

01170

3

24

DESARROLLO DE PROGRAMAS EN COMPUTADORA
PERSONAL COMO AUXILIO DIDACTICO PARA
ANALISIS DE FLUJO DE CARGA Y
CORTO CIRCUITO

TESIS CON
FALLA DE ORIGEN

Mtría en Ingeniería Eléctrica

Pedro Celestino Rendón Torres

1991



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas Tesis Digitales Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS © PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

INDICE

	Página
Capitulo 1 INTRODUCCION.....	1
Capitulo 2 ESTUDIO DE CARGAS	
2.1 Estudio de Cargas con Computadora Personal.....	2
2.1.1 Consideraciones Preliminares.....	2
2.1.2 Tipos de Buses.....	3
2.1.3 Aplicación del Método de Gauss-Seidel Para el Cálculo del Flujo de Cargas.....	4
2.1.4 Buses de Voltaje Controlado.....	6
2.1.5 Ecuaciones de Flujo de Potencia en las Líneas.....	7
2.1.6 Diagrama de Flujo del Cálculo de Flujo de Cargas Utilizando el Método de Gauss-Seidel.....	8
Capitulo 3 PROGRAMAS PARA REALIZAR EL ESTUDIO DE CARGAS	
3.1 Sistema Para Realizar el Estudio de Cargas.....	10
3.2 Programa Para Capturar los Datos de la Red (SISPOTO1).....	10
3.3 Formación de la Matriz de Admitancia YBUS (SISPOTO2).....	21
3.4 Captura de los Datos de los Buses del Sistema (SISPOTO3).....	25
3.5 Cálculo de Voltajes por el Método de Gauss-Seidel (SISPOTO4).....	32
3.6 Cálculo de los Flujos de Energia Entre Líneas e Impresión de Voltajes en los Buses (SISPOTO5).....	33

Capítulo 4 ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO

4.1	Introducción.....	39
4.2	Conexión Entre las Redes de Secuencia.....	41
4.2.1	Corto Circuito Trifásico.....	41
4.2.2	Corto Circuito de Línea a Tierra.....	43
4.3	Ecuaciones Generales Para Estudio de Corto Circuito.....	46
4.3.1	Corto Circuito Trifásico.....	48
4.3.2	Corto Circuito de Línea a Tierra.....	51

Capítulo 5 PROGRAMAS PARA REALIZAR EL ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO

5.1	Sistema Para Realizar el Estudio de Corto Circuito.....	56
5.2	Captura de Datos Para Realizar Estudio de Corto Circuito (SISPOT06).....	56
5.3	Cálculo de la Matriz de Impedancia Nodal Zbus(SISPOT07).....	67
5.4	Programas Para el Estudio de Corto Circuito Trifásico.....	72
5.4.1	Programa que Realiza Cálculos Para Estudio de Corto Circuito Trifásico (SISPOT08).....	72
5.4.2	Programa que Lista Resultados Finales del Estudio de Corto Circuito trifásico (SISPOT09).....	77
5.5	Programas Para el Estudio de Corto Circuito de Línea a Tierra.....	79
5.5.1	Programa que Realiza Cálculos Para Estudio de Corto Circuito de Línea a Tierra (SISPOT10).....	79
5.5.2	Programa que Lista Resultados Finales del Estudio de Corto Circuito de Línea a Tierra (SISPOT11).....	85

Capítulo Uno

INTRODUCCION

El trabajo que aquí se presenta bajo el nombre " Desarrollo de Programas en Computadora Digital como Auxilio Didáctico para: Análisis de Flujo de Cargas y Corto Circuito "; escritos en lenguaje basic versión 3.2 para computadora digital (personal-MS-DOS en lo siguiente se le denominará computadora personal) , de los cuales los primeros cinco programas (SISPOT01 a SISPOT05) están enfocados para el análisis de flujo de cargas empleando el método de Gauss-Seidel. Mientras los restantes seis programas (SISPOT06 a SISPOT11) están dirigidos al estudio de corto circuito empleando la matriz de impedancia Z_{BUS} .

El propósito fundamental de este trabajo es que éste sirva como una asistencia o auxilio didáctico a las materias que se imparten en la maestría y/o especialidad en sistemas eléctricos de potencia.

El contenido de este trabajo descrito brevemente es el siguiente:

El análisis matemático del estudio de cargas se desarrolla en el capítulo dos; en este capítulo se menciona de una forma mas detallada en que consiste un estudio de cargas.

En el capítulo tres se describen los (5) programas elaborados para realizar el estudio de cargas; en este capítulo se señala la secuencia de ejecución de los programas para llevar a cabo el estudio de cargas con una computadora personal.

El otro análisis que se desarrolla en este trabajo es el de corto circuito. En el capítulo cuatro se hace el análisis matemático para un corto circuito trifásico y para un corto circuito de línea a tierra .El método que se utiliza para llevar a cabo el análisis de corto circuito utiliza la matriz de impedancia nodal Z_{BUS} . En el capítulo cinco, se describen y ejemplifican los (6) programas desarrollados para el estudio de corto circuito mediante una computadora personal.

Debe hacerse notar que los análisis desarrollados en este trabajo tienen algunas limitaciones y simplificaciones. Una de las limitaciones que se tiene, es por ejemplo, que el máximo número de elementos que puede constar el sistema es de 100, y el máximo número de buses del sistema es de 30.

Dentro de las simplificaciones hechas para realizar este trabajo, está la de considerar que no hay acoplamiento mutuo entre los elementos del sistema.

Otra de las simplificaciones es la de considerar en el análisis de corto circuito solo las reactancias del sistema . Esta consideración se hizo tomando en cuenta que las resistencias tienen valores muy bajos, y la diferencia entre la magnitud de la impedancia y su componente reactiva es pequeña. Debe señalarse también, que los programas fueron hechos para trabajar en valores por unidad y que todos los datos que se le proporcionen deberán estar referidos a la misma base de potencia.

Capítulo Dos

ESTUDIO DE CARGAS

Un estudio de cargas es la determinación de la tensión, corriente, potencia y factor de potencia en todos los puntos de un red eléctrica para determinadas condiciones de funcionamiento. El realizar un estudio de cargas permite conocer los puntos donde existe sobrecarga o se está en peligro de caer en sobrecarga o los puntos donde el nivel de carga es bajo.

Si el sistema eléctrico es de grandes proporciones en cuanto a los elementos que lo forman, la computadora digital es una herramienta indispensable para efectuar el análisis. En este trabajo se emplea una computadora personal.

2.1 Estudio de Carga con Computadora Personal

Las primeras consideraciones en el desarrollo de un programa en computadora personal aplicado a sistemas eléctricos de potencia son: (1) la formación de una descripción matemática del problema y (2) la aplicación de un método numérico para obtener la solución. El análisis del problema deberá también considerar la interrelación entre estos dos factores.

La formulación matemática de un estudio de cargas, da como resultado un sistema de ecuaciones no-lineales.

La solución de las ecuaciones algebraicas que describen el sistema eléctrico de potencia, esta basada en una técnica iterativa, esto es debido a su no-linealidad. La solución deberá satisfacer las leyes de Kirchhoff (la suma algebraica de todas las corrientes en un nodo o bus deberá ser igual a cero y la suma algebraica de todos los voltajes en una malla deberá ser igual a cero). Una u otra de estas leyes, es usada como una prueba para la convergencia de la solución en el método computacional iterativo.

Los métodos iterativos estan diseñados para calcular progresivamente estimaciones mas exactas del valor de las incógnitas, hasta alcanzar una exactitud aceptable en un número finito de iteraciones. Cuando esto es posible, la solución se dice que "converge". La idea fundamental con respecto a estos métodos es, que es posible escribir una expresión que nos indique como calcular las $k+1$ estimaciones a partir de la estimación k .

La solución del problema de flujo de potencia requiere técnicas iterativas, el método utilizado en este trabajo es el método de Gauss-Seidel.

2.1.1 Consideraciones Preliminares

Para poder realizar el análisis matemático de un estudio de cargas, es preciso hacer determinadas consideraciones con objeto de que el modelo matemático que se maneje sea lo más simple posible, aunque sin perder

precisión. La primera consideración importante, es la de suponer que el sistema opera en forma balanceada y por consiguiente, para hacer el estudio únicamente se manejará el circuito de secuencia positiva del sistema, otra consideración es que todos los parámetros de la red que forman el sistema, están expresados en la misma base de potencia.

