	Cte. de falla max.	Tiempo de fusión	Tiempo de aclar.	
1	1	3.T	5,0	2,54	66,79	0,0432	0,1019
2	2	3.T	5,0	3,93	77,60	0,0332	0,0774
3	2	6.T	9,0	6,46	100,41	0,1543	0,2818
3	3	3.T	5,0	4,11	100,41	0,0199	0,0584
4	3	10.T	15,0	10,56	144,38	0,3901	0,6008
4	4	2.T	2,5	2,37	144,38	0,0000	0,0347
5	4	15.T	23,0	12,92	177,25	0,8775	1,3683
5	5	3.T	5,0	3,00	177,25	0,0045	0,0357
6	5	25.T	38,0	15,91	367,88	0,6577	1,1336
6	6	12.T	18,0	17,19	367,88	0,1482	0,2475
8	8	65.T	95,0	27,98	2198,64	0,1111	0,1866
9	9	65.T	95,0	9,00	2304,82	0,1063	0,1794

*Selección y ajuste de reconectores.*

Ubicación	Tipo de rec.	Secuencia de oper. ráp.-lent.	Cte. de mínima oper.	Cte. de falla máxima	Tipo de operac. c. lenta	Tipo de operac. c. ráp.	Intervalos de reconexión		
							1	2	3
8	7	RE	140.	2198,6	0,076	0,040	2,0	2,0	2,0
11	10	WE	340.	4166,1	0,110	0,045	2,0	2,0	2,0

*Ajuste de seccionalizadores.*

Ubicación		Número de conteos	I. de mínima operación	Tiempo de memoria	Tiempo de reposición
7	6	3	112,0	60,00	450,00
7	7	3	112,0	60,00	450,00
9	8	3	296,0	60,00	450,00
10	10	3	296,0	60,00	450,00

Observación: tiempos en segundos  
corrientes en amperes