

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE BAJA CALIFORNIA
FACULTAD DE INGENIERÍA



**Elaboración de Herramientas Computacionales en Matlab
Para el diseño de Subestaciones Eléctricas**

T E S I S

**que presenta para obtener el título de Ingeniero Mecánico Electricista
con Especialidad en Electricidad**

DAVID MALDONADO GONZALEZ

**Mexicali, B.C.
ÍNDICE**

Octubre de 2010

	<u>pagina</u>
1. Introducción.	1
2. Conceptos básicos en una subestación	3
2.1 Capacidad de la subestación.	3
2.2 Determinación de corrientes de línea	3
2.2.1 Corriente en alta tensión 115 KV.	3
2.2.2 Corriente en baja tensión 13.8 KV.	4
2.2.3 Selección del conductor.	4
2.3 Estudio de corto circuito.	5
2.3.1 Diagrama unifilar.	6
2.3.2 Impedancia equivalente del sistema al bus de 115 KV.	6
2.3.3 Impedancia del transformador.	7
2.3.4 Potencias de corto circuito al bus de 13.8 KV.	8
3. Estudio de red de tierras	10
3.1 Calibre del conductor.	10
3.2 Resistencia a tierra de la red	11
3.3 Determinación del número de varillas (electrodos)	12
3.4 Tensión de malla.	13
3.5 Potencial de paso	15
3.6 Potencial de contacto	15
3.7 Obtención de potenciales críticos para el personal que transita dentro de la subestación o en áreas circunvecinas	16
3.8 Análisis de potenciales para determinar si la malla ofrece seguridad al personal que transita por ella	17
4. Coordinación de protecciones	18
4.1 Ajustes de relevador 51H de lado de alta tensión 115 KV	18

4.1.1 Pick-up de relevador	18
4.1.2 Selección de RTC	19
4.1.3 Selección de Tap	20
4.1.4 Determinación de palanca	20
4.1.5 Ajuste de la unidad instantáneo (50)	21
4.1.6 Ajustes del relevador 51H tipo SEL 251 curva muy inversa	21
4.2 Ajustes del relevador 51MT lado de baja tensión 13.8 KV	22
4.2.1 Pick-up del relevador	22
4.2.2 Selección de RTC	23
4.2.3 Selección de Tap	23
4.2.4 Determinación de palanca	23
4.2.5 Ajustes del relevador 51MT marca SEL 251 curva muy inversa	23
4.3 Ajustes del relevador 51NT del neutro del transformador	24
4.3.1 Pick-up del relevador	24
4.3.2 Selección de RTC	24
4.3.3 Selección de Tap	25
4.3.4 Determinación de palanca	25
4.3.5 Ajustes del relevador 51NT marca SEL 251 curva muy inversa	25
4.4 Ajustes del relevador 51NB lado de baja tensión 13.8 KV	
4.2.1 Pick-up del relevador	26
4.2.2 Selección de RTC	26
4.2.3 Selección de Tap	26
4.2.4 Determinación de palanca	26
4.2.5 Ajustes del relevador 51NB marca SEL 251 curva muy inversa	27
5. Diseño de herramientas computacionales en Matlab para el diseño subestaciones eléctricas	28

5.1 Coordinación de protecciones de sobrecorriente de transformador	28
5.1.1 Introducción	28
5.1.2 Elaboración del programa (herramienta)	29
5.1.3 Entrada de datos	29
5.1.4 Salida de datos	31
5.1.5 Gráfica de daño del transformador	35
5.2 Diseño de red de tierras	36
5.2.1 Introducción	36
5.2.2 Elaboración del programa (herramienta)	37
5.2.3 Entrada de datos	37
5.2.4 Salida de datos	39
6. Resultados obtenidos	42
6.1 Coordinación de protecciones de sobrecorriente de transformador utilizando Matlab	42
7. Conclusiones.	49
Apéndice A. Programas elaborados en Matlab para la coordinación de protecciones de sobrecorriente de transformador	50
A.1 Archivo coordina.m	50
A.2 Archivo cortoprueba.m	55
A.3 Archivo mcarel.m	59
A.4 Archivo rsel.m	59
Apéndice B. Programas elaborados en Matlab para el diseño de redes de tierra	62
B.1 Archivo redes.m	65
B.2 Archivo malla.m	70
B.3 Archivo imprimir.m	72

Bibliografía.

74

Dedicatoria

- Primeramente a **Dios** por haber confiado en mí y darme vida, amor y deseo de superación.
- A mis padres **José y María del Socorro** por el apoyo, esfuerzo, muchos sacrificios y cariños que me han brindado a lo largo de mi vida... han sido mi ejemplo de vida.
- A mi esposa **Blanca**, por su comprensión, amor, paciencia, esfuerzo, cariño, apoyo y por ser el pilar y mi sostén durante todos los años que hemos compartido juntos nuestra vida.
- A mis hijos **David y Rodrigo**, que, son mi adoración y quienes serán los que velen por nosotros cuando ellos estén realizados en sus vidas.
- Finalmente a todos aquellos que han hecho posible mi desarrollo personal y profesional, mis hermanos, familiares, amigos, profesores, etc.

A todos Gracias

Capítulo 1

Introducción

Actualmente la economía de un país como lo es México esta vinculada principalmente con la infraestructura eléctrica con que se cuente ya que las compañías que se van a establecer en una región determinada buscan en primera instancia que se les ofrezcan condiciones aceptables en cuanto a la demanda de energía eléctrica solicitada. Es por esto que el gobierno invierte en el desarrollo del Sistema Eléctrico Nacional mediante el Programa de Obras de Inversión del Sistema Eléctrico (POISE).

Todas las obras realizadas en las diferentes áreas conforman finalmente lo que se denomina Sistema Eléctrico de Potencia (SEP), en nuestro país el SEP esta formado por los procesos de Generación, Transmisión, Distribución y Comercialización en los cuales se cuenta con plantas de generación, líneas de transmisión y subtransmisión, subestaciones eléctricas y redes de distribución que finalmente llevan la energía eléctrica a los usuarios.

Como se mencionó anteriormente uno de los elementos que conforman el SEP son las subestaciones eléctricas las cuales pueden ser elevadoras como las que existen en las plantas de generación donde su principal función es elevar la tensión de generación a un nivel de tensión de transmisión, reductoras que son las que bajan la tensión de un nivel de transmisión a un nivel de tensión de distribución o de media tensión y las subestaciones de switch $\bar{1}$ en las cuales no se cuenta con transformación de tensión.

La División de Distribución Baja California de la Comisión Federal de Electricidad tiene a su cargo el desarrollo de la infraestructura eléctrica de distribución de los estados de Baja California, Baja California Sur y parte del estado de Sonora, para lo cual diseña y construye líneas de subtransmisión y subestaciones de distribución.

En este trabajo se presentan los cálculos matemáticos que se desarrollan para el diseño de la subestación de distribución denominada Subestación La Joya la cual cuenta con las siguientes características 1T-3F-20 MVA-115/13.8 KV-2/4A que se localizará en el municipio de Playas de Rosarito y que tiene como fecha de entrada en operación abril de 2012.

Como se verá más adelante, los cálculos necesarios son bastante tediosos y aburridos, por lo que se tienen que utilizar programas comerciales que resultan bastante costosos y por lo general no hay en el mercado un programa que desarrolle todos los cálculos.

En el capítulo II se presenta el estudio de corto circuito paso a paso, el cual sirve de base para el desarrollo del análisis de coordinación de protecciones, en el capítulo III se presenta el desarrollo del estudio de la red de tierras para conocer las máximas tensiones de paso y de contacto que se originan al presentarse una falla en la subestación, en el capítulo IV se presenta el estudio de coordinación de protecciones donde se observan los tiempos de operación de los relevadores de protección, en el capítulo V se presentan las herramientas de programación desarrolladas en Matlab para su utilización en el desarrollo de los cálculos necesarios en el diseño de la subestación. En el capítulo VI se presentan los resultados arrojados por las herramientas de programación al introducir los parámetros de diseño de la subestación. En el capítulo VII se presentan las conclusiones referentes a este trabajo y finalmente se presenta la bibliografía utilizada para la realización del presente trabajo.

Capítulo 2

Conceptos básicos de una subestación

2.1 Capacidad de la Subestación.

Para iniciar el diseño de una subestación primeramente se tiene que definir su capacidad y esta se obtiene de acuerdo con la capacidad del transformador de potencia que se instalará en la misma.

De acuerdo con el estudio del mercado eléctrico desarrollado por el departamento de planeación y la densidad de carga que tendrá la subestación se opta por instalar un transformador trifásico de 12/16/20 MVA – 115/13.8 kV. Con conexión Delta en sus devanados del lado primario de 115 Kv, y conexión estrella sólidamente aterrizada en los devanados del lado secundario de 13.8 kV y con un porcentaje de Impedancia de 6.0% respecto a la capacidad de 12 MVA.

2.2 Determinación de corrientes de línea.

2.2.1 Corriente en alta tensión (115 KV).

$$I_{nominal} = \frac{12000}{\sqrt{3} \times 115} = 60.24 \text{ Amperes} \quad (2.1)$$

3

$$I_{m\ xima} = \frac{20000}{\sqrt{3} \times 115} = 100.41 \text{ Amperes} \quad (2.2)$$

2.2.2 Corriente en baja tensión (13.8 KV).

$$I_{nominal} = \frac{12000}{\sqrt{3} \times 13.8} = 502.05 \text{ Amperes} \quad (2.3)$$

$$I_{m\ xima} = \frac{20000}{\sqrt{3} \times 13.8} = 836.76 \text{ Amperes} \quad (2.4)$$

2.2.3 Selección del conductor.

La capacidad mínima de ampacidad del conductor deberá ser tal que soporte el 125% de la corriente máxima, por lo tanto: [1].

$$125\% I_n (115 \text{ Kv}) = 1.25 \times 60.24 = 75.30 \text{ Amperes}$$

$$125\% I_{\text{max}} (115\text{kV}) = 1.25 \times 100.41 = 125.51 \text{ Amperes}$$

$$125\% I_n (13.8 \text{ Kv}) = 1.25 \times 502.05 = 627.56 \text{ Amperes}$$

$$125\% I_{\text{max}} (13.8 \text{ Kv}) = 1.25 \times 836.76 = 1045.95 \text{ Amperes}$$

Como la subestación será del tipo encapsulada en SF6 en todo lo que corresponde a la alta tensión 115 kV., el conductor seleccionada para esta voltaje es el conductor de llegada de la línea de alta tensión que se conecta a la subestación, esta línea será subterránea de 115 KV- 2C - Cable XLP – Al – 1000 KCM – 100 – B, el cual se conectará a la subestación por medio de terminales de potencia a las bahías de línea encapsuladas.

Para el lado de baja tensión del transformador (13.8 KV) se conectará el transformador con un tablero metalclad el cual contendrá el interruptor de banco en 13.8 KV, los interruptores alimentadores, un interruptor para banco de capacitores, una sección de medición, una sección de servicios propios, un interruptor de transferencia y un interruptor de amarre de bus para una futura ampliación. Esta conexión en baja tensión será mediante cable de potencia subterráneo para 15 kV, calibre 1000 KCM de cobre utilizando una disposición de dos conductores por fase.

2.3 Estudio de corto circuito.

El departamento de planeación realiza un análisis de flujos del sistema eléctrico incluyendo a la nueva subestación y a partir de este análisis se obtienen las potencias de corto circuito trifásica y monofásica en el bus de 115 KV de la subestación y con estos valores se realiza el estudio de corto circuito que consiste en obtener las potencias de corto circuito referenciadas al lado de baja tensión del transformador mediante las siguientes expresiones: [2].

Corriente de corto circuito trifásica 5500 Amperes.

Corriente de corto circuito monofásica 5100 Amperes.

$$MVA_{cc} = \sqrt{3} \times (KV_{nominales}) \times I_{cc} \times 10^3 \quad (2.5)$$

$$MVA_{cc3\phi} = \sqrt{3} \times 115 \times 5.5 = 1095.5 MVA \quad (2.6)$$

$$MVA_{cc1\phi} = \sqrt{3} \times 115 \times 5.1 = 1015.8 MVA \quad (2.7)$$

2.3.1 Diagrama unifilar

En la figura 2.1 se puede observar un diagrama unifilar de la subestación donde se muestra el arreglo de los equipos que conforman la subestación.

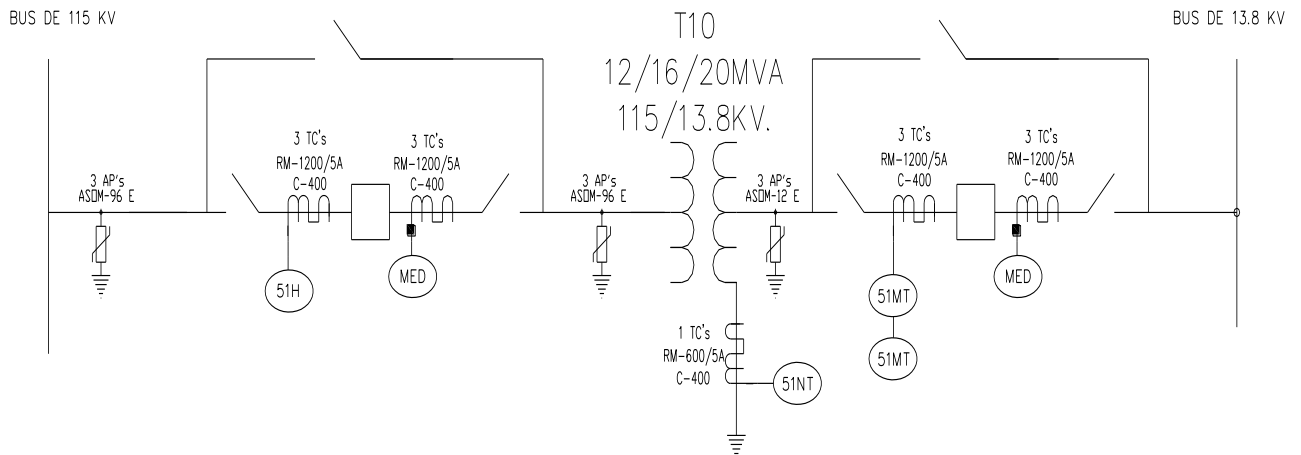


Figura 2.1 Diagrama unifilar

2.3.2 Impedancia equivalente del sistema al bus de alta tensión 115 KV.

Impedancia equivalente del sistema referida al bus de 115 KV.

$$X_{p.u.sistema} = X_1 = X_2 = \frac{MVA_{base}}{MVA_{cc3\Phi}} \quad (2-8)$$

POTENCIA BASE 100 MVA VOLTAJE BASE 115 KV

$$X_{1\text{ SISTEMA}} = \frac{100}{1095.5} = 0.091\text{ p.u.} \quad (2-9)$$

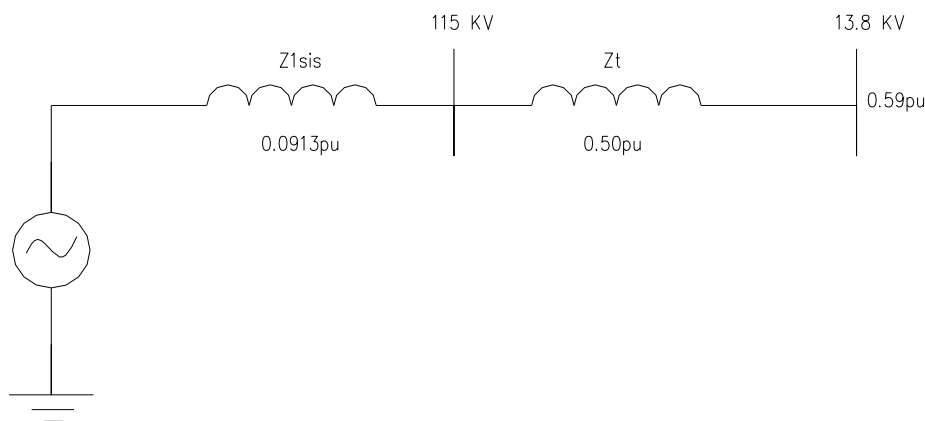
$$X_{0\text{ sistema}} = \frac{100}{1015.8} = 0.098\text{ p.u.} \quad (2-10)$$

2.3.3 Impedancia del transformador

La impedancia del transformador se obtiene mediante la siguiente ecuación:

$$X_{p.u.transformador} = X_{1t} = X_{2t} = \frac{(X\%)MVA_{base}}{MVA_{transformador}} \quad (2.11)$$

La impedancia de secuencia cero del transformador es igual a las impedancias de secuencia positiva y negativa, sólo varía en la manera de conectarse en los diagramas de secuencia.



13.8 KV

(a)

(b)

Figura 2.2 (a) Diagrama de secuencia positiva, (b) Diagrama de secuencia cero

$$X_{p.u.transformador} = \frac{0.06 \times 100}{12} = 0.50 \text{ p.u.} \quad (2.12)$$

2.3.4 Potencias de corto circuito en baja tensión 13.8 KV.

Potencias de corto circuito en el bus de 115 KV de la Subestación (lado de alta tensión del transformador), según el diagrama de secuencia positiva y negativa.