2.1.2 Tipos de Buses

El desarrollo de un estudio de cargas empleando una computadora personal, requiere se consideren las características de cada tipo de bus, los que aquí se tratan están contenidos en la tabla 2.1.

TIPO DE BUS	CLAVE	DATOS	INCOGNITAS	NUMERO APROX.
Referencia	0	$V_1 = 1.00$ $\theta_1 = 0.00^\circ$	P_1 Q_1	1
Carga	1	P_1 Q_1	V_1 θ_1	85%
Generador	2	P_1 V_1	θ_1 Q_1	10%

Tabla 2.1 Tipos de Buses.

El primer tipo se conoce como bus de referencia, de balance u oscilante. Es básicamente un generador sin restricciones, su función es aportar la potencia real y reactiva necesaria para compensar las pérdidas por transmisión, debido a que estas son desconocidas hasta que se obtenga la solución final.

Como se recordará, en cualquier circuito de corriente alterna se puede elegir como referencia de fase una cantidad fasora, de acuerdo con esto, se fija el ángulo de fase en cero y el voltaje del bus de referencia en 1.00 en el sistema por unidad, asumiendo que todos los voltajes del sistema serán aproximadamente unitarios.

El voltaje en el bus de referencia esta dado entonces por:

$$V_r = 1.00 \angle 0^\circ \quad (2.1)$$

La clave para identificar a este bus de acuerdo con la tabla, es el número cero y únicamente existe uno en el sistema.

Físicamente el bus de referencia puede ser un bus generador o un bus de enlace (o sea, una línea de interconexión a otro sistema), por lo que P_1 y Q_1 pueden tener una amplia gama de valores.

El bus tipo uno identifica a cualquier bus para el que se conoce P_1 y Q_1 (potencia generada que fluye hacia el bus 1); esto incluye cualquier bus sin generación, ya que P_1 y Q_1 serian cero. Esta es la razón por la que a estos buses se les conoce como buses de "carga". Los buses tipo uno son los más comunes, ya que generalmente comprenden mas del 80% de todos los buses. En estos buses se deben obtener las incógnitas variables V_1 y θ_1 .

El bus tipo dos siempre tiene generación conectada, por consiguiente, se puede controlar tanto P_1 como V_1 , a esto se debe que se le llame bus generador o de voltaje controlado.

Las características de operación del generador, exigen que los valores P_1 y Q_1 no sobrepasen los valores máximos a que puede trabajar el generador. La restricción de P_1 es sencilla simplemente fijando $P_{1(\min)} \leq P_1 \leq P_{1(\max)}$.

En cambio establecer los límites de Q_1 no es tan directo (es una de nuestras incógnitas). Esto significa que cuando calculemos Q_1 deberemos comprobar si $Q_{1(\min)} \leq Q_1 \leq Q_{1(\max)}$. Si Q_1 no esta dentro de estos límites, lo fijamos en el límite apropiado ($Q_{1(\max)}$ si $Q_1 > Q_{1(\max)}$ y $Q_{1(\min)}$ si $Q_1 < Q_{1(\min)}$) y liberar nuestra restricción inicial de que esta fija V_1 . Es decir V_1 y Q_1 intercambian papeles como datos y como incógnitas. Esto cambia el tipo de bus de 2 a 1.

Continuamos comprobando Q_1 y, hasta que este dentro de los límites aceptables, permitimos que el bus sea nuevamente del tipo dos.

2.1.3 Aplicación del Método de Gauss-Seidel Para el Cálculo del Flujo de Cargas.

Para representar el sistema se utilizarán las ecuaciones de la red en forma de admitancia, como se recordará las ecuaciones para un sistema de "n" buses son:

$$\begin{aligned} I_1 &= Y_{11} E_1 + Y_{12} E_2 + Y_{13} E_3 + \dots + Y_{1n} E_n \\ I_2 &= Y_{21} E_1 + Y_{22} E_2 + Y_{23} E_3 + \dots + Y_{2n} E_n \\ I_3 &= Y_{31} E_1 + Y_{32} E_2 + Y_{33} E_3 + \dots + Y_{3n} E_n \\ &\dots \\ I_n &= Y_{n1} E_1 + Y_{n2} E_2 + Y_{n3} E_3 + \dots + Y_{nn} E_n \end{aligned} \tag{2.2}$$

A las admitancias $Y_{11}, Y_{22}, Y_{33}, \dots, Y_{nn}$ se les conoce como admitancias propias del bus correspondiente, siendo cada una de ellas igual a la suma de todas las admitancias que terminan en el bus indicado por los subíndices.

La ecuación de la red expresada en forma matricial es

$$I_{BUS} = Y_{BUS} E_{BUS} \quad (2.3)$$

El estudio de flujo de cargas se inicia asumiendo todos los voltajes en los buses, excepto en el bus de referencia, donde se especifica el voltaje y su valor se mantiene constante. Después, las corrientes son calculadas por todos los buses, excepto para el bus de referencia, designado por el subíndice "s".

De la ecuación de carga para el bus "p" :

$$P_p - jQ_p = E_p^* I_p \quad (2.4)$$

la corriente es

$$I_p = \frac{P_p - jQ_p}{E_p^*} \quad (2.5)$$

$$p = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$p \neq s$$

donde "n" es el número de buses de la red. Las condiciones de operación de la red pueden obtenerse de la Ec. (2.3).

Seleccionando el bus de tierra como el bus de referencia, un conjunto de "n-1" ecuaciones simultáneas pueden ser escritas en la forma:

$$E_p = \frac{1}{Y_{pp}} \left(I_p - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n Y_{pq} E_q \right) \quad (2.6)$$

$$p = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$p \neq s$$

Las corrientes de bus calculadas con la Ec. (2.5), el voltaje en el bus de referencia y los voltajes estimados de los demás buses, son substituidos en la Ec. (2.6) para de este modo obtener un nuevo conjunto de voltajes en los buses. Esos nuevos voltajes son usados en la Ec. (2.5) para volver a calcular las corrientes en los buses, y obtener una solución subsecuente de la Ec. (2.6). El proceso continua hasta que los cambios en los voltajes de los buses sean despreciables. Después de que los voltajes han sido obtenidos es posible calcular la potencia en el bus de referencia y los flujos en las líneas.

La ecuación (2.6) de la red y la ecuación de carga (2.5) pueden ser combinadas para obtener ;

$$E_p = \frac{1}{Y_{pp}} \left(\frac{P_p - jQ_p}{E_p^*} - \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n Y_{pq} E_q \right) \quad (2.7)$$

$$p = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$p \neq s$$

la que queda en función de los voltajes en los buses. Como anteriormente se había mencionado, el problema de flujo de potencia, queda formulado matemáticamente como un conjunto de ecuaciones no-lineales, que puede ser resuelto por un método iterativo.

El proceso normal para un estudio de flujo de cargas, es asumir un sistema balanceado y usar una representación monofásica equivalente a la red de secuencia positiva.

Como se ha supuesto que no hay acoplamiento mutuo, la matriz de admitancia se puede formar por inspección y muchos de sus elementos serán cero.

2.1.4 Buses de Voltaje Controlado

Para tomar en cuenta los buses de voltaje controlado es necesario modificar los pasos hasta ahora considerados.

Cuando se utiliza el método de Gauss-Seidel para calcular los voltajes en el sistema y el tipo de bus es de voltaje controlado. Antes de calcular el voltaje en este bus, se debe calcular su potencia reactiva.

Separando las componentes real e imaginaria de la ecuación de potencia en el bus, se tiene

$$P_p - jQ_p = E_p^* \sum_{q=1}^n Y_{pq} E_q \quad (2.8)$$

la potencia reactiva del bus está dada por

$$Q_p = e_p^2 B_{pp} + f_p^2 B_{pp} + \sum_{\substack{q=1 \\ q \neq p}}^n [f_p (e_p G_{pq} + f_p B_{pq}) - e_p (f_p G_{pq} - e_p B_{pq})] \quad (2.9)$$

donde e_p y f_p son las componentes real e imaginario del voltaje en el bus "p"

$$\text{y } Y_{pq} = G_{pq} - jB_{pq}$$

Los valores e_p y f_p deben satisfacer la relación

$$e_p^2 + f_p^2 = (|E_p|_{(\text{especificado})})^2 \quad (2.10)$$

Para poder calcular la potencia reactiva requerida para obtener el voltaje especificado. Las estimaciones e_p^k y f_p^k deberán ajustarse de tal modo que satisfagan la Ec. (2.12).

El ángulo de fase del voltaje en el bus estimado es

$$\delta_p^k = \arctan \left(\frac{f_p^k}{e_p^k} \right) \quad (2.11)$$

Asumiendo que los ángulos de fase de los voltajes estimados y especificados son iguales, el ajuste estimado para e_p^k y f_p^k son

$$e_{p(nueva)}^k = E_{p(especificado)} \cos \delta_p^k \quad (2.12)$$

$$f_{p(nueva)}^k = E_{p(especificado)} \sen \delta_p^k \quad (2.13)$$

Sustituyendo $e_{p(nueva)}^k$ y $f_{p(nueva)}^k$ en la Ec. (2.9) se obtiene la potencia reactiva, y este dato es utilizado junto con $E_{p(nueva)}^k$ para calcular una nueva estimación del voltaje E_p^{k+1} . En este tipo de bus como se recordará, deben de tomarse en cuenta los límites de potencia entre los que puede trabajar el generador.

Si el voltaje obtenido Q_p^k excede la capacidad máxima de la fuente $Q_{p(max)}$, entonces se toma como potencia reactiva para ese bus el valor máximo. Si el valor obtenido es menor que la capacidad mínima $Q_{p(min)}$, se utiliza el valor mínimo. Si no se hace lo anterior, es imposible obtener una solución acorde con el voltaje especificado y por consiguiente, $E_{p(nueva)}^k$ no puede ser usado para calcular E_p^{k+1} .

2.1.5 Ecuaciones de Flujo de Potencia en las Líneas.

Después de que la solución iterativa de los voltajes es obtenida los flujos de potencia en las líneas pueden ser calculados. La corriente en la línea que conecta el bus "p" con el bus "q" es;

$$i_{pq} = (E_p - E_q) y_{pq} + \frac{E_p y'_{pq}}{2} \quad (2.14)$$

donde:

y_{pq} = admitancia de la línea

y'_{qp} = admitancia total de carga en la línea

$$\frac{E_p y'_{qp}}{2} = \text{contribución de corriente en el bus "p"} \\ \text{debida a la carga de la línea}$$

El flujo de potencia real y reactiva es

$$P_{pq} - jQ_{pq} = E_p^* i_{pq} \quad (2.15)$$

$$P_{pq} - jQ_{pq} = E_p^* (E_p - E_q) y_{pq} + E_p^* \frac{E_p y'_{pq}}{2} \quad (2.16)$$

donde el flujo de potencia real del bus "p" al bus "q" es P_{pq} y la reactiva es Q_{pq} . Similarmente en el bus "q" el flujo de potencia de "q" a "p"

$$P_{qp} - jQ_{qp} = E_q^* (E_q - E_p) y_{qp} + E_q^* \frac{E_q y'_{qp}}{2} \quad (2.17)$$

La pérdida de potencia en la línea p-q es la suma algebraica de los flujos de potencia determinados en las ecs. (2.16) y (2.17).

2.1.6 Diagrama de Flujo del Cálculo de Flujo de Cargas por el Método de Gauss-Seidel

En el diagrama de flujo mostrado en la figura 2.1, se observan todos los pasos necesarios para llevar a cabo el estudio de flujo de carga por computadora personal, así como su secuencia de ejecución.

Este diagrama es de suma importancia para la comprensión de este trabajo, ya que es la base para desarrollar los programas que se explican en el siguiente capítulo.

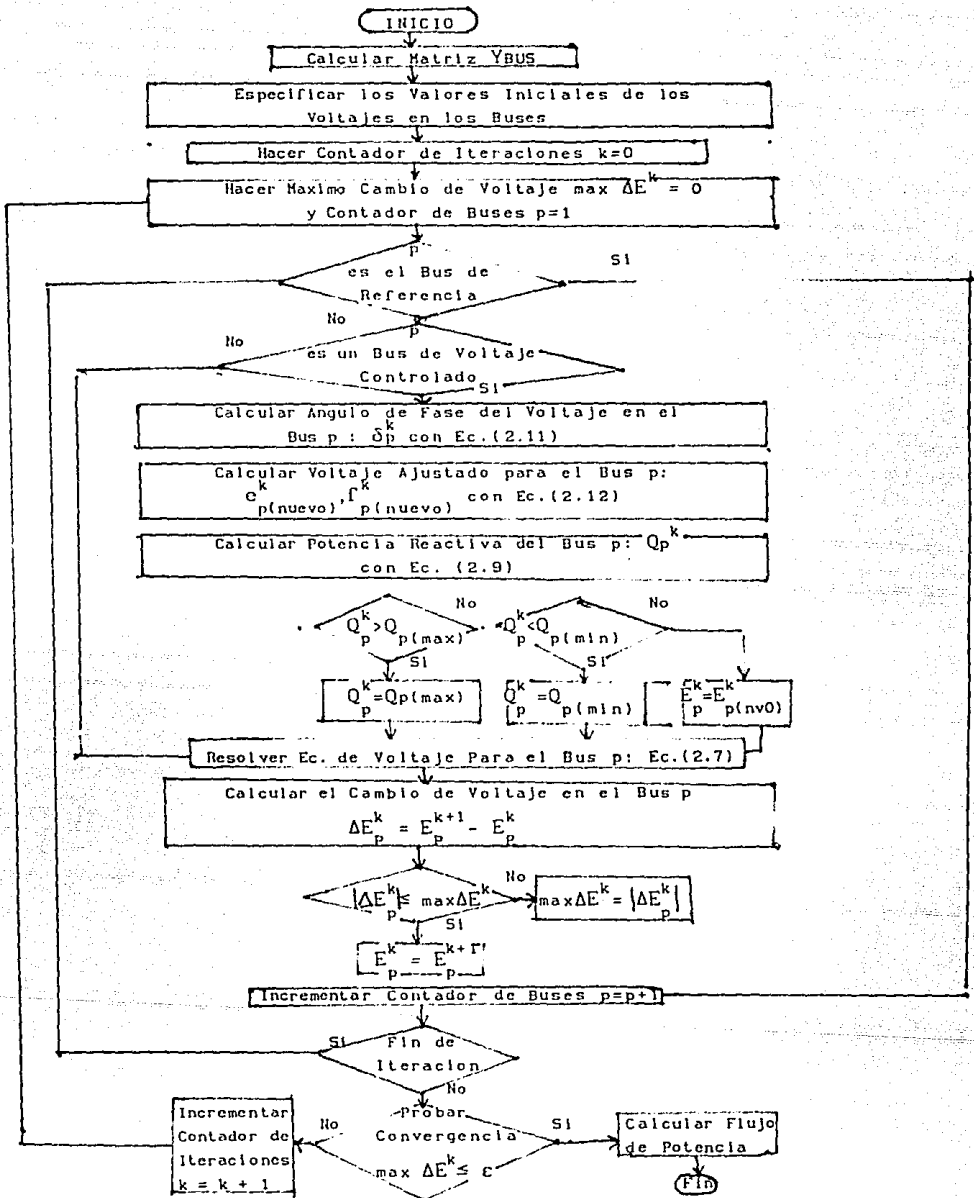


Figura 2.1 Diagrama de Flujo del Calculo de Flujo de Carga Utilizando el Metodo de Gauss-Seidel

Capítulo Tres

PROGRAMAS PARA REALIZAR EL ESTUDIO DE CARGAS

3.1 Sistema Para Realizar el Estudio de Cargas

En este capítulo se desarrollan los programas necesarios para llevar a cabo un estudio de cargas en sistemas eléctricos de potencia. Todos los programas fueron desarrollados en base a los conceptos y ecuaciones planteadas en el capítulo dos, por tanto, en las explicaciones que se den de cada programa se hará referencia continuamente a este capítulo.