Ibase para 115 Kv.

$$I_B = \frac{100 \times 1000}{\sqrt{3} \times 115} = 502.05 \text{ Amperes} \quad (2.13)$$

$$Z_{sis} = \frac{1.0}{I_{CC3\phi}} \text{ p.u.} \quad (2.14)$$

$$I_{CC3\phi} = \frac{5500}{502.05} = 10.95 \text{ p.u.} \quad (2.15)$$

$$Z_{1sis} = \frac{1}{10.95} \text{ p.u.} = 0.0913 \text{ p.u.} \quad (2.16)$$

Potencias de corto circuito al bus de 13.8 Kv.(lado de baja tensión del transformador.

Ibase para 13.8 Kv.

$$Z_{1TOT} = Z_{1SIS} + Z_T = 0.0913 + 0.5 = 0.5913 \text{ p.u.} \quad (2.17)$$

$$I_B = \frac{100 \times 1000}{\sqrt{3} \times 13.8} = 4183.69 \text{ Amperes} \quad (2.18)$$

$$I_{3\phi} = \frac{1.0}{Z_{1TOT}} \text{ p.u.} = \frac{1.0}{0.5913} = 1.691 \text{ p.u.} \quad (2.19)$$

$$I_{3\phi} = 1.691(4183.69) = 7074.62 \text{ Amperes} \quad (2.20)$$

$$I_{1\phi} = \frac{3.0}{2Z_{1ROT} + Z_0} = \frac{3.0}{2(0.5913) + 0.5} = 1.78 \text{ p.u.} \quad (2.21)$$

$$I_{1\phi} = 1.78(4183.69) = 7446.96 \text{ Amperes} \quad (2.22)$$

Capítulo 3

Estudio de red de tierras

En este capítulo se muestran todos los cálculos paso a paso que se tiene que desarrollar para el diseño de la red de tierras de la subestación.

3.1 Calibre del conductor

El calibre del conductor en sí no lo calcula el programa ya que por norma se utiliza el calibre 4/0 AWG, sin embargo se presenta aquí la manera de obtenerlo, todos los demás parámetros si son obtenidos por el programa utilizando las expresiones presentadas. Para obtener el calibre del conductor mínimo que formará la malla de tierras se utiliza la ecuación de Onderdort:

$$A = \frac{I}{\sqrt{\frac{\text{Log}\left(\frac{T_m - T_a}{234 + T_a} + 1\right)}{33S}}} \quad (3.1)$$

En donde:

I = Corriente máxima de falla en amperes (5500 Amperes)

S = Tiempo de duración de la falla en segundos

Ta = Temperatura ambiente de 40 °C

10

A = Sección del conductor de cobre en circular mil

Tm = Temperatura máxima permisible en el conductor (450°C para conexiones echas con fundente)

Se utilizará un tiempo máximo de falla igual a 1.0 segundos, ya que es el tiempo de operación de las protecciones de respaldo (ver coordinación de protecciones).

Sustituyendo los valores de las variables obtenemos una sección transversal del conductor necesario de 50136.73 circular mil, con este dato revisamos las tablas de características de conductores observando la sección de los siguientes conductores:

Calibre 3 AWG --- Sección 52,640 CM

Con esto vemos que el calibre mínimo para formar la malla es el conductor 3 AWG, sin embargo la NOM-001-SEDE-1999, relativa a las instalaciones eléctricas en su sección 2403-2 establece que el calibre mínimo aceptado para sistemas de tierra es el 4/0 AWG el cual tiene una sección de 211,600 CM. Por lo cual será el conductor utilizado para construir la red.[1].

3.2. Resistencia a tierra de la red

Una vez formada la red se procede a calcular la resistencia a tierra de la malla la cual según la NOM para subestaciones con tensiones mayores de 34.5 KV debe ser menor de 5 ohms, este es el caso en que cae nuestro estudio ya que la subestación La Joya tendrá su transformación de 115/13.8 KV.

La resistencia se obtiene por el método simplificado publicado por Y. L. Chow y M.M.A. Salama de la Universidad de Waterloo, en el boletín de IEEE de abril de 1994. Este procedimiento involucra todas las variables tomadas en cuenta al formar la malla, [5].

$$R_t = \rho \left[\frac{1}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} + \frac{1}{NL a} \left[\frac{1}{\sqrt{2\pi}} \operatorname{Ln} \frac{0.165La}{d} \right] \right] \left(1 - \frac{2h}{\sqrt{A}} * 1.128 \right) \quad (3.2)$$

Donde:

Rt = resistencia a tierra de la red

P = Resistividad del terreno (se considera 100 ohms-metros)

A = Área que cubrirá la malla (2025 m²)

N = Número de secciones individuales que forman la retícula

La = Longitud de una sección individual

d = Diámetro del conductor en metros (0.0117 m)

h = Profundidad de colocación de la malla

Sustituyendo los valores anteriores resulta una resistencia a tierra de la red igual a 1.164 Ohms. Valor aceptable, ya que según las características de la subestación, la Norma en su sección 2403-2, establece que la resistencia a tierra de la red debe ser inferior a 5 ohms para este caso.

El área total del predio de la subestación será de 50 x 50 mts. y la red de tierras cubrirá un área de 45 x 45 mts, para con esto quedar por dentro de la cerca perimetral de la subestación a una distancia superior de 2 mts. como se indica en la sección 2403-2 de la Norma.

La cerca perimetral será aterrizada independientemente a la malla de tierras.

3.3 Determinación del número de varillas (electrodos)

El número de varillas requeridas para la red de tierras se determina mediante la forma simplificada de la ecuación de Schwarz definida para obtener la resistencia y despejando para el número de varillas, [6].

$$V_{rs} = \frac{\rho}{2\pi R_t L} \left(\text{Ln} \frac{4L}{b} - 1 \right) \quad (3.3)$$

Donde:

P = Resistividad del terreno natural (100 ohms-metro)

Rt = Resistencia de la red de tierras (0.863 ohms)

L = Longitud de la varilla (10 pies, 3.05 m)

b = Diámetro de la varilla (5/8") = 0.0159 m

Sustituyendo valores se tiene:

$$V_{rs} = \frac{100}{2 \times 3.1416 \times 1.164 \times 3.05} \left(\ln \frac{4 \times 3.05}{0.0159} - 1 \right) = 25.29 \quad (3-4)$$

Conclusión: Se utilizarán un mínimo de 30 varillas de Cu de 5/8" de diámetro por 10 pies de largo. Se deberán instalar dos varillas en el área del transformador e interruptores, colocando las demás en la periferia de la malla de tierras.

3.4 Tensión de malla

La tensión de malla E_m es la considerada en el centro de la red, siendo esta la tensión entre la superficie del terreno y la malla. Esta tensión la calculamos con la siguiente expresión:

$$E_m = (K_m K_i \rho) I_F / L \quad (3-5)$$

donde:

ρ = resistividad del terreno natural (100 ohms-metro)

I_F = corriente máxima de falla (5500 amperes)

L = longitud total del conductor incluyendo las varillas

K_m ó K_s = Son constantes que dependen de la geometría de la malla

K_i = Factor de irregularidad que absorbe errores introducidos en las derivaciones

hechas para obtener K_m y K_i .

K_m toma en cuenta el efecto de los conductores longitudinales n , el espaciamiento D entre conductores, el diámetro del conductor d y la profundidad a la que se colocará la malla.

$$K_m = \frac{1}{2\pi} \text{Ln} \frac{D^2}{16hd} + \frac{1}{\pi} \text{Ln} \left(\frac{3}{4} * \frac{5}{6} * \frac{7}{8} * \left(\frac{2n-3}{2n-2} \right) \right) \quad (3.6)$$

Debido a que la malla no siempre es cuadrada, se da el caso de que los conductores longitudinales no sean iguales a los transversales, razón por lo cual n se ve afectada por la geometría de la red de la siguiente manera: [7].

$$n = n_1 * n_2 * n_3 * n_4 \quad (3.7)$$

Donde las expresiones para n_1 , n_2 , n_3 y n_4 caracterizan la geometría de la red.

$$n_1 = \frac{2L_c}{L_p} \quad n_2 = \sqrt{\frac{L_p}{4\sqrt{A}}} \quad n_3 = \left[\frac{L_x L_y}{A} \right]^{\frac{0.7A}{L_x L_y}} \quad n_4 = \frac{D_m}{\sqrt{(L_x)^2 + (L_y)^2}} \quad (3.8)$$

L_c = Longitud total de los conductores que forman la malla (991.5 m)

L_p = Longitud del perímetro de la malla (180 m)

L_x = Longitud máxima de la malla en la dirección del eje X (45.0 m)

L_y = Longitud máxima de la malla en la dirección del eje Y (45.0 m)

D_m = Máxima diagonal de la malla (63.64 m)

K_i esta definida por la siguiente expresión que toma en cuenta la modificación de n al no ser cuadrada la malla y desarrollada por Thapar en 1996, [7].

$$K_i = 0.644 + 0.148n \quad (3.9)$$

Sustituyendo en las ecuaciones todos los valores anteriores obtenemos los siguientes resultados:

$$n = 11.01$$

$$K_m = 0.604$$

$$K_i = 2.27$$

$$E_m = (0.624 \times 2.27 \times 100 \times 5500) / 991.5$$

$$E_m = 760.56 \text{ Voltios.}$$

3.5 Potencial de paso

El potencial de paso se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$E_{\text{paso}} = (K_s \times K_i \times p) I_F / L \quad (3.10)$$

K_s = coeficiente que considera el número de conductores longitudinales ($n=10$), el espaciamiento D y la profundidad h .

$$K_s = \frac{1}{\pi} \left[\frac{1}{2h} + \frac{1}{D+h} + \frac{1}{D} (1 - 0.5^{n-2}) \right] = 0.508 \quad (3.11)$$

Sustituyendo valores se obtiene:

$$E_{\text{paso}} = (0.508 \times 2.27 \times 100 \times 5500) / 991.5$$

$$E_{\text{paso}} = 639.67 \text{ Voltios.}$$

3.6 Potencial de contacto

Este potencial de contacto esta definido mediante la siguiente expresión:

$$E_{\text{contacto}} = (0.8 \times p \times I_F) / L \quad (3.12)$$

$$E_{\text{contacto}} = (0.8 \times 100 \times 5500) / 991.5 = 443.77 \text{ Voltios.}$$

3.7 Obtención de potenciales críticos para el personal que transita dentro de la subestación o en áreas circunvecinas

En 1996 los criterios de seguridad de las tensiones de paso y de contacto fueron modificados quedando de la siguiente manera:

$$E_p = \frac{(1000 + 6C_s \rho_s)}{\sqrt{t}} (0.157) \quad (3.13)$$

$$E_s = \frac{(1000 + 1.5C_s \rho_s)}{\sqrt{t}} (0.157) \quad (3.14)$$

Donde C_s es un factor de corrección que reduce la resistividad del material colocado sobre la superficie, y esta dada por:

$$C_s = \frac{1}{0.96} \left[1 - \frac{a \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s} \right)}{(2H_s + a)} \right] = 0.778 \quad (3.15)$$

Donde tenemos que:

P = Resistividad del terreno natural (100 ohms-metro)

P_s = Resistividad del material colocado sobre la superficie (3000 ohms-metro) grava triturada

H_s = Espesor de la capa de grava triturada (0.15 m)

a = Constante derivada del polinomio por Thapar. ($a=0.106$)

Sustituyendo los valores obtenemos lo siguiente:

Tensión de paso = 2355.63 Voltios.

Tensión de contacto = 706.65 Voltios.

3.8 Análisis de potenciales para determinar si la malla ofrece seguridad al personal que transita por ella

Como resultado final comprobamos que la malla de tierras será segura para el personal, debido a que los potenciales generados por la red son inferiores a los valores críticos, como se puede observar:

TENSIONES EN LA MALLA
PRODUCIDAS POR CORTO-
CIRCUITOS.

E_{paso} = 639.67 Voltios

E_{contacto} = 443.77 Voltios

TENSIONES QUE PUEDE SOPORTAR
EL PERSONAL QUE TRANSITA POR
LA SUBESTACION.

E_s = 2355.63 Voltios

E_c = 706.65 Voltios

Capítulo 4

Coordinación de protecciones

4.1 Ajustes del relevador 51H del lado de alta tensión 115 KV

Esta protección será proporcionada por un relevador de sobrecorriente 50/51 marca SEL 251 con una curva del tipo muy inversa y estará localizado en la sección de transformador en el tablero siscoprom y mandará el disparo sobre el interruptor de banco de alta tensión (115 KV).

4.1.1 Pick-up del relevador

Los ajustes de esta protección se definen en función de: [3].

La capacidad del transformador (curva de daños)

- a) Criterios definidos de tiempos de coordinación.

La corriente mínima de arranque del relevador 51H debe ser menor a 2 veces la corriente nominal del transformador referida a la potencia básica de 12 MVA.

El tiempo de libramiento de una falla en el lado de baja tensión vista por el relevador de alta tensión es menor o igual a 1.0 seg.

$$I_n = 60.24 \text{ Amp.}$$

$$200 \% I_n = 120.48 \text{ Amp.}$$

18

4.1.2 Selección de RTC

Como el interruptor de 115 KV tiene integrados transformadores de corriente tipo dona se utilizarán los del lado línea para la protección diferencial y los del lado carga para la protección de sobrecorriente.

Para esta RTC seleccionada se debe cumplir:

a) Que a corriente máxima de carga, la corriente secundaria no sea mayor de 5 Amperes.

b) Que a corriente máxima de falla, la corriente secundaria no sea mayor de 100 Amperes.

$$I_{\text{max de carga}} = 100.41 \text{ Amp.}$$

Seleccionamos una relación de transformación de corriente de 200 amperes primarios a 5 amperes secundarios, con lo que tenemos una RTC de 200/5 igual a 40.

Verificando condiciones:

$$I_{\text{sec}} = \frac{100.41}{RTC} = \frac{100.41}{40} = 2.51 \text{ Amp.} \quad (4.1)$$

$$I_{\text{max de falla}} = 5500 \text{ Amp.}$$

$$I_{\text{sec}} = \frac{5500}{RTC} = \frac{5500}{40} = 137.5 \text{ Amp.} \quad (4.2)$$

Como la corriente máxima de falla secundaria es mayor de 100 amperes la RTC seleccionada no es correcta, por lo que ahora se selecciona una nueva RTC de 300/5 equivalente a 60.

Con respecto a la carga:

$$I_{sec} = \frac{100.41}{RTC} = \frac{100.41}{60} = 1.67 \text{ Amp.}$$

Con respecto a la falla:

$$I_{sec} = \frac{5500}{RTC} = \frac{5500}{60} = 91.66 \text{ Amp.}$$

Como ninguno de los dos valores es mayor a lo estipulado la relación seleccionada de RTC 300/5 es correcta.

4.1.3 Selección de Tap

La selección del tap se realiza mediante la expresión:

$$Tap = \frac{I_{pickup}}{RTC} = \frac{120.48}{40} = 2.008 \quad (4.3)$$

En este tipo de relevador se puede seleccionar el Tap desde 1.0 hasta 12.0 con incrementos de 0.5. En este caso se selecciona un Tap de 2.0.

Tap = 2.0 con este valor obtenemos el valor exacto de pick-up.

$$I_{pickup} = TAP \times RTC = 2 \times 60 = 120 \text{ Amp.} \quad (4.4)$$

Esto corresponde al 200 % de la corriente nominal del transformador (60.24 Amp.).

4.1.4 Determinación de la Palanca

Como esta protección actuará como respaldo del relevador 50/51 de fase del interruptor de banco de baja tensión y de la protección diferencial (87T) se dará un tiempo máximo de coordinación de 1.0 seg. para liberar fallas en baja tensión.

Corriente de falla trifásica en baja tensión:

$$I_{3\phi} = 7074.62 \text{ Amp. (13.8 KV)}$$

Referida a 115 KV:

$$I_{3\phi} = 7074.62 \left(\frac{13.8}{115} \right) = 848.95 \text{ Amp.} \quad (4.5)$$

$$\text{Multiplo de Tap} = \frac{848.95}{\text{Tap} \times \text{RTC}} = \frac{848.95}{2 \times 60} = 7.07 \quad (4.6)$$

De la característica del relevador figura 4.1 para:

MT = 7 y Palanca = 5.8, T = 1.0 Seg.

4.1.5 Ajuste de la unidad Instantáneo (50).

Para ajustar la unidad de instantáneo de los 50's lado de alta tensión, se toma el siguiente criterio: [4].

- a).- Que no dispare para fallas en baja tensión.
- b).- Que no dispare con el Inrush.
- c).- Que vea la falla en alta tensión.

$$I_{ajuste} = \frac{\text{Falla en 13.8KV} \times \text{Factor Asimétrico}}{\text{Factor de Seguridad}} \quad (4-7)$$

$$I_{ajuste} = \frac{7074.62 \times 1.6}{0.9} = 12577.10 \text{ Amp.} \quad (4.8)$$

$$I_{ajuste} = \frac{12577.10}{RTC \times RTT} = \frac{12577.10}{60 \times (115/13.8)} = 25.16 \quad (4.9)$$

AJUSTE = 25 Amperes.

Disparo = Ajuste x RTC x RTT

Disparo = 25 x 60 x 8.33 = 12495 Amperes.

4.1.6 Ajustes del relevador 51H tipo SEL 251 curva muy inversa

RTC = 300/5; Tap = 2; Palanca = 5.8; Instantáneo = 25 Amperes.

4.2 Ajustes del relevador 51MT lado de baja tensión 13.8 KV

Al igual que las demás protecciones esta será proporcionada por un relevador de sobrecorriente marca SEL con curva de operación tipo muy inversa.

4.2.1 Pick-up del relevador

Los criterios de ajustes siguen siendo válidos con la única restricción que exista un tiempo de coordinación entre las curvas del 51H y 51MT.

El tiempo de coordinación debe ser menor o igual a 0.3 seg. Esto se logra disminuyendo la palanca o disminuyendo el Tap o ambas cosas.

$$I_{\text{pick-up}} = 2I_n$$

Se recomienda que la curva del 51MT quede ligeramente separada del 51H para evitar disparos simultáneos. Multiplicaremos $2I_n$ por 0.96

$$I_{\text{pick-up}} = 0.96(2 I_n) = 0.96 (2 \times 502.05) = 963.93 \text{ Amperes}$$

4.2.2 Selección de RTC

En este caso en el lado de baja tensión 13.8 KV seleccionamos una RTC de 1200/5 igual a 240.

4.2.3 Selección del Tap

$$Tap = \frac{I_{\text{pickup}}}{RTC} = \frac{963.93}{240} = 4.01 \quad (4.10)$$

Se selecciona Tap = 4

4.2.4 Determinación de la Palanca

Para la falla en el bus de 13.8 KV se dará un tiempo de operación de 0.75 segundos para que exista coordinación con el relevador 51H.

$$Multiplo\ de\ Tap = \frac{7074.62}{4 \times 240} = 7.37 \quad (4.11)$$

De la característica del relevador figura 4.1 para:

$$MT = 7.37 \text{ y Palanca} = 4.2, T = 0.75 \text{ seg.}$$

$$\text{Tiempo de Coordinación} = 1.0 - 0.75 = 0.25 \text{ segundos}$$

4.2.5 Ajustes del relevador 51MT marca SEL 251 curva muy inversa

$$RTC = 1200/5, Tap = 4.0, Palanca = 4.2, T = 0.75 \text{ seg.}$$

4.3 Ajustes del relevador 51NT del neutro del transformador

Para esta protección se utilizará también un relevador marca SEL 251 con una curva muy inversa y actuará su operación sobre el interruptor de banco de 13.8 KV.

4.3.1 Pick-up del Relevador

Para este relevador se considera que la corriente mínima de operación del relevador debe ser superior al 10% de la corriente nominal del transformador e inferior al 70% de la misma corriente.

Rango de ajuste de $I_{min\ op} = (10\% \text{ a } 70\%) I_n$ del transformador, de acuerdo con la experiencia que se tiene un valor de ajuste del 40% resulta aceptable.

$$I_n = 502.05 \text{ Amp.}$$

$$40\% I_n = 200.82 \text{ Amp.}$$

4.3.2 Selección de RTC

La corriente máxima de falla secundaria no deberá ser mayor de 100 amperes secundarios.

$$I_{max\ de\ falla} = 7446.96 \text{ Amperes.}$$

$$\frac{I_{max\ falla}}{RTC} < 100 \text{ Amp. sec.} \tag{4.12}$$

$$RTC = \frac{7446.96}{100} = 74.46/1 = 372.3/5 \tag{4.13}$$

Con una RTC = 400/5 = 80/1 es suficiente, sin embargo por experiencia se utiliza una RTC = 600/5 = 120/1, con lo cual limitamos la corriente secundaria para falla máxima, permitiendo seleccionar ajustes bajos para actuar como protección de respaldo sin problema de saturación y capacidad térmica del relevador.

4.3.3 Selección de Tap

$$Tap = \frac{I_{pickup}}{RTC} = \frac{200.82}{120} = 1.67 \quad (4.14)$$

Se puede elegir entre Tap 1.5 y Tap 2.0,

$$I_{pu} = \frac{(1.5 \times 120)}{502.05} = 0.36 \quad (4.15)$$

$$I_{pu} = \frac{(2 \times 120)}{502.05} = 0.48 \quad (4.16)$$

Se selecciona Tap = 2.0

4.3.4 Determinación de la Palanca

Este relevador deberá respaldar fallas a la salida del interruptor de banco en 13.8 KV., por lo que se le dará un tiempo máximo de coordinación igual al relevador 51H, es decir de 1.0 segundos.

$$Multiplode Tap = \frac{7446.96}{Tap \times RTC} = \frac{7446.96}{2.0 \times 120} = 31.03 \quad (4.17)$$

De la característica del relevador figura 4.1 para :

MT = 31.03 y Palanca = 10, T = 1.0 seg.

4.3.5 Ajustes del relevador 51NT tipo SEL 251 curva muy inversa

RTC = 600/5; Tap = 2.0; Palanca = 10; T = 1.0 seg.

4.4 Ajustes del relevador 51NB lado de baja tensión

Esta protección será proporcionada también por un relevador marca SEL 251 con curva muy inversa.

4.4.1 Pick-up del relevador

Para este relevador se selecciona una corriente de pick-up igual al 40% de la corriente nominal del transformador.

$I_n = 502.05 \text{ Amp.}$

$40\% I_n = 0.4(502.05) = 200.82 \text{ Amp.}$

4.4.2 Selección de RTC

En este caso la RTC ya fue seleccionada al calcular los ajustes del relevador 51MT y fue de 240.

4.4.3 Selección de Tap

$$Tap = \frac{I_{pickup}}{RTC} = \frac{200.82}{240} = 0.83 \quad (4.18)$$

Seleccionamos Tap = 0.8

4.4.4 Determinación de la Palanca

Se propone un tiempo de operación de 0.75 segundos para que coordine con el relevador 51NT.

$$Multiplo\ de\ Tap = \frac{I_{max\ falla}}{Tap \times RTC} = \frac{7446.96}{0.8 \times 240} = 38.78 \quad (4.19)$$

De la característica del relevador figura 4.1 para:

$MT = 38.78$ y Palanca = 7.5, $T = 0.75$ segundos

4.4.5 Ajustes del relevador 51NB marca SEL 251 curva muy inversa

$RTC = 1200/5$; Tap = 0.8; Palanca = 7.5; $T = 0.75$ seg.

CURVA DE TIEMPO MUY INVERSO RELEVADOR MARCA SEL

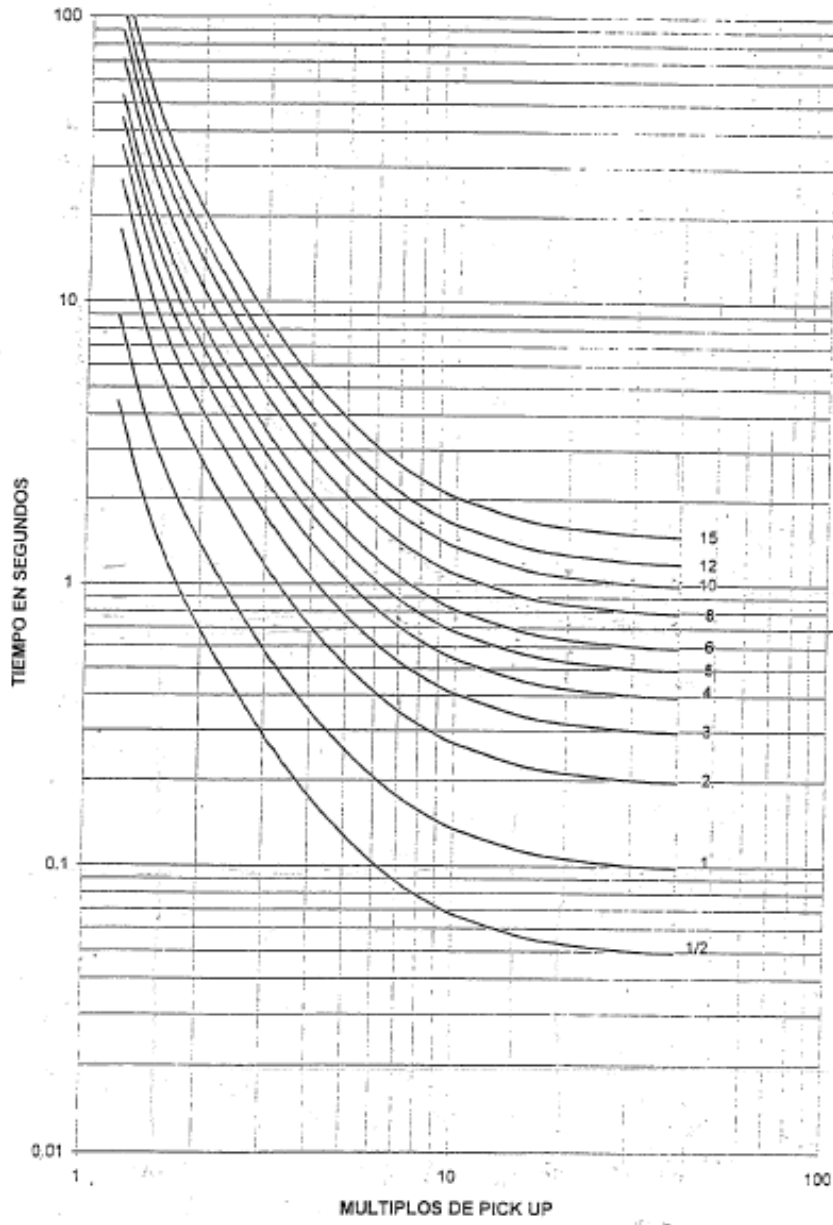


Figura 4.1 Curva característica relevador SEL 251

Diseño de herramientas computacionales en Matlab para el diseño subestaciones eléctricas

El objeto principal en este capítulo, es el mostrar la utilidad de contar con un software como Matlab® que permite elaborar herramientas computacionales de programación que puedan ser utilizadas en las labores cotidianas del personal dedicado al diseño de subestaciones eléctricas.

Cuando se desea realizar la coordinación de protecciones y el diseño de la red de tierras de una subestación de potencia, primero que nada se debe realizar un estudio de corto circuito de la instalación, posteriormente se desarrollan los cálculos de coordinación de protecciones mostrados en el capítulo IV o los cálculos para el diseño de la red de tierras, los cuales también ya se presentaron en el capítulo III, y como se puede ver estos resultan bastante tediosos.

5.1 Coordinación de protecciones de sobrecorriente de transformador

5.1.1 Introducción

Los ingenieros dedicados a elaborar la coordinación de protecciones en los sistemas eléctricos de potencia utilizan para llevar a cabo estas labores programas que existen en el mercado, los cuales son muy complejos ya que se deben adaptar a las diferentes necesidades requeridas, resultando estos programas costosos y sobre todo inaccesibles para realizarles alguna modificación ya que los proveedores no proporcionan la programación realizada por el software.

Aquí se presenta la elaboración de una herramienta de programación que realiza el cálculo de corto circuito en una subestación y la coordinación de protecciones de sobrecorriente para un transformador de potencia.

5.1.2 Elaboración del programa (herramienta)

Para la elaboración del programa se tomó en cuenta que el usuario no está familiarizado con el manejo del paquete Matlab® por lo cual se intentó realizarlo de una

manera amigable de tal manera que el usuario solo tenga la necesidad de dar clic en el icono del paquete y teclear el nombre del programa realizado (coordina).

5.1.3 Entrada de datos

En si el programa elaborado consiste en varios archivos con extensión .m desarrollados en Matlab®, los cuales se deben instalar en el subdirectorio “work”

The screenshot shows a software window with the following structure:

- Header:** CFE División Baja California Subgerencia de Distribución. SUBESTACION: [input field]
- Title Bar:** Coordinación de Protecciones de Sobrecorriente de Transformador
- System Data (DATOS DEL SISTEMA):**
 - MVAbase: [input field]
 - KVbase: [input field]
- High Voltage Bus (BUS ALTA TENSION):**
 - Icc3ø: [input field]
 - Icc1ø: [input field]
- Transformer (TRANSFORMADOR):**
 - KValta: [input field]
 - KVbaja: [input field]
 - MVA: [input field]
 - %Z: [input field]
- Low Voltage Bus (BUS BAJA TENSION):**
 - Icc3ø: [red field]
 - Icc1ø: [red field]
- Relays (RELEVADOR):**
 - RELEVADOR 51H:** Marca: [red], Tipo: [red], RTCh: [red], Taph: [red], Palanca: [red], Tiempo: [input field]
 - RELEVADOR 51MT:** Marca: [red], Tipo: [red], RTCx: [red], Tapx: [red], Palanca: [red], Tiempo: [input field]
 - RELEVADOR 51NT:** Marca: [red], Tipo: [red], RTCnt: [red], Tapnt: [red], Palanca: [red], Tiempo: [input field]
 - RELEVADOR 51N:** Marca: [red], Tipo: [red], RTCn: [red], Tapn: [red], Palanca: [red], Tiempo: [input field]
- Buttons:** Continuar

Figura No.1

de Matlab® ya que este es el directorio de trabajo inicial del paquete, el primero de estos archivos (coordina.m) presenta una plantilla con recuadros en blanco para que el usuario introduzca los datos que ahí se solicitan, figura No. 1.

Los datos solicitados son: subestación bajo estudio, MVA base del sistema, KV base del sistema, corriente de corto circuito monofásica y trifásica en el bus de alta tensión de la subestación, los datos del transformador de potencia como son los MVA, voltajes de alta y baja tensión y el porcentaje de impedancia, también se solicitan los tiempos de operación que se desean para la operación de los relevadores de protección del lado de alta tensión del transformador como son el relevador 51H y el 51MT así como los relevadores de baja tensión 51NT y 51N.

La plantilla también presenta recuadros en color rojo los cuales corresponden a los cálculos desarrollados por el programa.

Una vez que el usuario ha llenado todos los datos que se requieren, figura No.2., se debe de dar clic en el botón “continuar”.

CFE		División Baja California Subgerencia de Distribución		SUBESTACION: La Joya			
Coordinación de Protecciones de Sobrecorriente de Transformador							
DATOS DEL SISTEMA:	MVAbase:	100	KVbase:	115			
BUS ALTA TENSION:	Icc3ø:	5100	Icc1ø:	5400			
TRANSFORMADOR:	KValta:	115	KVbaja:	13.8			
	MVA:	20	%Z:	6			
BUS BAJA TENSION:	Icc3ø:		Icc1ø:				
RELEVADOR 51H:	RELEVADOR 51MT:	RELEVADOR 51NT:	RELEVADOR 51N:				
Marca:	Marca:	Marca:	Marca:				
Tipo:	Tipo:	Tipo:	Tipo:				
RTCx:	RTCx:	RTCnt:	RTCn:				
Tapx:	Tapx:	Tapnt:	Tapn:				
Palanca:	Palanca:	Palanca:	Palanca:				
Tiempo:	0.75	Tiempo:	0.50	Tiempo:	0.75	Tiempo:	0.50
Continuar							

Figura No. 2

5.1.4 Salida de datos

Posteriormente el programa ejecuta algunos cálculos correspondientes a las relaciones de transformación de los transformadores de corriente así como el Tap respectivo, dejando pendientes por ejecutar los cálculos de palanca y el tiempo de operación, los cuales se realizarán una vez que se seleccione la marca del relevador a utilizar así como el tipo de curva de operación de acuerdo a los tiempos propuestos, estos cálculos se pueden observar en la figura No. 3.

Como se puede observar en la figura No.3, en los cuadros correspondientes a la marca del relevador a utilizar aparecen botones de color verde con la leyenda “Elegir”, el usuario debe de dar clic en estos botones y el programa mostrara un menú en el cual

se indica una lista de relevadores disponibles, al seleccionar uno de ellos aparecerá nuevamente otro menú indicando el tipo de curvas de operación del relevador seleccionado, de donde se deberá elegir una de ellas para que el programa termine de realizar los cálculos correspondientes a la palanca a utilizar así como el tiempo de operación, esto se puede observar en las figuras No. 4 y No. 5, este procedimiento se debe de repetir para cada uno de los relevadores.