El inicio de la secuencia de ejecución de los programas se se empieza tecleando BASIC /F:16, esta secuencia es mostrada en la figura 3.1, cada etapa del proceso se simboliza con un rectángulo y en la parte superior de cada uno de estos se señala el programa que corresponde a esa etapa.

En el diagrama mostrado en la figura 3.1 puede observarse que las tres etapas corresponden a la entrada de datos necesarios para realizar el estudio, estos datos de entrada son las admitancias de los elementos del sistema (programa SISPOT01); a partir de los que se obtiene la matriz de admitancia nodal Y_{BUS} (programa SISPOT02) y los datos de los buses del sistema (programa SISPOT03). La cuarta y quinta etapa del estudio es la realización de los cálculos para obtener los voltajes en los buses (programa SISPOT04) y los flujos de energía (SISPOT05), en esta quinta etapa se imprimen los resultados del estudio.

3.2 Programa Para Capturar los Datos de la Red (SISPOT01)

Por medio de este programa se capturan los datos de la red eléctrica que forma el sistema. Los datos que se accesan con este programa son los valores de las admitancias de todos los elementos del sistema, así como las admitancias en derivación a tierra de cada elemento. Este programa permite también introducir los valores de las admitancias a tierra de cada bus.

Para un mejor entendimiento del programa y de su operación, así como la forma de preparar los datos a partir del diagrama unifilar del sistema, se realiza la explicación del programa por medio de un ejemplo.

Considere el sistema mostrado en la figura 3.2, el primer paso es numerar todos los elementos y los buses del sistema. En la tabla 3.1 se muestra la numeración para el sistema del ejemplo, observese que para asignar la numeración no se siguió ningún orden particular, y que únicamente se tomo en cuenta a los elementos conectados entre dos buses (los generadores no se conectaron como elementos).

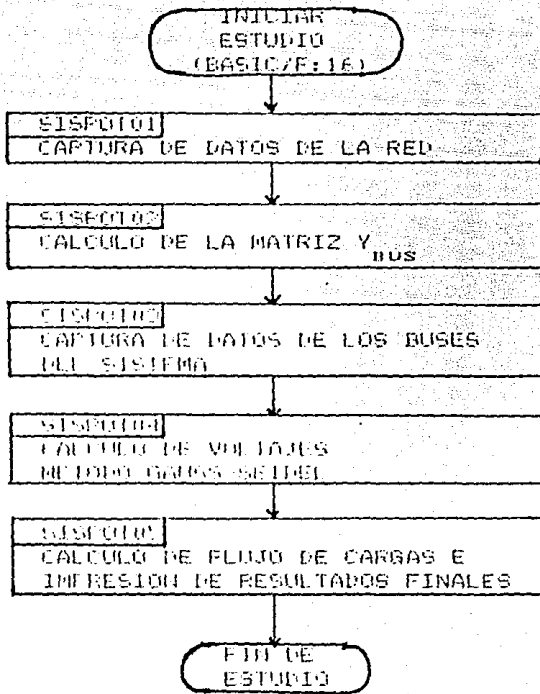


Figura 3.1 Proceso para Realizar Estudio de Cargas

Una vez numerado cada elemento, se procede a especificar los datos de cada uno, estos datos incluyen los buses entre los que esta conectado cada elemento, el valor de la admitancia del elemento y la admitancia en derivación. Si en el diagrama unifilar se da como dato el valor de la impedancia debe hacerse la transformación a la forma admitancia; que es la forma con la que trabaja el proceso de cálculo, estos datos se resumen en la tabla 3.II.

Por medio de este programa también se pueden introducir los valores de las admitancias a tierra de los buses del sistema, el formato que se le daría estos datos es el mostrado en la tabla 3.III.

Después de preparar los datos tal como se señala en las tablas 3.II y 3.III, se esta en la posibilidad de introducirlos a la computadora, debe notarse que todos los valores de las admitancias esten en valores por unidad.

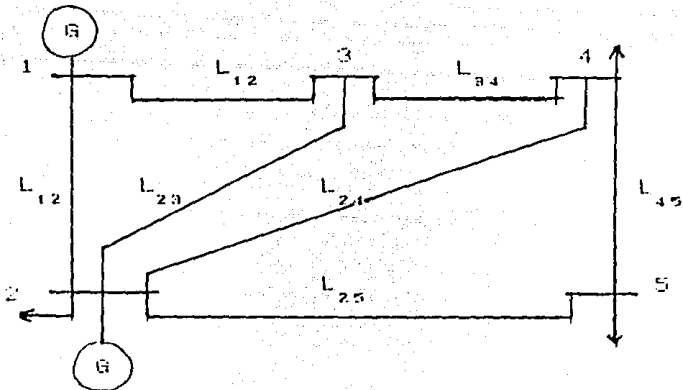


Figura 3.2 Diagrama Unifilar del Sistema de Ejemplo.

Para iniciar la ejecución del programa de captura de datos se teclea lo siguiente:

RUN "SISPOT01"

ELEMENTO NUMERO	NOMENCLATURA EN DIAGRAMA
1	L_{12}
2	L_{13}
3	L_{23}
4	L_{24}
5	L_{25}
6	L_{34}
7	L_{45}

Tabla 3.1 Numeración de Elementos

ELEMENTO NUMERO	NODO P	NODO Q	ADMITANCIA DE LINEA		ADMITANCIA DERIVADA	
			G	B	G	B
1	1	2	5.000	-15.000	0.000	0.030
2	1	3	1.250	3.750	0.000	0.025
3	2	3	1.666	5.000	0.000	0.020
4	2	4	1.666	5.000	0.000	0.020
5	2	5	2.500	7.500	0.000	0.015
6	3	4	10.000	-30.000	0.000	0.010
7	4	5	1.250	3.750	0.000	0.025

Tabla 3.II Datos de los Elementos de la Red

No BUS P	ADMITANCIA (Y_p)	
	G	B
1	0.000	0.055
2	0.000	0.085
3	0.000	0.055
4	0.000	0.055
5	0.000	0.040

Tabla 3.III Admitancias a tierra de los Buses

Esto hará que aparezca en al pantalla el siguiente mensaje :

PROGRAMA QUE CAPTURA DATOS
NECESARIOS PARA REALIZAR UN ESTUDIO
DE CARGAS

CONTINUAMOS ?

para continuar con la secuencia de este programa se debe teclear: SI (o con cualquier tecla, simplemente presionando la tecla return).

Los siguientes datos que pide el programa son los datos característicos del sistema eléctrico de potencia tales como :

NUMERO DE ELEMENTOS DEL SISTEMA ?
ELEMENTOS >= 100 OK?

Aqui se especifica la cantidad de elementos de que consta el sistema

recordando que no debe rebasar la cantidad de 100 elementos (elementos \geq 100 OK) y que se cuenta como elemento del sistema a aquel que esta conectado entre dos buses, para el caso de este sistema eléctrico de potencia que se toma como ejemplo el número de elementos es 7.

Otro dato característico del sistema es el número de buses del sistema, por consiguiente cuando aparezca en pantalla el mensaje siguiente :

NUMERO DE BUSES DEL SISTEMA ?
BUSES \geq 30 OK ?

debe ahora introducirse el número de buses de que consta el sistema recordando no sobrepasarse de 30 (BUSES \geq 30), en este caso son 5 .

Este programa requiere también que se le de la potencia base del sistema para fines de presentación al momento de imprimir la tabulación de los datos, por lo que enseguida se desplegará los siguientes mensajes :

BASE DEL SISTEMA POR UNIDAD :
POTENCIA BASE EN MVA?

tecleándose en esta parte el valor de la potencia base en MVA.

Por medio del programa SISPOT01 es posible introducir datos nuevos o corregir datos accedados previamente en forma errónea por tanto, en este punto el programa pregunta que es lo que se va a realizar

*DESEA :
0. NUEVO INICIO.
1. CAPTURAR DATOS.
2. CAMBIAR DATOS.
0, 1 o 2 ?