CFE División Baja California Subgerencia de Distribución **SUBESTACION:** La Joya

Coordinación de Protecciones de Sobrecorriente de Transformador

DATOS DEL SISTEMA:	MVAbase:	100	KVbase:	115
BUS ALTA TENSION:	Icc3ø:	5100	Icc1ø:	5400
TRANSFORMADOR:	KValta:	115	KVbaja:	13.8
	MVA:	20	%Z:	6
BUS BAJA TENSION:	Icc3ø:	10500.2	Icc1ø:	11442.5

RELEVADOR 51H:	RELEVADOR 51MT:	RELEVADOR 51NT:	RELEVADOR 51N:
Marca: Elegir	Marca: Elegir	Marca: Elegir	Marca: Elegir
Tipo: [Redacted]	Tipo: [Redacted]	Tipo: [Redacted]	Tipo: [Redacted]
RTCx: 60	RTCx: 400	RTCx: 100	RTCx: 400
Tapx: 3.3	Tapx: 3.9	Tapx: 3.3	Tapx: 0.7
Palanca: [Redacted]	Palanca: [Redacted]	Palanca: [Redacted]	Palanca: [Redacted]
Tiempo: 0.75	Tiempo: 0.50	Tiempo: 0.75	Tiempo: 0.50

Continuar

Figura No. 3

CFE División Baja California Subgerencia de Distribución **SUBESTACION:** LA JOYA

Coordinación de Protecciones de Sobrecorriente de Transformador

DATOS DEL SISTEMA:	MVAbase:	100	KVbase:	115
BUS ALTA TENSION:	Icc3ø:	5100	Icc1ø:	5400
TRANSFORMADOR:	KValta:	115	KVbaja:	13.8
	MVA:	20	%Z:	6
BUS BAJA TENSION:	Icc3ø:	10500.2	Icc1ø:	11442.5

RELEVADOR 51H:	RELEVADOR 51MT:	RELEVADOR 51NT:	RELEVADOR 51N:
Marca: Elegir	Marca: Elegir	Marca: Elegir	Marca: Elegir
Tipo: [Redacted]	Tipo: [Redacted]	Tipo: [Redacted]	Tipo: [Redacted]
RTCx: 400	RTCx: 400	RTCx: 100	RTCx: 400
Tapx: 3.9	Tapx: 3.9	Tapx: 3.3	Tapx: 0.7
Palanca: [Redacted]	Palanca: [Redacted]	Palanca: [Redacted]	Palanca: [Redacted]
Tiempo: 0.5	Tiempo: 0.5	Tiempo: 0.75	Tiempo: 0.5

ME... [Close]

Relevador de Alta 51H

SEL251

SIEMENS7SJ62

AREVA P144

ABB DPU2000R

Continuar

Figura No. 4

DATOS DEL SISTEMA:		MVAbase:	100	KVbase:	115		
BUS ALTA TENSION:		Icc3ø:	5100	Icc1ø:	5400		
TRANSFORMADOR:		KValta:	115	KVbaja:	13.8		
		MVA:	20	%Z:	6		
BUS BAJA TENSION:		Icc3ø:	10500.2	Icc1ø:	11442.5		
RELEVADOR 51H:		RELEVADOR 51MT:		RELEVADOR 51NT:		RELEVADOR 51N:	
Marca:	SEL 251	Marca:	Elegir	Marca:	Elegir	Marca:	Elegir
Tipo:		Tipo:		Tipo:		Tipo:	
RTCx:	400	RTCnt:	100	RTCr:	400		
Tapx:	3.9	Tapnt:	3.3	Tapn:	0.7		
Palanca:		Palanca:		Palanca:			
Tiempo:	0.50	Tiempo:	0.75	Tiempo:	0.50		

Figura No. 5

Después de que ya se seleccionaron los cuatro relevadores con sus respectivas curvas de operación, el programa termina de realizar todos los cálculos presentando la plantilla correspondiente a la figura No.6, donde se observa la palanca y el tiempo de operación calculado para cada relevador.

Otra particularidad más del programa desarrollado, es que también presenta las graficas de coordinación de protecciones tanto para falla monofásica como para falla trifásica, lo cual se observar en las figuras No. 7 y No. 8.

CFE División Baja California
Subgerencia de Distribución

SUBESTACION: **La Joya**

Coordinación de Protecciones de Sobrecorriente de Transformador

DATOS DEL SISTEMA:	MVAbase:	100	KVbase:	115
BUS ALTA TENSION:	Icc3ø:	5100	Icc1ø:	5400
TRANSFORMADOR:	KV Alta:	115	KV baja:	13.8
	MVA:	20	%Z:	6
BUS BAJA TENSION:	Icc3ø:	10500.2	Icc1ø:	11442.5

RELEVADOR 51H:	RELEVADOR 51MT:	RELEVADOR 51NT:	RELEVADOR 51N:
Marca: SEL	Marca: SEL	Marca: SEL	Marca: SEL
Tipo: Muy	Tipo: Muy	Tipo: Muy	Tipo: Muy
RTCh: 60	RTCx: 400	RTCnt: 100	RTCn: 400
TapH: 3.3	Tapx: 3.9	Tapnt: 3.3	Tapn: 0.7
Palanca: 3.9	Palanca: 2.8	Palanca: 7.6	Palanca: 5.2
Tiempo: 0.75868	Tiempo: 0.51485	Tiempo: 0.75642	Tiempo: 0.51284

Continuar

Figura No. 6

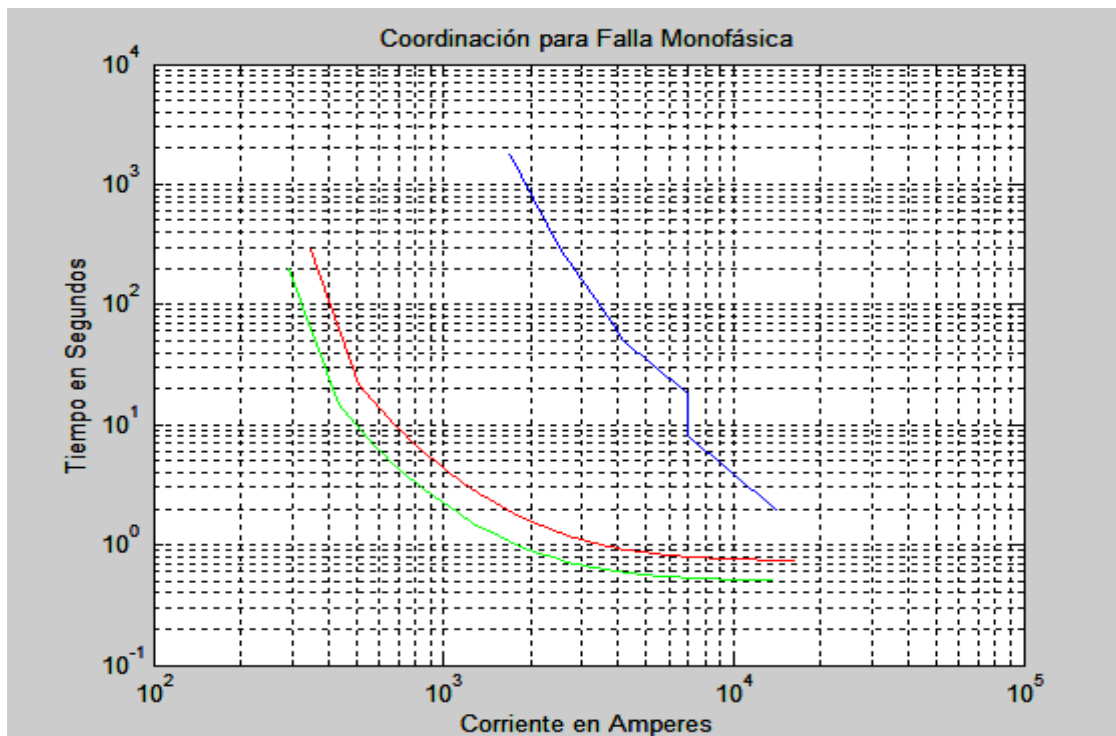


Figura No.7

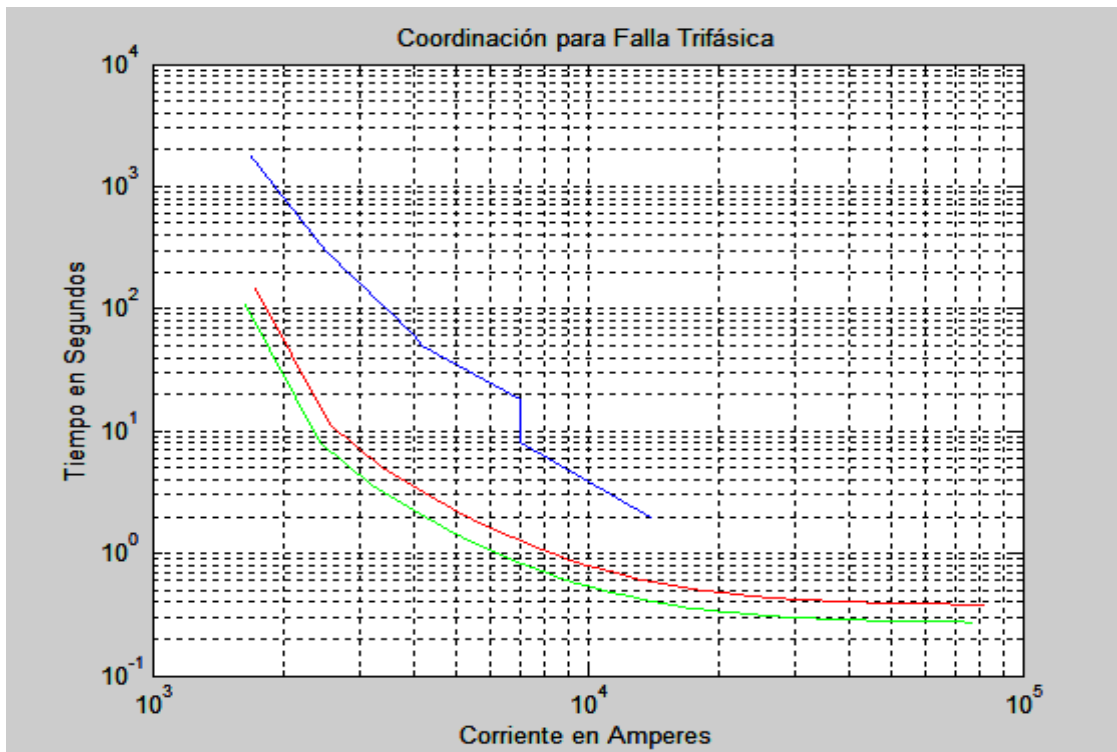


Figura No.8

En las figuras anteriores el programa grafica las curvas de los relevadores de alta y baja tensión con respecto a la grafica de daño del transformador mostrando con esto que efectivamente existe coordinación entre los relevadores provocando su operación antes de que la falla provoque algún daño en el transformador de potencia.

5.1.5 Gráfica de daño del transformador

Para trazar la gráfica de daño del transformador el programa selecciona de acuerdo con la capacidad del mismo los datos según las consideraciones siguientes:

Los criterios para la selección, aplicación y ajustes de la protección por medio de relevadores deberá de considerar que el transformador se debe de proteger contra el efecto de las corrientes de fallas externas que al pasar por el transformador durante un tiempo prolongado pudieran dañarlo. Para propósitos de de coordinación y poder seleccionar los ajustes de las protecciones de acuerdo con la corriente que soportan

los transformadores se aplican las “curvas de daño” las cuales son una representación gráfica de las corrientes y tiempos que soportan los transformadores.

La norma ANSI-IEEE C57. 109-1993 “Guía para la duración de corriente de falla a través de transformadores” considera también los efectos mecánicos (estos son más significativos que los efectos térmicos, particularmente en transformadores de gran capacidad).

Esta norma establece las recomendaciones para la aplicación de protecciones aplicadas para limitar el tiempo de exposición de los transformadores a las corrientes de corto circuito, considera para su aplicación 4 categorías de transformadores (I, II, III y IV), dentro de las cuales están los de potencia y distribución, en la tabla 5.1 se muestra las capacidades de los transformadores de acuerdo con la categoría que les corresponde.

	Capacidad en KVA	
Cat	Monofasico	Trifasico
I	5-500	15-500
II	501-1667	501-5000
III	1668-10000	5001-30000
IV	>10000	>30000

Tabla 5.1 Categoría de transformadores de acuerdo a su capacidad

5.2 Diseño de red de tierras

El objeto principal del presente trabajo, es el desarrollo de un programa amigable con el usuario utilizando el paquete Matlab® el cual verifique la confiabilidad del diseño de redes de tierra en subestaciones electricas de potencia que se diseñan en Comisión Federal de Electricidad, para con ello saber si la malla de tierras es lo suficientemente segura para el personal que transite dentro de la subestación a la hora de desarrollar sus labores de mantenimiento o de inspección. Para desarrollar el presente trabajo se

tomó en cuenta las últimas modificaciones que se le han hecho al método estandar ANSI/IEEE 80 a lo largo de los años procurando siempre obtener resultados cada vez más seguros y exactos.

5.2.1 Introducción

Los cálculos que se deben de realizar para comprobar el adecuado diseño de una red de tierras en subestaciones de potencia es bien conocido por los responsables del proyecto de subestaciones en C.F.E. pero resultan tediosos y se lleban un tiempo determinado. Por esta razón se pensó en desarrollar un programa que presente todos estos cálculos de una manera rápida y que pueda utilizarlo cualquier persona que no esté familiarizada con ellos pero que tenga la necesidad de comprobar un diseño conocido.

5.2.2 Elaboración del programa (herramienta)

Para el desarrollo del programa se tomó en cuenta que el usuario tampoco esta familiarizado con el manejo del paquete Matlab® por lo cual se intentó hacerlo amigable de tal manera que el usuario solo tenga la necesidad de dar doble clic en el icono del paquete y teclear el nombre del programa desarrollado (redes).

5.2.3 Entrada de datos

En sí el programa elaborado consiste de cinco archivos con extensión .m desarrollados en Matlab®, los cuales se deben de instalar en el subdirectorío "work" de Matlab®, ya que este es el directorío de trabajo inicial del paquete, el primero de estos archivos (redes.m) presenta una plantilla para que el usuario introduzca los datos que ahí se solicitan figura No.1. Los datos solicitados son: subestación bajo estudio, área que cubrirá la malla, longitud entre conductores paralelos, número total de cuadros de la malla, diámetro del conductor de la malla, resistividad del terreno de la subestación, profundidad a la que se colocará la malla, corriente de corto circuito, mayor distancia en el eje X de la red, mayor distancia en el eje Y de la red, mayor diagonal de la malla,

resistividad del material sobre la superficie, espesor de la capa sobre la superficie y el máximo tiempo de operación de las protecciones.

En el caso del diámetro del conductor en lugar de la franja para colocar el valor aparece un botón que indica seleccionar, al dar clic en este botón aparece un menú para seleccionar el calibre del conductor y automáticamente el programa coloca el valor correspondiente al diámetro del conductor seleccionado, esto se puede observar en la figura No. 2.

Variable	Unidad
SUBESTACION BAJO ESTUDIO	
AREA QUE CUBRIRA LA MALLA	Metros
LONGITUD ENTRE CONDUCTORES PARALELOS	Metros
NUMERO TOTAL DE CUADROS DE LA MALLA	Cuadros
DIAMETRO DEL CONDUCTOR DE LA MALLA	Metros
RESISTIVIDAD DEL TERRENO DE LA SUBESTACION	Ohms/metro
PROFUNDIDAD A LA QUE SE COLOCARA LA MALLA	Metros
CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO	Amperes
MAYOR DISTANCIA EN EL EJE X DE LA RED	Metros
MAYOR DISTANCIA EN EL EJE Y DE LA RED	Metros
MAYOR DIAGONAL DE LA MALLA	Metros
RESISTIVIDAD DEL MATERIAL SOBRE LA SUPERFICIE	Ohms/metro
ESPESOR DE LA CAPA SOBRE LA SUPERFICIE	Metros
MAXIMO TIEMPO DE OPERACION DE LAS PROTECCIONES	Segundos

Figura No. 1

CFE División Baja California
 Depto. Proyectos y Construcción

COMPROBACION DE LA SEGURIDAD DEL DISEÑO DE REDES DE TIERRA

Introduzca los datos requeridos

SUBESTACION BAJO ESTUDIO	<input type="text"/>	
AREA QUE CUBRIRA LA MALLA	<input type="text"/>	Metros
LONGITUD ENTRE CONDUCTORES PARALELOS	<input type="text"/>	
NUMERO TOTAL DE CUADROS DE LA MALLA	<input type="text"/>	
DIAMETRO DEL CONDUCTOR DE LA MALLA	<input type="button" value="Seleccionar"/>	Calibre
RESISTIVIDAD DEL TERRENO DE LA SUBESTACION	<input type="text"/>	<input type="button" value="3/0 AWG"/>
PROFUNDIDAD A LA QUE SE COLOCARA LA MALLA	<input type="text"/>	<input type="button" value="4/0 AWG"/>
CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO	<input type="text"/>	<input type="button" value="250 KCM"/>
MAYOR DISTANCIA EN EL EJE X DE LA RED	<input type="text"/>	Metros
MAYOR DISTANCIA EN EL EJE Y DE LA RED	<input type="text"/>	Metros
MAYOR DIAGONAL DE LA MALLA	<input type="text"/>	Metros
RESISTIVIDAD DEL MATERIAL SOBRE LA SUPERFICIE	<input type="text"/>	Ohms/metro
ESPESOR DE LA CAPA SOBRE LA SUPERFICIE	<input type="text"/>	Metros
MAXIMO TIEMPO DE OPERACION DE LAS PROTECCIONES	<input type="text"/>	Segundos

Figura No. 2

Una vez que se han llenado todas las celdas con los datos proporcionados la plantilla queda como se aprecia en la figura No. 3.