Si hubo algun error cometido durante la etapa inicial esto es, al introducir los datos (característicos) de la base del sistema, podemos regresar simplemente tecleando el número 0 (0. NUEVO INICIO), de lo contrario, continuamos con el procedimiento de captura de datos tecleando el número 1 (que corresponde a la alternativa de captura de datos)

Sin embargo, el programa permite introducir tanto las admitancias de la red como las admitancias a tierra de cada bus. Aquí debe decidirse que admitancia se va a capturar.

QUE DATOS DESEA PROCESAR :

0. REGRESAMOS A *DESEA
1. ADMITANCIAS DE LA RED
2. ADMITANCIAS A TIERRA.

La opción 0 permite la corrección de algun error cometido en el nivel anterior, supongase la siguiente situación ; si en lugar de querer capturar (cambiar) datos, lo que significa que se escogió la alternativa 1 (2) y en realidad se queria cambiar (capturar) datos, es decir, se debería haber escogido la alternativa 2 (1), por tanto, con la alternativa cero en esta etapa regresa a la anterior pregunta.

Continuando con el proceso de captura de datos, se quiere capturar las admitancias de la red por lo que se debe teclear el número 1. Enseguida

aparecerá la pantalla de captura de admitancias de la red, esta pantalla llene el aspecto mostrado en la figura 3.3.

Si se observa esta pantalla se notará que los datos que se accesan son los especificados en la tabla 3.II. La pantalla de captura se mostrará para cada elemento, para el caso del ejemplo que nos ocupa se desplegarán siete pantallas, que son las siete entradas de la tabla 3.II.

Una vez que se han intoducido todos los datos de la tabla 3.III, el programa procede a almacenar los datos en el archivo YRED y enseguida pregunta la fecha para imprimir los datos accesados, con el propósito de verificar que los datos fueron introducidos correctamente, la lista para el caso del ejemplo se muestra en la figura 3.5.

Después de listar los datos accesados aparecerá nuevamente en pantalla el siguiente mensaje :

PROGRAMA QUE CAPTURA DATOS
NECESARIOS PARA REALIZAR UN ESTUDIO
DE CARGAS.

CONTINUAMOS ?
SI o NO?

Si ya no se desea acceder ni cambiar (o corregir) datos se responde NO para terminar.

En el caso de que en el proceso de captura se cometan errores en el acceso de datos, es posible corregirlos, para hacer esto lo que se debe hacer es contestar con el número 2 cuando aparezcan las opciones de capturar o cambia, es decir, cuando aparezca :

*DESEA
0. NUEVO INICIO
1. CAPTURAR DATOS
2. CAMBIAR DATOS

Como se pueden corregir dos tipos de datos, aquí debe decidirse que datos se van a corregir, para hacerlo se debe contestar a las opciones de :

QUE DATOS DESEA PROCESAR :
0. REGRESAMOS A *DESEA
1. ADMITANCIAS DE LA RED
2. ADMITANCIAS A TIERRA

Como se esta trabajando con las admitancias de la red se le da con el número 1. Ahora el programa nos pedirá el número del elemento cuyos datos deseamos corregir, esto se hace cuando aparece en la pantalla :

NUMERO DEL ELEMENTO CUYOS DATOS DESEA
CAMBIAR ? (0 = NO CAMBIO)

Debiendo teclarse el número asignado al elemento a corregir. Ahora aparecerá nuevamente la pantalla de captura mostrada en al figura 3.3. Procediendose enseguida a introducir los datos correctos.

Una vez accesados los datos del elemento corregido aparecerá en pantalla nuevamente el mensaje :

ESTUDIO DE CARGAS

CAPTURA DE ELEMENTOS DE LA RED

ELEMENTO XX	
NODO DE SALIDA (P) XX	NODO DE LLEGADA (Q) XX
ADMITANCIA	
REAL XXXX	IMAGINARIA XXXX
ADMITANCIA DERIVADA	
REAL XXXX	IMAGINARIA XXXX

Figura 3.3 Pantalla de Captura de Elementos

NUMERO DEL ELEMENTO CUYOS DATOS DESEA
CAMBIAR ? (0 = NO CAMBIO)

Dandosele otra vez el número del elemento a corregir si lo hubiera o de otro modo 0 para terminar el proceso de cambio.

Finalizada la tarea de cambiar datos, el programa registra los nuevos datos en el archivo YRED y obtiene una impresión en papel igual al obtenido en el proceso de captura, en este listado deben encontrarse ya los cambios hechos es decir limpio de errores.

Para acceder los valores de las admitancias a tierra se procede en similar forma a lo ya explicado para las admitancias de la red, solo que cuando aparezca el siguiente mensaje :

QUE DATOS DESEA PROCESAR :

- 0. REGRESAMOS A *DESEA
- 1. ADMITANCIAS DE LA RED
- 2. ADMITANCIAS A TIERRA

Se debe responder con la alternativa número 2. Es recomendable que los datos se preparen en el formato dado en la tabla 3.III. La pantalla de captura para las admitancias se muestra en la figura 3.4 y el listado de los datos de salida en la figura 3.6. Los datos son almacenados en el archivo YTIERRA.

Para cambiar datos se sigue el mismo proceso explicado para el cambio de admitancias de la red.

En la figura 3.7 se muestra el diagrama de flujo del programa SISPOT01.

ESTUDIO DE CARGAS

CAPTURA DE ELEMENTOS DE LA RED

BUS
XX

ADMITANCIA

REAL
XXXX

IMAGINARIA
XXXX

Figura 3.4 Pantalla de Captura para Admitancias a Tierra.

PERIODO DE CARGAS EN SISTEMAS DE POTENCIA

ADMITANCIAS DE LOS SISTEMAS

ELEMENTO CÓDIGO	NÚMERO SISTEMA	NÚMERO CLASIFICACION	ADMITANCIAS		ADMITANCIAS REALES	
			P. REAL	P. REACTIVA	P. REAL	P. REACTIVA
1	1	3	0.000000	-0.000000	0.000000	0.000000
2	1	3	1.100000	-0.000000	0.000000	0.000000
3	2	3	1.000000	-0.000000	0.000000	0.000000
4	2	4	1.000000	-0.000000	0.000000	0.000000
5	3	5	2.000000	-7.000000	0.000000	0.000000
6	3	4	10.000000	-0.000000	0.000000	0.000000
7	4	5	1.000000	-0.000000	0.000000	0.000000

Figura 3.5 Listado de los Datos (Admitancias) de la Tabla 3.II Capturados por el Programa SISPO101.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

Página 1

DEPARTAMENTO DE FÍSICA

LABORATORIO DE FÍSICA

SECCIÓN DE TRABAJO EN EXPERIMENTOS DE FÍSICA

ADMITANCIAS A TIERRA

NÚMERO DE BUS	F. FREQ.	F. RESONANCIA
1	0.02000	0.02000
2	0.02000	0.02000
3	0.02000	0.02000
4	0.02000	0.02000
5	0.02000	0.02000

Figura 3.6 Listado de los Datos (Admitancias a Tierra) de la Tabla 3.III Capturados por SISPOT01.