Comprobación de la Seguridad del Diseño de Redes de Tierra

CFE Division Baja California
 Depto. Proyectos y Construcción

COMPROBACION DE LA SEGURIDAD DEL DISEÑO DE REDES DE TIERRA

Introduzca los datos requeridos

SUBESTACION BAJO ESTUDIO	Ensenada	
AREA QUE CUBRIRA LA MALLA	3776	Metros
LONGITUD ENTRE CONDUCTORES PARALELOS	6.5	Metros
NUMERO TOTAL DE CUADROS DE LA MALLA	93	Cuadros
DIAMETRO DEL CONDUCTOR DE LA MALLA	0.0117	Metros
RESISTIVIDAD DEL TERRENO DE LA SUBESTACION	100	Dhms/metro
PROFUNDIDAD A LA QUE SE COLOCARA LA MALLA	0.5	Metros
CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO	13500	Amperes
MAYOR DISTANCIA EN EL EJE X DE LA RED	75.9	Metros
MAYOR DISTANCIA EN EL EJE Y DE LA RED	47.5	Metros
MAYOR DIAGONAL DE LA MALLA	92.5	Metros
RESISTIVIDAD DEL MATERIAL SOBRE LA SUPERFICIE	3000	Dhms/metro
ESPESOR DE LA CAPA SOBRE LA SUPERFICIE	0.15	Metros
MAXIMO TIEMPO DE OPERACION DE LAS PROTECCIONES	0.75	Segundos

Ejecutar

Figura No. 3

5.2.4 Salida de datos

El siguiente paso es dar clic en el botón que contiene la leyenda “Ejecutar” , esta instrucción hace que Matlab® ejecute el archivo malla.m el cual contiene las instrucciones para el desarrollo de todos los cálculos los cuales Matlab® desarrolla casi instantáneamente y los arroja sobre otra plantilla como se observa en la figura No. 4. Los resultados arrojados por el programa son: subestación de estudio, resistencia a tierra de la red, número mínimo de varillas requeridas (electrodos), tensión de malla generada, tensión de paso generada, tensión de paso máxima permitida, tensión de contacto generada, tensión de contacto máxima permitida, de acuerdo con la tensión de paso la malla es segura o no segura, de acuerdo con la tensión de contacto la maya es segura o no segura y el resultado final indicando si el diseño es correcto o no.

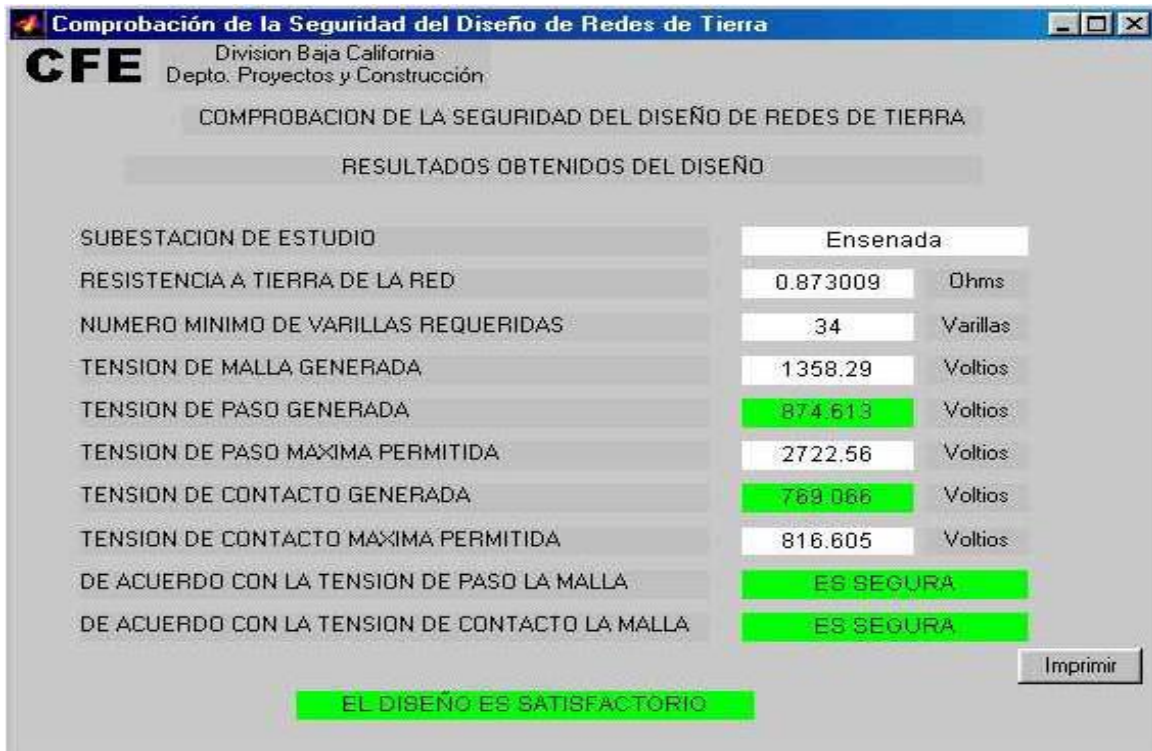


Figura No. 4

En esta plantilla correspondiente a la figura 4, el programa presenta la comparación que se realiza entre los valores de tensiones generadas por la malla y críticas o máximas permitidas para los potenciales de paso y de contacto, presentando las celdas correspondientes a los valores generados en color verde si estos son menores a los máximos permitidos lo cual indica que el diseño es seguro, lo que también se muestra con celdas en color verde con la leyenda “ES SEGURA” y a su vez esto origina que en una celda final se presente la leyenda “EL DISEÑO ES SATISFACTORIO”, pero si uno de los valores generados ya sea la tensión de paso o de contacto es mayor al valor máximo permitido este se presenta con la celda en color rojo así como en la celda correspondiente a la comparación aparece también la celda en color rojo con la leyenda “NO ES SEGURA”, la que a su vez origina la celda final en color rojo con la leyenda “SE REQUIERE REDISEÑAR LA RED”, lo cual indica que el diseño no es seguro. Esto se puede observar en la figura No. 5.

Para obtener las impresiones de estas plantillas solo se tiene que dar clic en el botón con la leyenda “Imprimir” en la plantilla de resultados, este botón hace que Matlab® ejecute el archivo imprimir.m el cual solo contiene la instrucción de impresión.



Figura No. 5

Capítulo 6

Resultados obtenidos

Como resultados obtenidos del presente trabajo, se puede mencionar que se realizó un artículo sobre la herramienta computacional desarrollada en matlab para la coordinación de protecciones de sobrecorriente de transformador, el cual fue enviado y aprobado por el comité de protecciones para presentarse en la VIGESIMA TERCERA REUNION DE VERANO DE POTENCIA, APLICACIONES INDUSTRIALES Y EXPOSICION INDUSTRIAL (RVP-AI/2010) del Instituto de Ingenieros Electricista y Electrónicos Sección México (IEEE) la cual se desarrolló del 11 al 17 de julio de 2010.

6.1 Coordinación de protecciones de sobrecorriente de transformador utilizando Matlab.

A continuación se presenta en formato original, el artículo enviado, aprobado y presentado en la RVP-AI/2010 del IEEE Sección México.

42

43

COORDINACION DE PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTE DE TRANSFORMADOR UTILIZANDO MATLAB®



Ing. Roberto Flores Coronado - Ing. David Maldonado González
C.F.E. División Baja California
UABC Facultad de Ingenieria

roberto.flores01@cfe.gob.mx
david.maldonado@cfe.gob.mx

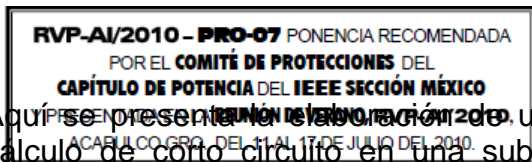
RESUMEN.

El objeto principal del presente trabajo, es el mostrar la utilidad de contar con un software como Matlab® que permite elaborar herramientas de programación que puedan ser utilizadas en las labores cotidianas del personal dedicado al área de protecciones.

Cuando se desea realizar la coordinación de protecciones de una parte de un sistema eléctrico de potencia, primero que nada se debe realizar un estudio de corto circuito de la instalación lo cual resulta en unos cálculos bastante tediosos por lo cual se utilizan programas que realizan estos cálculos.

1.- INTRODUCCIÓN.

Los ingenieros dedicados a elaborar la coordinación de protecciones en los sistemas eléctricos de potencia utilizan para llevar acabo estas labores programas que existen en el mercado, los cuales son muy complejos ya que se deben adaptar a las diferentes necesidades requeridas, resultando estos programas costosos y sobre todo inaccesibles para realizarles alguna modificación ya que los proveedores por ovias razones no proporcionan la programación realizada por el software.



Aquí se presenta la elaboración de una herramienta de programación que realiza el cálculo de corto circuito en una subestación y la coordinación de protecciones de sobrecorriente para un transformador de potencia.

2.- ELABORACION DEL PROGRAMA (HERRAMIENTA).

Para la elaboración del programa se tomó en cuenta que el usuario no esta familiarizado con el manejo del paquete Matlab® por lo cual se intentó realizarlo de una manera amigable de tal manera que el usuario solo tenga la necesidad de dar clic en el icono del paquete y teclear el nombre del programa realizado (coordina).

3.- ENTRADA DE DATOS.

En si el programa elaborado consiste en varios archivos con extensión .m desarrollados en Matlab®, los cuales se deben instalar en el subdirectorio "work" de Matlab® ya que este es el directorio de trabajo inicial del paquete, el primero de estos archivos (coordina.m) presenta una plantilla con recuadros en blanco para que el usuario introduzca los datos que ahí se solicitan, figura No. 1.

Los datos solicitados son: subestación bajo estudio, MVA base del sistema, KV base del sistema, corriente de corto circuito monofásica y trifásica en el bus de alta tensión de la subestación, los datos del transformador de potencia como son los

CFE División Baja California Subgerencia de Distribución **SUBESTACION:**

Coordinación de Protecciones de Sobrecorriente de Transformador

DATOS DEL SISTEMA: MVAbase: KVbase:

BUS ALTA TENSION: Icc3a: Icc1a:

TRANSFORMADOR: KValta: KVbaja:

MVA: %Z:

BUS BAJA TENSION: Icc3a: Icc1a:

RELEVADOR 51H:	RELEVADOR 51MT:	RELEVADOR 51NT:	RELEVADOR 51N:
Marca: <input style="background-color: red;" type="text"/>	Marca: <input style="background-color: red;" type="text"/>	Marca: <input style="background-color: red;" type="text"/>	Marca: <input style="background-color: red;" type="text"/>
Tipo: <input style="background-color: red;" type="text"/>	Tipo: <input style="background-color: red;" type="text"/>	Tipo: <input style="background-color: red;" type="text"/>	Tipo: <input style="background-color: red;" type="text"/>
RTCh: <input style="background-color: red;" type="text"/>	RTCx: <input style="background-color: red;" type="text"/>	RTCnt: <input style="background-color: red;" type="text"/>	RTCn: <input style="background-color: red;" type="text"/>
Taph: <input style="background-color: red;" type="text"/>	Tapx: <input style="background-color: red;" type="text"/>	Tapnt: <input style="background-color: red;" type="text"/>	Tapn: <input style="background-color: red;" type="text"/>
Palanca: <input style="background-color: red;" type="text"/>	Palanca: <input style="background-color: red;" type="text"/>	Palanca: <input style="background-color: red;" type="text"/>	Palanca: <input style="background-color: red;" type="text"/>
Tiempo: <input type="text"/>	Tiempo: <input type="text"/>	Tiempo: <input type="text"/>	Tiempo: <input type="text"/>

Figura No. 1

MVA, voltajes de alta y baja tensión y el porcentaje de impedancia, también se solicitan los tiempos de operación que se desean para la operación de los relevadores de protección del lado de alta tensión del transformador como son el relevador 51H y el 51MT así como los relevadores de baja tensión 51NT y 51N.

La plantilla también presenta recuadros en color rojo los cuales corresponden a los cálculos desarrollados por el programa.

Una vez que el usuario ha llenado todos los datos que se requieren, figura No.2., se debe de dar clic en el botón "continuar".

CFE División Baja California Subgerencia de Distribución **SUBESTACION:**

Coordinación de Protecciones de Sobrecorriente de Transformador

DATOS DEL SISTEMA: MVAbase: KVbase:

BUS ALTA TENSION: Icc3a: Icc1a:

TRANSFORMADOR: KValta: KVbaja:

MVA: %Z:

BUS BAJA TENSION: Icc3a: Icc1a:

RELEVADOR 51H:	RELEVADOR 51MT:	RELEVADOR 51NT:	RELEVADOR 51N:
Marca: <input style="background-color: red;" type="text"/>	Marca: <input style="background-color: red;" type="text"/>	Marca: <input style="background-color: red;" type="text"/>	Marca: <input style="background-color: red;" type="text"/>
Tipo: <input style="background-color: red;" type="text"/>	Tipo: <input style="background-color: red;" type="text"/>	Tipo: <input style="background-color: red;" type="text"/>	Tipo: <input style="background-color: red;" type="text"/>
RTCh: <input style="background-color: red;" type="text"/>	RTCx: <input style="background-color: red;" type="text"/>	RTCnt: <input style="background-color: red;" type="text"/>	RTCn: <input style="background-color: red;" type="text"/>
Taph: <input style="background-color: red;" type="text"/>	Tapx: <input style="background-color: red;" type="text"/>	Tapnt: <input style="background-color: red;" type="text"/>	Tapn: <input style="background-color: red;" type="text"/>
Palanca: <input style="background-color: red;" type="text"/>	Palanca: <input style="background-color: red;" type="text"/>	Palanca: <input style="background-color: red;" type="text"/>	Palanca: <input style="background-color: red;" type="text"/>
Tiempo: <input type="text" value="0.75"/>	Tiempo: <input type="text" value="0.50"/>	Tiempo: <input type="text" value="0.75"/>	Tiempo: <input type="text" value="0.50"/>

44

Figura No. 2

4.-SALIDA DE DATOS

Posteriormente el programa ejecuta algunos cálculos correspondientes a las relaciones de transformación de los transformadores de corriente así como el Tap respectivo, dejando pendientes por ejecutar los cálculos de palanca y el tiempo de operación de los relevadores de acuerdo a los tiempos propuestos, estos cálculos se realizarán una vez seleccionados la marca del relevador a utilizar así como el tipo de curva de operación, como se puede observar en la figura No. 3.

CFE División Baja California Subgerencia de Distribución SUBESTACION: **La Joya**

Coordinación de Protecciones de Sobrecorriente de Transformador

DATOS DEL SISTEMA:	MVAbase:	100	KVbase:	115
BUS ALTA TENSION:	Icc3a:	5100	Icc1a:	5400
TRANSFORMADOR:	KVAlta:	115	KVbaja:	13.8
	MVA:	20	%Z:	6
BUS BAJA TENSION:	Icc3a:	10500.2	Icc1a:	11442.5

RELEVADOR 51H:	RELEVADOR 51MT:	RELEVADOR 51NT:	RELEVADOR 51N:
Marca: Elegir	Marca: Elegir	Marca: Elegir	Marca: Elegir
Tipo: [Rojo]	Tipo: [Rojo]	Tipo: [Rojo]	Tipo: [Rojo]
RTCx: 60	RTCx: 400	RTCx: 100	RTCx: 400
Tapx: 3.3	Tapx: 3.9	Tapx: 3.3	Tapx: 0.7
Palanca: [Rojo]	Palanca: [Rojo]	Palanca: [Rojo]	Palanca: [Rojo]
Tiempo: 0.75	Tiempo: 0.50	Tiempo: 0.75	Tiempo: 0.50

Continuar

Figura No. 3

Como se puede observar en la figura No.3, en los cuadros correspondientes a la marca del relevador a utilizar aparecen botones de color verde con la leyenda “Elegir”, el usuario debe de dar clic en estos botones y el programa mostrara un menú en el cual se indica una lista de relevadores disponibles, al seleccionar uno de ellos aparecerá nuevamente otro menú indicando el tipo de curvas de operación del relevador seleccionado, de donde se deberá elegir una de ellas para que el programa termine de realizar los cálculos correspondientes a la palanca a utilizar así como el tiempo de operación, esto se puede observar en las figuras No. 4 y No. 5, este procedimiento se debe de repetir para cada uno de los relevadores.

CFE División Baja California Subgerencia de SUBESTACION: **LA JOYA**

Coordinación de Protecciones de Sobrecorriente de Transformador

DATOS DEL SISTEMA:	MVAbase:	100	KVbase:	115
BUS ALTA TENSION:	Icc3a:	5100	Icc1a:	5400
TRANSFORMADOR:	KVAlta:	115	KVbaja:	13.8
	MVA:	20	%Z:	6
BUS BAJA TENSION:	Icc3a:	10500.2	Icc1a:	11442.5

RELEVADOR 51H:	RELEVADOR 51MT:	RELEVADOR 51NT:	RELEVADOR 51N:
Marca: Elegir	Marca: Elegir	Marca: Elegir	Marca: Elegir
Tipo: [Rojo]	Tipo: [Rojo]	Tipo: [Rojo]	Tipo: [Rojo]
RTCx: 400	RTCx: 100	RTCx: 400	RTCx: 400
Tapx: 3.9	Tapx: 3.3	Tapx: 0.7	Tapx: 0.7
Palanca: [Rojo]	Palanca: [Rojo]	Palanca: [Rojo]	Palanca: [Rojo]
Tiempo: 0.5	Tiempo: 0.75	Tiempo: 0.5	Tiempo: 0.5

Continuar

Figura No. 4

CFE División Baja California
Subgerencia de Distribución

SUBESTACION: La Joya

Coordinación de Protecciones de Sobrecorriente de Transformador

DATOS DEL SISTEMA:	MVBase:	100	KVbase:	115
BUS ALTA TENSION:	Icc3 ϕ :	5100	Icc1 ϕ :	5400
TRANSFORMADOR:	KValta:	115	KVbaja:	13.8
	MVA:	20	%Z:	6
BUS BAJA TENSION:	Icc3 ϕ :	10500.2	Icc1 ϕ :	11442.5

RELEVADOR 51H:	RELEVADOR 51MT:	RELEVADOR 51NT:	RELEVADOR 51N:
Marca: SEL 251	Marca: Elegr	Marca: Elegr	Marca: Elegr
Tipo: 	Tipo: 	Tipo: 	Tipo:
RTCx: 400	RTCnt: 100	RTCx: 400	RTCnt: 400
Tapx: 3.9	Tapnt: 3.3	Tapx: 3.9	Tapnt: 0.7
Palanca: 	Palanca: 	Palanca: 	Palanca:
Tiempo: 0.50	Tiempo: 0.75	Tiempo: 0.50	Tiempo: 0.50

Continuar

Figura No.5

Después de que ya se seleccionaron los cuatro relevadores con sus respectivas curvas de operación, el programa termina de realizar todos los cálculos presentando la plantilla correspondiente a la figura No.6, donde se observa la palanca y el tiempo de operación calculado para cada relevador.