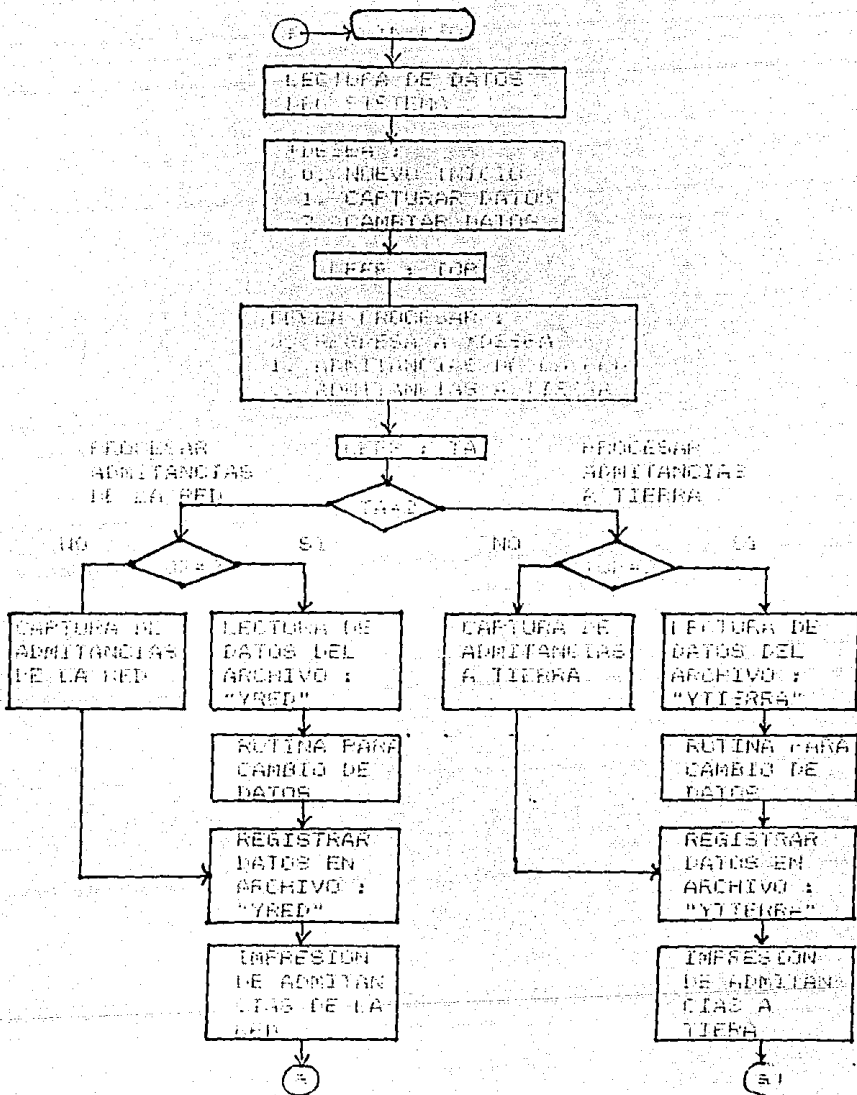


Figura 3.7 Diagrama de Flujo del Programa SISPOT01

3.3 Formación de la Matriz de .. Admitancia Y_{BUS} (SISPOT02)

El siguiente paso del estudio de cargas es la formación de la matriz de admitancia nodal Y_{BUS} , esta matriz se obtiene a partir del diagrama unifilar del sistema eléctrico de potencia, el método que se va a utilizar en el presente estudio es el método de inspección, la formación de este proceso de cálculo esta basada en la ley de Kirchhoff de corrientes, como se recordará la aplicación de esta ley da como resultado un sistema de ecuaciones de la forma :

$$\begin{aligned}
 I_1 &= Y_{11} V_1 + Y_{12} V_2 + Y_{13} V_3 + \dots + Y_{1n} V_n \\
 I_2 &= Y_{21} V_1 + Y_{22} V_2 + Y_{23} V_3 + \dots + Y_{2n} V_n \\
 I_3 &= Y_{31} V_1 + Y_{32} V_2 + Y_{33} V_3 + \dots + Y_{3n} V_n \\
 &\vdots \\
 &\vdots \\
 I_n &= Y_{n1} V_1 + Y_{n2} V_2 + Y_{n3} V_3 + \dots + Y_{nn} V_n
 \end{aligned} \tag{3.1}$$

Donde "n" es el número de nodos o buses de la red.

Las admitancias $Y_{11}, Y_{22}, Y_{33}, \dots, Y_{nn}$ se conocen como las admitancias propias, y cada una es igual a la suma de las admitancias de los elementos conectados a un determinado nodo.

$$Y_{11} = \text{suma de las admitancias conectadas a el nodo } i$$

Las otras admitancias que aparecen en el sistema de ecuaciones se conocen como admitancias de transferencia entre los nodos k y n .

$$Y_{kn} = -(\text{suma de las admitancias conectadas entre los nodos k y n}) \quad k \neq n$$

El sistema de ecuaciones obtenido a partir de la ley de las corriente de Kirchhoff se puede escribir como :

$$\begin{aligned}
 I_1 & \quad Y_{11} \quad Y_{12} \quad Y_{13} \quad \dots \quad Y_{1n} \quad V_1 \\
 I_2 & \quad Y_{21} \quad Y_{22} \quad Y_{23} \quad \dots \quad Y_{2n} \quad V_2 \\
 I_3 & = \quad Y_{31} \quad Y_{32} \quad Y_{33} \quad \dots \quad Y_{3n} \quad V_3 \\
 & \quad \vdots \\
 & \quad \vdots \\
 I_n & \quad Y_{n1} \quad Y_{n2} \quad Y_{n3} \quad \dots \quad Y_{nn} \quad V_n
 \end{aligned} \tag{3.2}$$

que es conocida como la ecuación nodal o de bus y que se escribe como :

$$I_{BUS} = Y_{BUS} V_{BUS} \quad (3.3)$$

siendo Y_{BUS} la matriz de admitancias nodales. A este procedimiento de formación de la matriz Y_{BUS} se le conoce comunmente como formación por inspección de la red.

Este método es bastante simple y se presta para una fácil comprensión del mismo y de su aplicación en un programa de computadora, consiste en ir agregando elemento por elemento de la red de la matriz de admitancias, el proceso se puede decir que consta de dos etapas :

- 1). Se inicia con un arreglo de Y_{BUS} lleno de ceros.
- 2). Se considera cada elemento de admitancia "y" conectado entre los nodos i-j y entonces se modifican cuatro elementos de la matriz Y_{BUS} ; Y_{ii} , Y_{ij} , Y_{ji} , Y_{jj} de acuerdo con las siguientes expresiones.

$$Y_{ii\text{nueva}} = Y_{ii\text{vieja}} + y \quad (3.4)$$

$$Y_{ij\text{nueva}} = Y_{ij\text{vieja}} - y \quad (3.5)$$

$$Y_{ji\text{nueva}} = Y_{ji\text{vieja}} - y \quad (3.6)$$

$$Y_{jj\text{nueva}} = Y_{jj\text{vieja}} + y \quad (3.7)$$

La matriz Y_{BUS} se modifica cuando cada elemento se agrega y cuando el elemento esta conectado entre el nodo de referencia y el nodo i (admitancias conectadas a tierra) solo se modifica Y_{ii} .

Para iniciar la ejecución del programa SISPOT02 se teclea :

```
RUN "SISPOT02"
```

Apareciendo en pantalla :

```
PROGRAMA QUE CALCULA LA MATRIZ
DE ADMITANCIA NODAL "YBUS"
CONTINUAMOS ?
SI o NO?
```

Para calcular la matriz Y_{BUS} se debe responder SI (o cualquier tecla posteriormente return). A continuación el programa pregunta los datos que caracterizan al sistema en estudio, estos datos son :

```
NUMERO DE ELEMENTOS DEL SISTEMA ?
NUMERO DE BUSES DEL SISTEMA ?
POTENCIA BASE EN MVA ?
```

Estos datos deberán ser exactamente los mismos que se dieron en el programa SISPOT01. Una vez introducidos los datos anteriores, se realiza la lectura de los datos que fueron accedados por el programa SISPOT01, estos datos son : los valores de las admitancias del sistema a partir del archivo YRED y los valores de las admitancias a tierra del archivo YTIERRA.

Después de leer estos datos se realiza el cálculo de la matriz Y_{BUS} , para realizar este cálculo no se hace mas que aplicar las Ecs. (3.4) a (3.7) .

Calculada la matriz Y_{BUS} , el siguiente paso es almacenarla en los archivos YBUSR para la parte real y en el archizo YBUSI para la parte imaginaria.

Finalmente se imprime la matriz Y_{BUS} . En la figura 3.9 se muestra el listado obtenido por el programa SISPOT02 para el sistema del ejemplo. El diagrama de flujo del programa SISPOT02 se indica en la figura 3.10.