Otro objetivo más del programa desarrollado es que también presenta

CFE División Baja California
Subgerencia de Distribución

SUBESTACION: La Joya

Coordinación de Protecciones de Sobrecorriente de Transformador

DATOS DEL SISTEMA:	MVBase:	100	KVbase:	115
BUS ALTA TENSION:	Icc3 ϕ :	5100	Icc1 ϕ :	5400
TRANSFORMADOR:	KValta:	115	KVbaja:	13.8
	MVA:	20	%Z:	6
BUS BAJA TENSION:	Icc3 ϕ :	10500.2	Icc1 ϕ :	11442.5

RELEVADOR 51H:	RELEVADOR 51MT:	RELEVADOR 51NT:	RELEVADOR 51N:
Marca: SEL	Marca: SEL	Marca: SEL	Marca: SEL
Tipo: Muy	Tipo: Muy	Tipo: Muy	Tipo: Muy
RTCx: 60	RTCnt: 400	RTCnt: 100	RTCx: 400
Tapx: 3.3	Tapx: 3.9	Tapnt: 3.3	Tapnt: 0.7
Palanca: 3.9	Palanca: 2.8	Palanca: 7.6	Palanca: 5.2
Tiempo: 0.75868	Tiempo: 0.51485	Tiempo: 0.75642	Tiempo: 0.51284

Continuar

Figura No. 6

las graficas de coordinación de protecciones tanto para falla monofásica como para falla trifásica, lo cual se observar en las figuras No. 7 y No. 8.

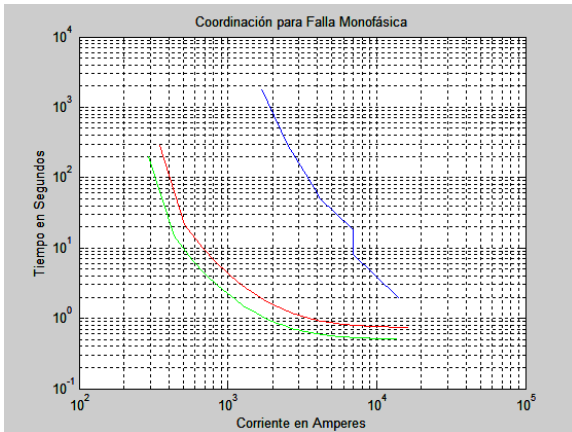


Figura No.7

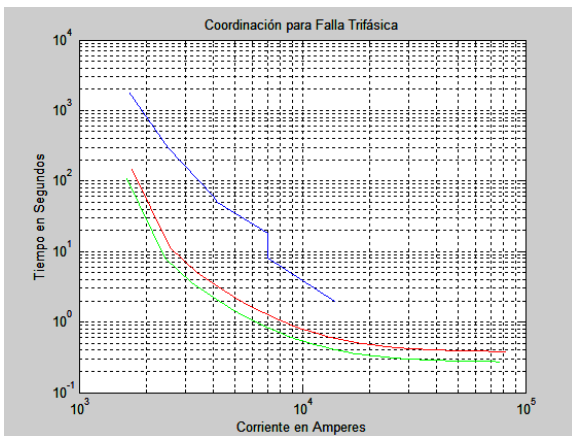


Figura No. 8

En las figuras anteriores el programa grafica las curvas de los relevadores de alta y baja tensión con respecto a la grafica de daño del transformador mostrando con esto que efectivamente existe coordinación entre los relevadores de protección llevando a cabo su operación antes de que la falla provoque algún daño en el transformador de potencia.

5.- CALCULOS REALIZADOS POR EL PROGRAMA.

Para desarrollar los cálculos el programa parte de que se proporcionen los datos correspondientes los MVA y KVA base del sistema así como las corrientes de corto circuito monofásica y trifásica en el bus de alta tensión de la subestación, con estos datos el programa calcula las corrientes base en alta y baja tensión del transformador así como las impedancias de secuencia positiva y cero para con ello obtener las corrientes de corto circuito en el lado de baja tensión del transformador, para esto el software utiliza las siguientes expresiones.

Potencia de cortocircuito en el bus de alta tensión:

$$MVA_{cc} = \sqrt{3} \times (KV_{nominales}) \times I_{cc} \times 10^3$$

$$MVA_{3\phi} = \sqrt{3} \times 115 \times 5.1 = 1015.8 MVA$$

$$MVA_{1\phi} = \sqrt{3} \times 115 \times 5.4 = 1075.6 MVA$$

Impedancia de secuencia positiva y negativa equivalente del sistema al bus de alta tensión de la subestación:

$$Z_1 = Z_2 = \frac{MVA_{base}}{MVA_{3\phi}} = \frac{100}{1015.8} = 0.098 p.u.$$

Impedancia de secuencia cero equivalente:

$$Z_0 = \frac{MVA_{base}}{MVA_{1\phi}} = \frac{100}{1075.6} = 0.093 p.u.$$

Impedancia del transformador de potencia:

$$Z_t = \frac{(\%Z) MVA_{base}}{MVA_{transf}} p.u.$$

Calculos de las corrientes de corto circuito en el bus de baja tensión del transformador.

Corriente base en 13.8 KV.

$$I_{base} = \frac{100 \times 1000}{\sqrt{3} \times 13.8} = 4183.69 Amp$$

Corrientes en valor por unidad (p.u).

$$I_{3\phi} = \frac{1.0}{Z_1} p.u. = \frac{1.0}{0.398} = 2.52 p.u.$$

$$I_{1\phi} = \frac{3.0}{2Z_1 + Z_0} = \frac{3.0}{1.096} = 2.73 p.u.$$

Corrientes reales en amperes:

$$I_{3\phi} = 2.52 \times 4183.69 = 10,542.9 \text{ Amp.}$$

$$I_{1\phi} = 2.73 \times 4183.69 = 11421.5 \text{ Amp.}$$

Gráfica de daño del transformador:

Para trazar la gráfica de daño del transformador el programa selecciona de acuerdo con la capacidad del mismo los datos según las consideraciones siguientes:

Los criterios para la selección, aplicación y ajustes de la protección por medio de relevadores deberá de considerar que el transformador se debe de proteger contra el efecto de las corrientes de fallas externas que al pasar por el transformador durante un tiempo prolongado pudieran dañarlo. Para propósitos de de coordinación y poder seleccionar los ajustes de las protecciones de acuerdo con la corriente que soportan los transformadores se aplican las “curvas de daño” las cuales son una representación gráfica de las corrientes y tiempos que soportan los transformadores.

La norma ANSI-IEEE C57. 109-1993 “Guía para la duración de corriente de falla a través de transformadores” considera también los efectos mecánicos (estos son más significativos que los efectos térmicos, particularmente en transformadores de gran capacidad).

Esta norma establece las recomendaciones para la aplicación de protecciones aplicadas para limitar el tiempo de exposición de los transformadores a las corrientes de corto circuito, considera para su aplicación 4 categorías de transformadores (I, II, III y IV), dentro de las cuales están los de potencia y distribución, la siguiente tabla nos muestra las capacidades de los transformadores de acuerdo con la categoría que les corresponde.

	Capacidad en KVA	
Cat	Monofasico	Trifasico
I	5-500	15-500
II	501-1667	501-5000
III	1668-10000	5001-30000
IV	>10000	>30000

6.-CONCLUSIONES:

Como conclusiones podemos mencionar que es bueno contar con herramientas de programación en el ámbito de la coordinación de protecciones, las cuales pueden ser fácilmente modificadas para poder anexar nuevos relevadores que salen al mercado sin tener la necesidad de adquirir una nueva versión de algún programa comercial el cual no nos da ninguna posibilidad de modificarlo ya que se desconoce su programación interna.

BIBLIOGRAFIA.

- [1] Analisis de Sistemas Electricos de Potencia. William D. Stevenson JR. (segunda edición 1979).
- [2] Apuntes del curso "Ingenieros en Protecciones Módulo III" Centro de Capacitación Sureste de la C.F.E. 2005.
- [3] Coordinación de Protecciones de Distribución C.F.E.

MATLAB® es marca registrada de The Mathworks Inc.

Acerca de los autores:

Ing. Roberto Flores Coronado. Nació en Mexicali B.C., en 1958. Recibió el título de Ingeniero Mecánico Eléctricista con Especialidad en Electricidad en 1982 en la Universidad Autónoma de Baja California (U.A.B.C.). Ingresó a C.F.E. en 1983 como ingeniero de puesta en servicio en la Planta Geotermoeléctrica de Cerro Prieto Dos, actualmente se desempeña como jefe de la oficina de proyectos y construcción en la División Baja California, en junio de 2003 termina sus estudios de Maestría en Ingeniería Electrónica con Especialidad en Instrumentación y Control en la Facultad de Ingeniería de la U. A. B. C., donde también cuenta con 22 años como catedrático por asignatura.

Ing. David Maldonado González. Nació en Mexicali B.C., en 1967. Terminó los estudios de Ingeniero Mecánico Electricista en 1990 en la Universidad Autónoma de Baja California (UABC). Ingresó a C.F.E. en 1991 como ingeniero auxiliar en el área de distribución, posteriormente ocupó varios cargos en la administración pública estatal y actualmente se desempeña como subgerente comercial en la División Baja California de la C.F.E.

Capítulo 7

Conclusiones

Como conclusiones podemos mencionar que es bueno contar con herramientas de programación en el ámbito del diseño de subestaciones eléctricas y en particular, para la realización de la coordinación de protecciones y el diseño de la red de tierras que faciliten la realización de los cálculos tediosos presentados en los capítulos II, III y IV, y que además puedan ser fácilmente modificadas para poder anexar nuevos elementos o realizar actualizaciones a la programación existente, como es el caso en la coordinación de protecciones cuando sale al mercado un nuevo relevador sin tener la necesidad de adquirir una nueva versión de algún programa comercial.

Apéndice A

Programas elaborados en Matlab para la coordinación de protecciones de sobrecorriente de transformador

A.1 Archivo coordina.m

%DAVID MALDONADO GONZALEZ

%Programa para simular la operación de un relevador de sobrecorriente

```

%digital para Sistemas de Potencia.
%Diseño de la pantalla de entrada de datos
%nombre del archivo "coordina.m"
close all
clear all
fig=figure('name','COORDINACION DE PROTECCIONES DE SOBRECORRIENTE','numbertitle','off'); clf;
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'fontsize',20,'fontname','arial black',... 'units','normalized','position',[0.01 0.94 0.13 0.075],...
    'horizontalalignment','center',... 'string','CFE');
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.15 0.96 0.25 0.04],... 'horizontalalignment','center',...
    'string','División Baja California');
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.15 0.93 0.25 0.04],... 'horizontalalignment','center',...
    'string','Subgerencia de Distribución');
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.45 0.94 0.19 0.046],... 'fontsize',9,'fontname','arial black',...
    'string','SUBESTACION:');
ubica1=uicontrol(fig,...
    'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial black',... 'string','',...
    'units','normalized','position',[0.65 0.94 0.25 0.046],... 'callback','get(ubica1,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.1 0.84 0.70 0.035],... 'string','Coordinación de Protecciones de Sobrecorriente de
Transformador');
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.05 0.78 0.25 0.035],... 'string','DATOS DEL SISTEMA:');
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.35 0.78 0.13 0.035],... 'string','MVAbase:');
ubica1=uicontrol(fig,...
    'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string','',...
    'units','normalized','position',[0.50 0.78 0.13 0.046],... 'callback','get(ubica1,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.65 0.78 0.13 0.035],... 'string','KVbase:');
ubica2=uicontrol(fig,...
    'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string','',...
    'units','normalized','position',[0.80 0.78 0.13 0.046],... 'callback','get(ubica2,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.05 0.72 0.25 0.035],... 'string','BUS ALTA TENSION:');
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.35 0.72 0.13 0.035],... 'string','Icc3ø:');
ubica3=uicontrol(fig,...
    'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string','',...
    'units','normalized','position',[0.50 0.72 0.13 0.046],... 'callback','get(ubica3,"string")'...
);

```

```

txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.65 0.72 0.13 0.035],... 'string','lcc1ø:');
ubica4=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string'," ,...
'units','normalized','position',[0.80 0.72 0.13 0.046],... 'callback','get(ubica4,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.05 0.66 0.25 0.035],... 'string','TRANSFORMADOR:');
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.35 0.66 0.13 0.035],... 'string','KValta:');
ubica5=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string'," ,...
'units','normalized','position',[0.50 0.66 0.13 0.046],... 'callback','get(ubica5,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.65 0.66 0.13 0.035],... 'string','KVbaja:');
ubica6=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string'," ,...
'units','normalized','position',[0.80 0.66 0.13 0.046],... 'callback','get(ubica6,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.35 0.60 0.13 0.035],... 'string','MVA:');
ubica7=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string'," ,...
'units','normalized','position',[0.50 0.60 0.13 0.046],... 'callback','get(ubica7,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.65 0.60 0.13 0.035],... 'string','%Z:');
ubica8=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string'," ,...
'units','normalized','position',[0.80 0.60 0.13 0.046],... 'callback','get(ubica8,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.05 0.54 0.25 0.035],... 'string','BUS BAJA TENSION:');
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.35 0.54 0.13 0.035],... 'string','lcc3ø:');
ubica9=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string'," ,...
'units','normalized','position',[0.50 0.54 0.13 0.046],... 'callback','get(ubica9,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.65 0.54 0.13 0.035],... 'string','lcc1ø:');
ubica10=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string'," ,...
'units','normalized','position',[0.80 0.54 0.13 0.046],... 'callback','get(ubica10,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...

```

```

    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.03 0.48 0.20 0.035],... 'string','RELEVADOR 51H:');
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.03 0.42 0.10 0.035],... 'string','Marca:');
ubica11=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string'," ,...
'units','normalized','position',[0.14 0.42 0.10 0.046],... 'callback','get(ubica11,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.03 0.36 0.10 0.035],... 'string','Tipo:');
ubica12=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string'," ,...
'units','normalized','position',[0.14 0.36 0.10 0.046],... 'callback','get(ubica12,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.03 0.30 0.10 0.035],... 'string','RTCh:');
ubica13=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string'," ,...
'units','normalized','position',[0.14 0.30 0.10 0.046],... 'callback','get(ubica13,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.03 0.24 0.10 0.035],... 'string','Taph:');
ubica14=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string'," ,...
'units','normalized','position',[0.14 0.24 0.10 0.046],... 'callback','get(ubica14,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.03 0.18 0.10 0.035],... 'string','Palanca:');
ubica15=uicontrol(fig,... 'style','edit',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',8,'fontname','arial',...
'string'," ,... 'units','normalized','position',[0.14 0.18 0.10 0.046],... 'callback','get(ubica15,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.03 0.12 0.10 0.035],... 'string','Tiempo:');
ubica16=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string'," ,...
'units','normalized','position',[0.14 0.12 0.10 0.046],... 'callback','get(ubica16,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.28 0.48 0.20 0.035],... 'string','RELEVADOR 51MT:');
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.28 0.42 0.10 0.035],... 'string','Marca:');
ubica17=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string'," ,...
'units','normalized','position',[0.39 0.42 0.10 0.046],... 'callback','get(ubica17,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.28 0.36 0.10 0.035],... 'string','Tipo:');
ubica18=uicontrol(fig,...