D E P E I

INSTRUMENTOS:
 04/03/2004

ESTUDIO DE CAPAS EN SISTEMAS DE POTENCIA

M A T R I Z Y B U S

RENGLÓN 1

YRe(1 , 1) = 6.25	YIm(1 , 1) = -16.695
YRe(1 , 2) = -5	YIm(1 , 2) = 15
YRe(1 , 3) = -1.25	YIm(1 , 3) = 3.75
YRe(1 , 4) = 0	YIm(1 , 4) = 0
YRe(1 , 5) = 0	YIm(1 , 5) = 0

RENGLÓN 2

YRe(2 , 1) = -5	YIm(2 , 1) = 15
YRe(2 , 2) = 10.832	YIm(2 , 2) = -32.415
YRe(2 , 3) = -1.666	YIm(2 , 3) = 5
YRe(2 , 4) = -1.666	YIm(2 , 4) = 5
YRe(2 , 5) = -2.5	YIm(2 , 5) = 7.5

RENGLÓN 3

YRe(3 , 1) = -1.25	YIm(3 , 1) = 3.75
YRe(3 , 2) = -1.666	YIm(3 , 2) = 5
YRe(3 , 3) = 12.916	YIm(3 , 3) = -38.695
YRe(3 , 4) = -10	YIm(3 , 4) = 30
YRe(3 , 5) = 0	YIm(3 , 5) = 0

RENGLÓN 4

YRe(4 , 1) = 0	YIm(4 , 1) = 0
YRe(4 , 2) = -1.666	YIm(4 , 2) = 5
YRe(4 , 3) = -10	YIm(4 , 3) = 30
YRe(4 , 4) = 12.916	YIm(4 , 4) = -38.695
YRe(4 , 5) = -1.25	YIm(4 , 5) = 3.75

RENGLÓN 5

YRe(5 , 1) = 0	YIm(5 , 1) = 0
YRe(5 , 2) = -2.5	YIm(5 , 2) = 7.5
YRe(5 , 3) = 0	YIm(5 , 3) = 0
YRe(5 , 4) = -1.25	YIm(5 , 4) = 3.75
YRe(5 , 5) = 3.75	YIm(5 , 5) = -11.21

Figura 3.9 Listado de la Matriz Y_{BUS} Obtenida de SISPT02.

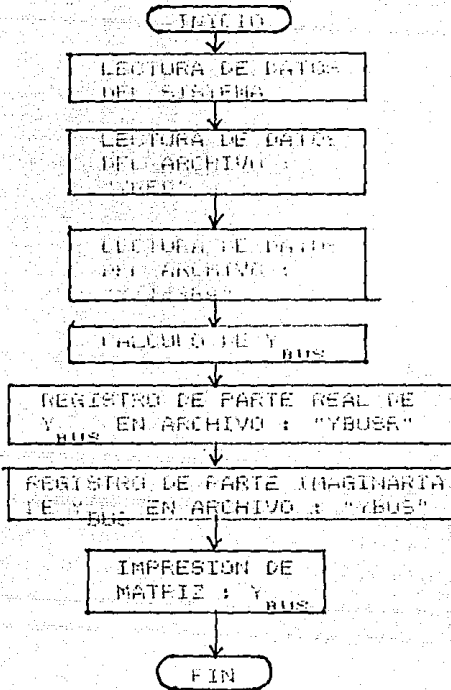


Figura 3.10 Diagrama de Flujo del Programa SISPOT02

3.4 Captura de Datos de los Buses del Sistema (SISPOT03)

La etapa siguiente en el desarrollo del estudio de cargas es la captura de los datos que caracterizan a cada bus del sistema.

Es recomendable preparar los datos de los buses en un formato como el que se muestra en la tabla 3.IV para el sistema del ejemplo se tiene :

Para diferenciar entre los diversos tipos de buses se utilizan las claves numéricas que se indicaron en la tabla 2.II.

Observese como los datos que caracterizan a cada bus varían dependiendo del tipo. Una vez que se tienen los datos como se muestra en la tabla 3.IV, se puede iniciar su introducción a la computadora por medio del programa SISPOT03.

No.	Clave	Voltaje	Potencia		Pot. React.			
			Real	Imag.	Max	Min		
1	Ref.	0	1.06	0	-	-	-	-
2	Carga	1	1	0	0.20	0.20	-	-
3	Carga	1	1	0	-0.45	-0.15	-	-
4	Carga	1	1	0	-0.40	-0.05	-	-
5	Carga	1	1	0	-0.60	-0.10	-	-

tabla 3.IV Datos de los Buses Para el Sistema de Ejemplo

Para iniciar la ejecución del programa se teclea :

RUN "SISPOT03"

Enseguida aparecerá en pantalla el siguiente mensaje :

PROGRAMA QUE CAPTURA DATOS DE LOS
BUSES DEL SISTEMA

CONTINUAMAOS ?
SI o NO ?

Clave Tipo de Bus

- 0 Bus de Referencia
- 1 Bus de Carga
- 2 Bus de Voltaje Controlado

Tabla 3.V Claves Para Identificar los Tipos de Buses.

para acceder la información de los buses debe responderse que SI.

El programa requerirá ahora los datos característicos del sistema :

NUMERO DE ELEMENTOS DEL SISTEMA ?
ELEMENTOS <= 100 ok ?
POTENCIA BASE EN MVA ?

Los datos que se proporcionen en este punto deberán corresponder con los datos al programa SISPOT01. Este programa al igual que el programa SISPOT01 permite capturar y corregir datos. Para decidir cual de las dos tareas se va a desarrollar se deberá contestar con alguna de las opciones señaladas por el siguiente mensaje :

DESEA :

1. CAPTURAR DATOS
2. CAMBIAR DATOS

Si se escoge la opción de capturar datos, el programa desplegará la pantalla de captura, el aspecto de esta pantalla se muestra en al figura 3.11.

ESTUDIO DE CARGAS

CAPTURA DE DATOS DE LOS BUSES

TIPO 0 = REF.

TIPO 1 = CARGA

TIPO 2 = V. CTRL.

BUS

XX

TIPO

X

Figura 3.11 Pantalla de Captura de Datos de los Buses.

Como los datos que caracterizan a cada bus varían, dependiendo del tipo, los posibles aspectos de la pantalla de captura son los mostrados en las figuras 3.12, 3.13 y 3.14.

Entonces, dependiendo del tipo de bus que se introduzca aparecerá la pantalla correspondiente. Accesados los datos de un bus aparecerá automáticamente la pantalla de captura para el siguiente bus. Desplegándose una pantalla para cada bus.

Terminada la fase de acceso de datos, los datos capturados son almacenados en el archivo DATABUS. Después de almacenar los datos en el archivo DATABUS, se obtiene una impresión de la información capturada, el listado obtenido para el sistema del ejemplo se muestra en la figura 3.15.

Si después de capturar los datos de los buses, se encuentra que existen errores de acceso, es posible corregirlos utilizando la opción para corregir del programa SISPOTO3. Para hacerlo se sigue el mismo proceso descrito para la captura de datos, únicamente que cuando aparezca el mensaje :

ESTUDIO DE CARGAS
CAPTURA DE DATOS DE LOS BUSES
TIPO 0 = REF.
TIPO 1 = CARGA
TIPO 2 = V. CTRL.

BUS
XX

TIPO
0

VOLTAJE

REAL
XXXX

IMAGINARIO
XXXX

Figura 3.12 Pantalla de Captura Para el Bus de Referencia.

DESEA :
1. CAPTURAR DATOS
2. CAMBIAR DATOS

Se deberá contestar con el número de alternativa 2. Después de este paso, el programa hace la lectura de los datos que se encuentran actualmente en el archivo DATABUS y pide el número del bus que se desea corregir, es decir aparece el mensaje :

NO. DE BUS CUYOS DATOS DESEA CAMBIAR ?
(0 = NO CAMBIO)?

Respondiendo con el número del bus cuyos datos se van a cambiar. Enseguida aparecerá la pantalla de captura que tendrá el aspecto de una de las figuras 3.12, 3.13, 3.14, después de introducir los datos del bus nuevamente aparecerá el mensaje :

ESTUDIO DE CARGAS

CAPTURA DE DATOS DE LOS BUSES

TIPO 0 = REF.
TIPO 1 = CARGA
TIPO 2 = V. CTRL.

BUS
XX

TIPO
1

VOLTAJE

REAL IMAGINARIO
XXXX XXXX

POTENCIA

REAL IMAGINARIA
XXXX XXXX

Figura 3.13 Pantalla de Captura Para un Bus de Carga.