```

```

'style','edit',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string',"...
'units','normalized','position',[0.39 0.36 0.10 0.046],... 'callback','get(ubica18,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.28 0.30 0.10 0.035],... 'string','RTCx:');
ubica19=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string',"...
'units','normalized','position',[0.39 0.30 0.10 0.046],... 'callback','get(ubica19,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.28 0.24 0.10 0.035],... 'string','Tapx:');
ubica20=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string',"...
'units','normalized','position',[0.39 0.24 0.10 0.046],... 'callback','get(ubica20,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.28 0.18 0.10 0.035],... 'string','Palanca:');
ubica21=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string',"...
'units','normalized','position',[0.39 0.18 0.10 0.046],... 'callback','get(ubica21,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.28 0.12 0.10 0.035],... 'string','Tiempo:');
ubica22=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string',"...
'units','normalized','position',[0.39 0.12 0.10 0.046],... 'callback','get(ubica22,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.53 0.48 0.20 0.035],... 'string','RELEVADOR 51NT:');
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.53 0.42 0.10 0.035],... 'string','Marca:');
ubica23=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string',"...
'units','normalized','position',[0.64 0.42 0.10 0.046],... 'callback','get(ubica23,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.53 0.36 0.10 0.035],... 'string','Tipo:');
ubica24=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string',"...
'units','normalized','position',[0.64 0.36 0.10 0.046],... 'callback','get(ubica24,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.53 0.30 0.10 0.035],... 'string','RTCnt:');
ubica25=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string',"...
'units','normalized','position',[0.64 0.30 0.10 0.046],... 'callback','get(ubica25,"string")'...
);

```

```

txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.53 0.24 0.10 0.035],... 'string','Tapnt:');
ubica26=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string',"",...
'units','normalized','position',[0.64 0.24 0.10 0.046],... 'callback','get(ubica26,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.53 0.18 0.10 0.035],... 'string','Palanca:');
ubica27=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string',"",...
'units','normalized','position',[0.64 0.18 0.10 0.046],... 'callback','get(ubica27,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.53 0.12 0.10 0.035],... 'string','Tiempo:');
ubica28=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string',"",...
'units','normalized','position',[0.64 0.12 0.10 0.046],... 'callback','get(ubica28,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.78 0.48 0.20 0.035],... 'string','RELEVADOR 51N:');
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.78 0.42 0.10 0.035],... 'string','Marca:');
ubica29=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string',"",...
'units','normalized','position',[0.89 0.42 0.10 0.046],... 'callback','get(ubica29,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.78 0.36 0.10 0.035],... 'string','Tipo:');
ubica30=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string',"",...
'units','normalized','position',[0.89 0.36 0.10 0.046],... 'callback','get(ubica30,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.78 0.30 0.10 0.035],... 'string','RTCn:');
ubica31=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string',"",...
'units','normalized','position',[0.89 0.30 0.10 0.046],... 'callback','get(ubica31,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.78 0.24 0.10 0.035],... 'string','Tapn:');
ubica32=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string',"",...
'units','normalized','position',[0.89 0.24 0.10 0.046],... 'callback','get(ubica32,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.78 0.18 0.10 0.035],... 'string','Palanca:');
ubica33=uicontrol(fig,...

```

```

'style','edit',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string','"...
'units','normalized','position',[0.89 0.18 0.10 0.046],... 'callback','get(ubica33,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.78 0.12 0.10 0.035],... 'string','Tiempo:');
ubica34=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string','"...
'units','normalized','position',[0.89 0.12 0.10 0.046],... 'callback','get(ubica34,"string")'...
);
pbstart=uicontrol(fig,...
    'style','push',... 'units','normalized','position',[0.89 0.03 0.10 0.05],... 'string','Continuar',...
    'callback','cortoprueba');

```

A.2 Archivo cortoprueba.m

```

%Programa para calcular la corriente de corto
%circuito al lado de baja de un transformador.
%Elaborado por: DAVID MALDONADO GONZALEZ

```

```

global MTh
global Mtx

```

```

MVA=ubica1,'string';
MVA=str2num(MVA);
kv=ubica2,'string';
kv=str2num(kv);
I3h=ubica3,'string';
I3h=str2num(I3h);
I1h=ubica4,'string';
I1h=str2num(I1h);
kvh=ubica5,'string';
kvh=str2num(kvh);
kvx=ubica6,'string';
kvx=str2num(kvx);
cap=ubica7,'string';
cap=str2num(cap);
ztr=ubica8,'string';
ztr=str2num(ztr);

lb=(MVA*1000)/(sqrt(3)*kv);
lbh=(MVA*1000)/(sqrt(3)*kvh);
lhx=(MVA*1000)/(sqrt(3)*kvx);
Inh=(cap*1000)/(sqrt(3)*kvh);
Inx=(cap*1000)/(sqrt(3)*kvx);
ztp=(ztr/100)*(kv/kvh)^2*(MVA/cap);
I3hp=I3h/lb;
z1=1/I3hp;

```

```
zs=z1;  
z1x=zs+ztp;  
l3xp=1/z1x;  
l3x=l3xp*lbx;  
l1xp=3/((2*z1x)+ztp);  
l1x=l1xp*lbx;
```

```
%Ajustes para el relevador de alta 51H
```

```
RTCh=l3h/100;  
RTCh=RTCh*5;  
RTCh=RTCh/100;  
RTCh=ceil(RTCh);  
RTCh=(RTCh*100)/5;  
Th=2*lnh;  
Taph=Th/RTCh;  
xh=Taph;  
yh=fix(xh);  
zh=xh-yh;  
zh=zh*10;  
zh=fix(zh);  
zh=zh/10;  
zh=zh+yh;  
Taph=zh;  
MTh=(l3x*(kvx/kvh))/(RTCh*Taph);
```

```
%Ajustes para el relevador de baja 51MT
```

```
Tx=0.95*(2*lnx);  
RTCx=Tx/5;  
RTCx=RTCx/100;  
RTCx=ceil(RTCx);  
RTCx=(RTCx*100);  
Tapx=Tx/RTCx;  
xx=Tapx;  
yx=fix(xx);  
zx=xx-yx;  
zx=zx*10;  
zx=fix(zx);  
zx=zx/10;  
zx=zx+yx;  
Tapx=zx;  
MTx=l3x/(RTCx*Tapx);
```

```
%Ajustes para el relevador de baja 51NT
```

```
Tnt=0.40*lnx;  
RTCnt=Tnt/5;  
RTCnt=RTCnt/100;  
RTCnt=ceil(RTCnt);
```

```

RTCnt=(RTCnt*100);
%RTCnt=120; %RTC=600/5
Tapnt=Tnt/RTCnt;
xnt=Tapnt;
xnt=10*xnt;
xnt=fix(xnt);
xnt=xnt/10;
%znt=znt*10;
%znt=fix(znt);
%znt=znt/10;
%znt=znt+ynt;
Tapnt=xnt;
MTnt=l1x/(RTCnt*Tapnt);

%Ajustes para el relevador de baja 51N de Banco
Tnb=0.35*Inx;
Tapnb=Tnb/RTCx; %RTCx ya se seleccionó en el 51MT
xnb=Tapnb;
xnb=10*xnb;
xnb=fix(xnb);
xnb=xnb/10;
Tapnb=xnb;
MTnb=l1x/(RTCx*Tapnb);

%curvatr

ubica9=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',9,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.5 0.54 0.13 0.046],...
'string',l3x);
ubica10=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',9,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.80 0.54 0.13 0.046],...
'string',l1x);
ubica13=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',9,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.14 0.30 0.10 0.046],...
'string',RTCh);
ubica14=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',9,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.14 0.24 0.10 0.046],...
'string',Taph);
ubica19=uicontrol(fig,... 'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',9,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.39 0.30
0.10 0.046],... 'string',RTCx);
ubica20=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',9,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.39 0.24 0.10 0.046],...
'string',Tapx);
ubica25=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',9,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.64 0.30 0.10 0.046],...
'string',RTCnt);
ubica26=uicontrol(fig,...

```

```

'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',9,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.64 0.24 0.10 0.046],...
'string','Tapnt);
ubica31=icontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',9,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.89 0.30 0.10 0.046],...
'string','RTCx);
ubica32=icontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',9,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.89 0.24 0.10 0.046],...
'string','Tapnb);

%Seleccionar 51H
pbstart=icontrol(fig,...
    'style','push',... 'backgroundcolor','green',... 'units','normalized','position',[0.14 0.42 0.10 0.046],... 'string','Elegir',...
    'callback','mcarel51H');

%Seleccionar 51MT
pbstart=icontrol(fig,...
    'style','push',... 'backgroundcolor','green',... 'units','normalized','position',[0.39 0.42 0.10 0.046],... 'string','Elegir',...
    'callback','mcarel51MT');

%curvatr

%Seleccionar 51NT
pbstart=icontrol(fig,...
    'style','push',... 'backgroundcolor','green',... 'units','normalized','position',[0.64 0.42 0.10 0.046],... 'string','Elegir',...
    'callback','mcarel51NT');

%Seleccionar 51N
pbstart=icontrol(fig,...
    'style','push',... 'backgroundcolor','green',... 'units','normalized','position',[0.89 0.42 0.10 0.046],... 'string','Elegir',...
    'callback','mcarel51NB');

```

A.3 Archivo mcarel51H.m

```

K=MENU('Relevador de Alta 51H','SEL251','SIEMENS 7SJ62','AREVA P144','ABB DPU2000R')
if K==1;
    mca=sprintf('SEL 251');
    ubica11=icontrol(fig,...
        'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',9,'fontname','arial',...
        'units','normalized','position',[0.14 0.42 0.10 0.046],... 'string',mca);
    rsel
else
    if K==2;
        rsel;
    else
        if K==3;
            rsel;

```

```

else
    if K==4;
        rsel;
    end
end
end
end
end
end

```

A.4 Archivo rsel.m

```

%Programa para el calculo de palanca en un relevador
%de sobrecorriente tipo SEL
%elaborado por DAVID MALDONADO GONZALEZ
global MTh
global Mtx
curva=MENU('Curva de Operacion','Mode. Inversa','Muy Inversa','Extre. Inversa')
if curva==1;
    A=0.668;
    B=0.157;
    p=1;
    %tr=4.85;
    tipo=sprintf('Mode. Inverso');
    ubica12=uicontrol(fig,...
    'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',9,'fontname','arial',...
    'units','normalized','position',[0.14 0.36 0.10 0.046],... 'string',tipo);
else
    if curva==2;
        A=3.88;
        B=0.0963;
        p=2.00;
        %tr=21.60;
        tipo=sprintf('Muy Inverso');
        ubica12=uicontrol(fig,...
        'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',9,'fontname','arial',...
        'units','normalized','position',[0.14 0.36 0.10 0.046],... 'string',tipo);
    else
        if curva==3;
            A=5.67;
            B=0.0352;
            p=2.00;
            %tr=29.1;
            tipo=sprintf('Extre. Inverso');
            ubica12=uicontrol(fig,...
            'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',9,'fontname','arial',...
            'units','normalized','position',[0.14 0.36 0.10 0.046],... 'string',tipo);
        else
            end
        end
    end
end
end

```

```

    end
end
tad=get(ubica16,'string');
tad=str2num(tad);
T=A/((MTh^p)-1)+B;
e=0.005;
d=1;
if T>tad
    T1=T;
    while T1>tad+e;
        d=d-0.1;
        if d>0.19;
            T1=T*d;
            if (T1+e)<tad+e;
                d=d+0.1;
            else
                end
            else
                %sprintf('La palanca es menor de 0.2')
                d=sprintf('F. de Rango');
                break
            end
        end
    else
        tx=tad-T;
        T1=T;
        while T1<tad+e;
            d=d+0.1;
            if d<15.05
                T1=T*d;
            else
                %sprintf('La palanca es mayor de 15')
                d=sprintf('F. de Rango');
                break
            end
        end
    end
end
Tdis=T*d;
%sprintf('La palanca es: %15.5f',d)
ubica15=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',9,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.14 0.18 0.10 0.046],...
'string',d);
%sprintf('El tiempo de operacion es: %15.5f',Tdis)
ubica16=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',9,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.14 0.12 0.10 0.046],...
'string',Tdis);
%v=[0.5 100 0.1 100];

```

```

M1=1.05:0.5:50;
T2=A./((M1.^p)-1)+B;%palanca 1
Td=T2*d;
Mamp=M1*Taph*RTCh*(kvh/kvx);
%loglog(Mamp,T2),grid;%axis(v);%grafica para palanca 1
%hold on
%fig1=figure('name','Coordinación para falla trifásica','numbertitle','off','menubar','none'); clf;
fig1=figure('name','Coordinación para falla trifásica','numbertitle','off','visible','off'); clf;
loglog(Mamp,Td,'r')%grafica para palanca calculada
title('Coordinación para Falla Trifásica')
xlabel('Corriente en Amperes')
ylabel('Tiempo en Segundos')
hold on
curvatr

```

Apéndice B

Programas elaborados en Matlab para el diseño de redes de tierra

A.1 Archivo redes.m

```

%DAVID MALDONADO GONZALEZ
%Programa para comprobar la Seguridad del Diseño de Redes de Tierra en
%Subestaciones Eléctricas de Potencia
%Diseño de la pantalla de entrada de datos
%nombre del archivo "redes.m"
close all
clear all
fig=figure('name','Comprobación de la Seguridad del Diseño de Redes de Tierra','numbertitle','off','menubar','none'); clf;
pstart=uicontrol(fig,...
    'style','push',... 'units','normalized','position',[0.88 0.06 0.10 0.05],... 'string','Ejecutar',... 'callback','mallacuatro');
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'fontsize',20,'fontname','arial black',... 'units','normalized','position',[0.01 0.94 0.11 0.075],...
    'horizontalalignment','center',... 'string','CFE');
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.3 0.84 0.40 0.035],... 'string','Introduzca los datos requeridos');
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.05 0.78 0.55 0.035],... 'string','SUBESTACION BAJO ESTUDIO');
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.05 0.72 0.55 0.035],... 'string','AREA QUE CUBRIRA LA MALLA');
txt=uicontrol(fig,...

```

```

'style','text',... 'units','normalized','position',[0.05 0.66 0.55 0.035],... 'string','LONGITUD ENTRE CONDUCTORES
PARALELOS');
txt=icontrol(fig,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.05 0.60 0.55 0.035],... 'string','NUMERO TOTAL DE CUADROS DE LA MALLA');
txt=icontrol(fig,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.05 0.54 0.55 0.035],... 'string','DIAMETRO DEL CONDUCTOR DE LA MALLA');
txt=icontrol(fig,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.05 0.48 0.55 0.035],... 'string','RESISTIVIDAD DEL TERRENO DE LA
SUBESTACION');
txt=icontrol(fig,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.05 0.42 0.55 0.035],... 'string','PROFUNDIDAD A LA QUE SE COLOCARA LA
MALLA');
txt=icontrol(fig,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.05 0.36 0.55 0.035],... 'string','CORRIENTE DE CORTO CIRCUITO');
txt=icontrol(fig,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.05 0.30 0.55 0.035],... 'string','MAYOR DISTANCIA EN EL EJE X DE LA RED');
txt=icontrol(fig,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.05 0.24 0.55 0.035],... 'string','MAYOR DISTANCIA EN EL EJE Y DE LA RED');
txt=icontrol(fig,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.05 0.18 0.55 0.035],... 'string','MAYOR DIAGONAL DE LA MALLA');
txt=icontrol(fig,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.05 0.12 0.55 0.035],... 'string','RESISTIVIDAD DEL MATERIAL SOBRE LA
SUPERFICIE');
txt=icontrol(fig,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.05 0.06 0.55 0.035],... 'string','ESPESOR DE LA CAPA SOBRE LA SUPERFICIE');
txt=icontrol(fig,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.05 0.00 0.55 0.035],... 'string','MAXIMO TIEMPO DE OPERACION DE LAS
PROTECCIONES');
subesta=icontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string','',...
'units','normalized','position',[0.61 0.78 0.25 0.046],... 'callback','get(subesta,"string")'...
);
area=icontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string','',...
'units','normalized','position',[0.61 0.72 0.14 0.046],... 'callback','get(area,"string")'...
);
longitud=icontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string','',...
'units','normalized','position',[0.61 0.66 0.14 0.046],... 'callback','get(longitud,"string")'...
);
cuadros=icontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string','',...
'units','normalized','position',[0.61 0.60 0.14 0.046],... 'callback','get(cuadros,"string")'...
);
resistividad=icontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string','',...
'units','normalized','position',[0.61 0.48 0.14 0.046],... 'callback','get(resistividad,"string")'...

```

```

);
profundidad=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string',"...
'units','normalized','position',[0.61 0.42 0.14 0.046],... 'callback','get(profundidad,"string")'...
);
corriente=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string',"...
'units','normalized','position',[0.61 0.36 0.14 0.046],... 'callback','get(corriente,"string")'...
);
longx=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string',"...
'units','normalized','position',[0.61 0.30 0.14 0.046],... 'callback','get(longx,"string")'...
);
longy=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string',"...
'units','normalized','position',[0.61 0.24 0.14 0.046],... 'callback','get(longy,"string")'...
);
diagonal=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string',"...
'units','normalized','position',[0.61 0.18 0.14 0.046],... 'callback','get(diagonal,"string")'...
);
superficie=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string',"...
'units','normalized','position',[0.61 0.12 0.14 0.046],... 'callback','get(superficie,"string")'...
);
capa=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string',"...
'units','normalized','position',[0.61 0.06 0.14 0.046],... 'callback','get(capa,"string")'...
);
tiempo=uicontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'string',"...
'units','normalized','position',[0.61 0.00 0.14 0.046],... 'callback','get(tiempo,"string")'...
);
txt=uicontrol(fig,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.76 0.72 0.08 0.046],... 'string','Metros²');
txt=uicontrol(fig,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.76 0.66 0.08 0.046],... 'string','Metros');
txt=uicontrol(fig,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.76 0.60 0.08 0.046],... 'string','Cuadros');
txt=uicontrol(fig,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.76 0.54 0.08 0.046],... 'string','Metros');
txt=uicontrol(fig,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.76 0.48 0.12 0.046],... 'string','Ohms/metro');
txt=uicontrol(fig,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.76 0.42 0.08 0.046],... 'string','Metros');
txt=uicontrol(fig,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.76 0.36 0.09 0.046],... 'string','Amperes');

```

```

txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.76 0.30 0.08 0.046],... 'string','Metros');
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.76 0.24 0.08 0.046],... 'string','Metros');
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.76 0.18 0.08 0.046],... 'string','Metros');
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.76 0.12 0.12 0.046],... 'string','Ohms/metro');
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.76 0.06 0.08 0.046],... 'string','Metros');
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.76 0.00 0.10 0.046],... 'string','Segundos');
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.13 0.96 0.29 0.04],... 'horizontalalignment','center',...
    'string','Division Baja California');
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.13 0.93 0.29 0.04],... 'horizontalalignment','center',...
    'string','Depto. Proyectos y Construcción');
txt=uicontrol(fig,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.15 0.88 0.70 0.04],... 'horizontalalignment','center',...
    'string','COMPROBACION DE LA SEGURIDAD DEL DISEÑO DE REDES DE TIERRA');
pbstart=uicontrol(fig,...
    'style','push',... 'units','normalized','position',[0.61 0.54 0.14 0.046],... 'string','Seleccionar',...
    'callback','conductor');

```

B.2 archivo mallacuatro.m

```

%DAVID MALDONADO GONZALEZ
%Programa para comprobar la Seguridad del Diseño de Redes de Tierra
%en Subestaciones Eléctricas de Potencia
%Diseño del programa y de la pantalla de salida de resultados
%nombre del archivo "mallacuatro.m"
Subestacion=get(subesta,'string');
a=get(area,'string');
a=str2num(a);
l=get(longitud,'string');
l=str2num(l);
n=get(cuadros,'string');
n=str2num(n);
p=get(resistividad,'string');
p=str2num(p);
h=get(profundidad,'string');
h=str2num(h);
I=get(corriente,'string');
I=str2num(I);
Lx=get(longx,'string');
Lx=str2num(Lx);

```

```

Ly=get(longy,'string');
Ly=str2num(Ly);
Dm=get(diagonal,'string');
Dm=str2num(Dm);
Ps=get(superficie,'string');
Ps=str2num(Ps);
Hs=get(capa,'string');
Hs=str2num(Hs);
Tp=get(tiempo,'string');
Tp=str2num(Tp);
Rt=p*(0.25*sqrt(3.14159/a)+(1/(n*I))*(1/4.44288)*log((0.165*I)/d))*(1-(2.256*h)/sqrt(a));
Lv=3.05;
b=0.0159;
vrs=(p/(6.28318*Rt*Lv))*(log((4*Lv)/b)-1);
vrs=fix(vrs)+1;
Dia=sqrt((Lx^2)+(Ly^2));
if Lx>Ly
    C=Lx/l;
else
    C=Ly/l;
end
C=fix(C);
x=[3:2:(2*C)-3];
y=[4:2:(2*C)-2];
z=x./y;
m=z(1,1);
for j=2:C-2
    m=m*z(1,j);
end
Km=(1/(2*pi))*log(l^2/(16*h*d))+(1/pi)*log(m);
Lp=(2*Lx)+2*(Ly);
g2=sqrt(Lp/(4*sqrt(a)));
g3=((Lx*Ly)/a)^(0.7*a)/(Lx*Ly);
g4=Dm/Dia;
Cs=(1/0.96)*(1-(0.106*(1-(p/Ps)))/((2*Hs)+0.106));
Epc=((1000+(6*Cs*Ps))*0.116)/sqrt(Tp);
Ecc=((1000+(1.5*Cs*Ps))*0.116)/sqrt(Tp);
fig2=figure('name','Plano de la Red de Tierras Propuesto','numbertitle','off','menubar','none'); clf;
txt=uicontrol(fig2,...
    'style','text',... 'fontsize',20,'fontname','arial black',... 'units','normalized','position',[0.01 0.94 0.11 0.075],...
    'horizontalalignment','center',... 'string','CFE');
txt=uicontrol(fig2,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.13 0.96 0.29 0.04],... 'horizontalalignment','center',...
    'string','Division Baja California');
txt=uicontrol(fig2,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.13 0.93 0.29 0.04],... 'horizontalalignment','center',...
    'string','Depto. Proyectos y Construcción');

```

```

txt=uicontrol(fig2,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.10 0.015 0.55 0.04],... 'horizontalalignment','center',...
    'string','RED DE TIERRAS PROPUESTA PARA LA SUBESTACION');
subes=uicontrol(fig2,...
'style','text',...'backgroundcolor','white',... 'fontsize',9,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.67 0.015 0.25 0.04],...
'string','Subestacion);
nx=Lx/l;
cx=fix(nx);
lxd=cx*l;
lxt=Lx-lxd;
ny=Ly/l;
cy=fix(ny);
lyd=cy*l;
lyt=Ly-lyd;
[x1,y1] = meshgrid(0:l*(cx), 0:l*(cy));
plot(x1,y1)
hold on
[x2,y2] = meshgrid((cx*l):lxt:Lx, 0:l*(cy));
plot(x2,y2)
[x3,y3] = meshgrid(0:l*(cx), (cy*l):lyt:Ly);
plot(x3,y3)
[x4,y4]=meshgrid((cx*l):lxt:Lx, (cy*l):lyt:Ly);
plot(x4,y4)
[x1,y1] = meshgrid(0:l*(cy), 0:l*(cx));
plot(y1,x1)
[x2,y2] = meshgrid(0:l*(cy), (cx*l):lxt:Lx);
plot(y2,x2)
[x3,y3] = meshgrid((cy*l):lyt:Ly, 0:l*(cx));
plot(y3,x3)
[x4,y4]=meshgrid((cy*l):lyt:Ly, (cx*l):lxt:Lx);
plot(y4,x4)
if Lx>Ly
    axis([0 l*(nx+1) 0 l*(nx+1)])
else
    axis([0 l*(ny+1) 0 l*(ny+1)])
end
hold off
bx=nx/cx;
if bx==1
    bxx=1;
else
    bxx=0;
end
by=ny/cy;
if by==1
    byy=4;
else

```

```

    byy=2;
end
if bxx+byy==2
    Lc=(Ly*fix((Lx/l)+2))+(Lx*fix((Ly/l)+2));
else
    if bxx+byy==3
        Lc=(Ly*fix((Lx/l)+1))+(Lx*fix((Ly/l)+2));
    else
        if bxx+byy==4
            Lc=(Ly*fix((Lx/l)+2))+(Lx*fix((Ly/l)+1));
        else
            if bxx+byy==5
                Lc=(Ly*fix((Lx/l)+1))+(Lx*fix((Ly/l)+1));
            else
                end
            end
        end
    end
end
end
g1=(2*Lc)/Lp;
g=g1*g2*g3*g4;
Lt=Lc+(vrs*3.05);
Ki=0.644+(0.148*g);
Ks=(1/pi)*(1/(2*h)+1/(l+h)+(1/l)*(1-0.5^(g-2)));
Em=(Km*Ki*p*1)/Lt;
Ep=(Ks*Ki*p*1)/Lt;
%Ec=(Km*Ki*p*1)/Lt;
Ec=(0.8*p*1)/Lt;
fig3=figure('name','Comprobación de la Seguridad del Diseño de Redes de Tierra','numbertitle','off','menubar','none'); clf;
txt=uicontrol(fig3,...
    'style','text',... 'fontsize',20,'fontname','arial black',... 'units','normalized','position',[0.01 0.94 0.11 0.075],...
    'horizontalalignment','center',... 'string','CFE');
txt=uicontrol(fig3,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.13 0.96 0.29 0.04],... 'horizontalalignment','center',...
    'string','Division Baja California');
txt=uicontrol(fig3,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.13 0.93 0.29 0.04],... 'horizontalalignment','center',...
    'string','Depto. Proyectos y Construcción');
txt=uicontrol(fig3,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.15 0.87 0.70 0.04],... 'horizontalalignment','center',...
    'string','COMPROBACION DE LA SEGURIDAD DEL DISEÑO DE REDES DE TIERRA');
txt=uicontrol(fig3,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.1 0.80 0.75 0.04],... 'string','RESULTADOS OBTENIDOS DEL DISEÑO');
txt=uicontrol(fig3,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.06 0.70 0.55 0.04],... 'horizontalalignment','left',...
    'string','SUBESTACION DE ESTUDIO');
txt=uicontrol(fig3,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.06 0.64 0.55 0.04],... 'horizontalalignment','left',...

```

```

'string','RESISTENCIA A TIERRA DE LA RED');
txt=uicontrol(fig3,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.06 0.58 0.55 0.04],... 'horizontalalignment','left',...
'string','NUMERO MINIMO DE VARILLAS REQUERIDAS');
txt=uicontrol(fig3,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.06 0.52 0.55 0.04],... 'horizontalalignment','left',...
'string','TENSION DE MALLA GENERADA');
txt=uicontrol(fig3,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.06 0.46 0.55 0.04],... 'horizontalalignment','left',...
'string','TENSION DE PASO GENERADA');
txt=uicontrol(fig3,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.06 0.40 0.55 0.04],... 'horizontalalignment','left',...
'string','TENSION DE PASO MAXIMA PERMITIDA');
txt=uicontrol(fig3,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.06 0.34 0.55 0.04],... 'horizontalalignment','left',...
'string','TENSION DE CONTACTO GENERADA');
txt=uicontrol(fig3,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.06 0.28 0.55 0.04],... 'horizontalalignment','left',...
'string','TENSION DE CONTACTO MAXIMA PERMITIDA');
txt=uicontrol(fig3,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.06 0.22 0.55 0.04],... 'horizontalalignment','left',...
'string','DE ACUERDO CON LA TENSION DE PASO LA MALLA');
txt=uicontrol(fig3,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.06 0.16 0.55 0.04],... 'horizontalalignment','left',...
'string','DE ACUERDO CON LA TENSION DE CONTACTO LA MALLA');
txt=uicontrol(fig3,...
'style','text',... 'units','normalized','position',[0.06 0.10 0.55 0.04],... 'horizontalalignment','left',...
'string','LONGITUD DE CONDUCTOR TOTAL REQUERIDO');
subesta=uicontrol(fig3,...
'style','text',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',9,'fontname','arial',...
'units','normalized','position',[0.64 0.70 0.25 0.04],... 'string','Subestacion);
resistencia=uicontrol(fig3,...
'style','text',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',9,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.64 0.64 0.15 0.04],...
'string','Rt);
varillas=uicontrol(fig3,...
'style','text',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',9,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.64 0.58 0.15 0.04],...
'string','vrs);
tenmalla=uicontrol(fig3,...
'style','text',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',9,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.64 0.52 0.15 0.04],...
'string','Em);
maxpaso=uicontrol(fig3,...
'style','text',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',9,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.64 0.40 0.15 0.04],...
'string','Epc);
maxcontac=uicontrol(fig3,...
'style','text',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',9,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.64 0.28 0.15 0.04],...
'string','Ecc);
longtot=uicontrol(fig3,...

```

```

'style','text',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',9,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.64 0.10 0.15 0.04],...
'string',Lc);
if Ep<Epc
    seg=sprintf('ES SEGURA');
    tenpaso=icontrol(fig3,...
    'style','text',... 'backgroundcolor','green',... 'fontsize',9,'fontname','arial',... 'horizontalalignment','center',...
    'units','normalized','position',[0.64 0.46 0.15 0.04],... 'string',Ep);
    longx=icontrol(fig3,...
    'style','text',... 'backgroundcolor','green',... 'fontsize',9,'fontname','arial',...
    'units','normalized','position',[0.64 0.22 0.25 0.04],... 'string',seg);
    paso=1;
else
    seg=sprintf('NO ES SEGURA');
    tenpaso=icontrol(fig3,...
    'style','text',... 'backgroundcolor','red',... 'horizontalalignment','center',...
    'units','normalized','position',[0.64 0.46 0.15 0.04],...
    'string',Ep);
    longy=icontrol(fig3,...
    'style','text',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',9,'fontname','arial',...
    'units','normalized','position',[0.64 0.22 0.25 0.04],... 'string',seg);
    paso=0;
end
if Ec<Ecc
    seg1=sprintf('ES SEGURA');
    tencontac=icontrol(fig3,...
    'style','text',... 'backgroundcolor','green',... 'fontsize',9,'fontname','arial',...
    'units','normalized','position',[0.64 0.34 0.15 0.04],... 'string',Ec);
    longx=icontrol(fig3,...
    'style','text',... 'backgroundcolor','green',... 'fontsize',9,'fontname','arial',...
    'units','normalized','position',[0.64 0.16 0.25 0.04],... 'string',seg1);
    conta=1;
else
    seg1=sprintf('NO ES SEGURA');
    tencontac=icontrol(fig3,...
    'style','text',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',9,'fontname','arial',...
    'units','normalized','position',[0.64 0.34 0.15 0.04],... 'string',Ec);
    longy=icontrol(fig3,...
    'style','text',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',9,'fontname','arial',...
    'units','normalized','position',[0.64 0.16 0.25 0.04],... 'string',seg1);
    conta=0;
end
txt=icontrol(fig3,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.80 0.64 0.09 0.04],... 'string','Ohms');
txt=icontrol(fig3,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.80 0.58 0.09 0.04],... 'string','Varillas');
txt=icontrol(fig3,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.80 0.52 0.09 0.04],... 'string','Voltios');

```

```

txt=uicontrol(fig3,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.80 0.46 0.09 0.04],... 'string','Voltios');
txt=uicontrol(fig3,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.80 0.40 0.09 0.04],... 'string','Voltios');
txt=uicontrol(fig3,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.80 0.34 0.09 0.04],... 'string','Voltios');
txt=uicontrol(fig3,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.80 0.28 0.09 0.04],... 'string','Voltios');
txt=uicontrol(fig3,...
    'style','text',... 'units','normalized','position',[0.80 0.10 0.09 0.04],... 'string','Metros');
if paso+conta==2
    diseno=sprintf('EL DISEÑO ES SATISFACTORIO');
    dise=uicontrol(fig3,...
        'style','text',... 'backgroundcolor','green',... 'fontsize',9,'fontname','arial',...
        'units','normalized','position',[0.25 0.035 0.40 0.04],... 'string',diseno);
else
    diseno=sprintf('SE REQUIERE REDISEÑAR LA RED');
    dise=uicontrol(fig3,...
        'style','text',... 'backgroundcolor','red',... 'fontsize',9,'fontname','arial',...
        'units','normalized','position',[0.25 0.015 0.40 0.04],... 'string',diseno);
end
pbstart=uicontrol(fig3,...
    'style','push',... 'units','normalized','position',[0.88 0.035 0.11 0.05],... 'string','Imprimir',...
    'callback','imprimir');
a=num2str(a);
l=num2str(l);
n=num2str(n);
p=num2str(p);
h=num2str(h);
l=num2str(l);
Lx=num2str(Lx);
Ly=num2str(Ly);
Dm=num2str(Dm);
Ps=num2str(Ps);
Hs=num2str(Hs);
Tp=num2str(Tp);
subesta=uicontrol(fig,...
    'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.61 0.78 0.25 0.046],...
    'string','Subestacion);
area=uicontrol(fig,...
    'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.61 0.72 0.14 0.046],...
    'string',a);
longitud=uicontrol(fig,...
    'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.61 0.66 0.14 0.046],...
    'string',l);
cuadros=uicontrol(fig,...
    'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.61 0.60 0.14 0.046],...

```

```

'string',n);
resistividad=icontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.61 0.48 0.14 0.046],...
'string',p);
profundidad=icontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.61 0.42 0.14 0.046],...
'string',h);
corriente=icontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.61 0.36 0.14 0.046],...
'string',I);
longx=icontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.61 0.30 0.14 0.046],...
'string',Lx);
longy=icontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.61 0.24 0.14 0.046],...
'string',Ly);
diagonal=icontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.61 0.18 0.14 0.046],...
'string',Dm);
superficie=icontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.61 0.12 0.14 0.046],...
'string',Ps);
capa=icontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.61 0.06 0.14 0.046],...
'string',Hs);
tiempo=icontrol(fig,...
'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',... 'units','normalized','position',[0.61 0.00 0.14 0.046],...
'string',Tp);

```

B.3 Archivo conductor.m

```

cable=MENU('Calibre','3/0 AWG','4/0 AWG','250 KCM','1000 KCM')
if cable==1;
    d=0.0119;
else
    if cable==2;
        d=0.0134;
    else
        if cable==3;
            d=0.0146;
        else
            if cable==4;
                d=0.0236
            end
        end
    end
end
end
end

```

```
conductor=uicontrol(fig,...  
    'style','edit',... 'backgroundcolor','white',... 'fontsize',8,'fontname','arial',...  
    'units','normalized','position',[0.61 0.54 0.14 0.046],... 'string',d);
```

B.4 Archivo imprimir.m

```
%DAVID MALDONADO GONZALEZ  
%Programa para comprobar la Seguridad del Diseño de Redes de Tierra en  
%Subestaciones Eléctricas de Potencia  
%Impresión de las plantillas de Entrada de Datos y de Resultados  
%nombre del archivo "imprimir.m"  
print(fig);  
print(fig2);  
print(fig3);
```

BIBLIOGRAFIA

[1] Norma Oficial Mexicana NOM-001-SEDE-1999, Instalaciones Eléctricas (utilización).

[2] Análisis de Sistemas Eléctricos de Potencia. William D. Stevenson. Editorial McGraw Hill. Segunda edición, 1975

- [3] Apuntes del curso “Ingenieros de Protecciones Módulo III” Centro de Capacitación Sureste de la C. F. E. 2005.
- [4] Coordinación de Protecciones de Distribución C. F. E.
- [5] método simplificado para obtener la resistencia a tierra Y. L. Chow y M. M. A. Salama, universidad de Waterloo. Boletín IEEE 1994.
- [6] elementos de Diseño de Subestaciones Eléctricas (Pre-edición 1980). Gilberto Enriquez Harper.
- [7] Progress in Step and Voltaje Historial Perspective. Jiri George Sverak.. IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 3, July 1998. .