NO.DE BUS CUYOS DATOS DESEA CAMBIAR ?
(0 = NO CAMBIO)

Contestandosele con otro número de bus o con un 0 para terminar de cambiar datos. Terminando el proceso de cambiar, los nuevos datos son registrados en el archivo DATABUS y listados en el formato de la figura 3.15. El diagrama de flujo del programa SISPOT03 se proporciona en la figura 3.16.

CAPTURA DE DATOS DE LOS BUSES

TIPO 0 = REF.
TIPO 1 = CARGA
TIPO 2 = V. CTRL.

BUS
XX

TIPO
2

APROX. VOLTAJE

REAL	IMAGINARIO
XXXX	XXXX
MOD. VOLTAJE	XXXX
POT. REAL	XXXX
POT. REACTIVA MAX.	XXXX
POT. REACTIVA MIN.	XXXX

Figura 3.14 Pantalla de Captura Para un Bus de Voltaje Controlado

ESTUDIO DE CARGAS EN SISTEMAS DE POTENCIA

DATOS DE LOS BUSES DEL SISTEMA

No	TIPO	VOLTAJES		POTENCIAS		POTENCIA REACTIVA		MÓDULO VOLTAJE
		P.REAL	P.IMAGIN.	P.REAL	P.IMAGIN.	VALOR MAX.	VALOR MIN.	
1	0	1.06000	0.00000	0.00000	0.00000			
2	1	1.00000	0.00000	0.20000	0.20000			
3	1	1.00000	0.00000	-0.45000	-0.15000			
4	1	1.00000	0.00000	-0.40000	-0.05000			
5	1	1.00000	0.00000	-0.60000	-0.10000			

Figura 3.15 Listado de los Datos de la Tabla 3.IV.

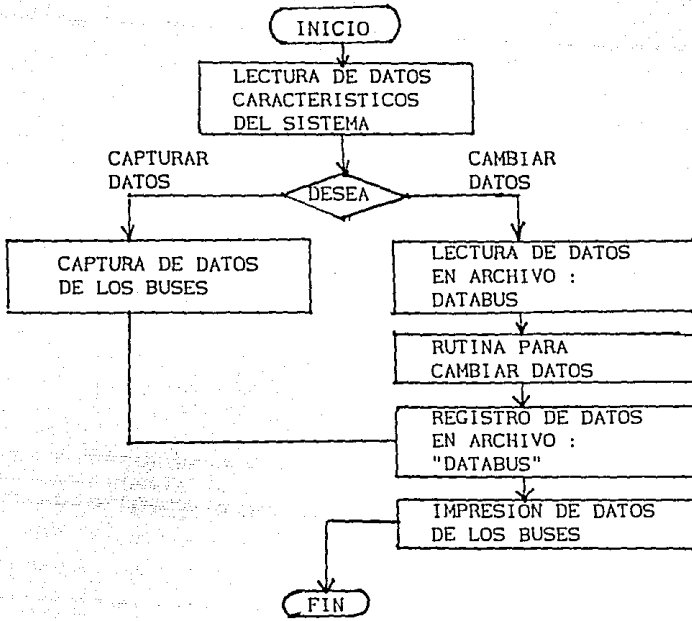


Figura 3.16 Diagrama de Flujo del Programa SISPOT03

3.5 Cálculo de Voltajes por el Método de Gauss-Seidel (SISPOT04)

La etapa siguiente del estudio la constituye el cálculo de los voltajes en todos los buses del sistema, para realizar esto, se utiliza el método iterativo de Gauss-Seidel descrito en la sección 2.1.3. Toda la lógica de este programa esta basada en el diagrama de flujo de la figura 2.1 que muestra la secuencia de operaciones para programar el estudio de cargas. Para una mejor comprensión de este programa se recomienda repasar este diagrama.

La iniciación del programa se realiza tecleando :

RUN "SISPOT04"

a continuación aparecerá el emsaje :

```

PROGRAMA QUE CALCULA LOS VOLTAJES
EN TODOS LOS BUSES DEL SISTEMA UTILIZANDO
EL METODO ITERATIVO DE GAUSS-SEIDEL
  
```

```

CONTINUAMOS ?
SI o NO ?
  
```

Para calcular los voltajes se debe responder que SI.

El programa requiere enseguida que se proporcionen los datos característicos del sistema, estos son :

NUMERO DE ELEMENTOS DEL SISTEMA ?

ELEMENTOS <= 100 OK ?

NUMERO DE BUSES DEL SISTEMA ?

BUSES <= 40 OK?

POTENCIA BASE EN MVA ?

Estos datos deben corresponder a los proporcionados a los programas utilizados previamente para el acceso de datos .

Los datos que a continuación pide el programa son los datos que se necesitan para desarrollar el proceso de cálculo, estos son :

NUMERO DEL BUS DE REFERENCIA ?

Aquí el programa solicita que se especifique que bus se va a utilizar como bus de referencia.

MAXIMO NUMERO DE ITERACIONES ?

Se debe responder aquí con el valor del número máximo de iteraciones, este dato se solicita para el caso de que el método no converja a la solución y finalizar el programa una vez sobrepasado el máximo número de iteraciones.

DIFERENCIA MAXIMA ?

En este punto se pide proporcionar el valor de la diferencia máxima entre la solución obtenida entre dos iteraciones. Este valor determina el grado de exactitud de la solución que se obtenga . El proceso de cálculo se detendrá, cuando la diferencia máxima entre el resultado obtenido por la última iteración y la iteración previa, sea menor o igual al valor dado en esta etapa del programa.

Una vez que se han proporcionado los datos anteriores por medio del teclado, el programa procede a leer los datos almacenados en el diskette, estos datos son : la matriz Y_{BUS} (archivos YBUSR y YBUSI) y los datos de los buses (archivo DATABUS). Con la lectura de estos datos termina la fase de entrada de datos del programa.

En La fase de cálculos de los voltajes en los buses se aplica el método iterativo de Gauss-Seidel. Obtenida la solución, esta es almacenada en el archivo VOLTBUS. En la figura 3.17 se proporciona el diagrama de flujo del programa SISPOT04.

3.6 Cálculo de los Flujos de Energía Entre Líneas e Impresión de Voltajes en los Buses (SISPOT05)

Por medio de este programa se obtienen los flujos netos de energía entre buses y se imprimen los valores de los voltajes obtenidos en la etapa anterior. Este programa se basa en los conceptos desarrollados en al sección 2.1.5.

La ejecución de este programa se inicia tecleando :

RUN "SISPOTOS"

Enseguida se despliega el siguiente mensaje :

PROGRAMA QUE CALCULA EL FLUJO DE
ENERGIA ENTRE LINEAS
CONTINUAMOS ?
SI o NO ?

Se debe responder que SI para continuar:

Ahora se piden los datos característicos del sistema, estos datos son :

NUMERO DE ELEMENTOS DEL SISTEMA ?
ELEMENTOS <= 100 OK?

NUMERO DE BUSES DEL SISTEMA ?
BUSES <= 30 OK?

POTENCIA BASE EN MVA ?

NUMERO DEL BUS DE REFERENCIA ?

Los datos restantes los toma el programa desde los archivos almacenados en el diskette. Estos datos son : las admitancia de la red a partir del archivo YRED, los datos de los buses a partir del archivo DATABUS y los voltajes en los buses del archivo VOLTBUS.

Una vez que se han leído todos estos datos, el programa procede a calcular con ellos el flujo de energía entre línea, esto lo hace utilizando las Ecs. (2.16) y (2.17). Después de calcular el flujo de energía entre líneas, se procede a calcular la potencia neta en cada bus.

Después de desarrollar estos cálculos, el programa procede a listar los resultados obtenidos. El listado para los flujos de energía se muestra en la figura 3.18 y para los resultados de los buses en la figura 3.19.

En el listado de la figura 3.19 se señala una columna que tiene como encabezado " TIPO DE POTENCIA ". En esta columna se indica si el bus está generando o consumiendo energía. Esto lo determina el signo de la potencia neta real. Si es positiva indica que la potencia sale del bus (potencia generada), si es negativa indica que la potencia llega al bus (potencia consumida).

En la figura 3.20 se muestra el diagrama de flujo del programa.

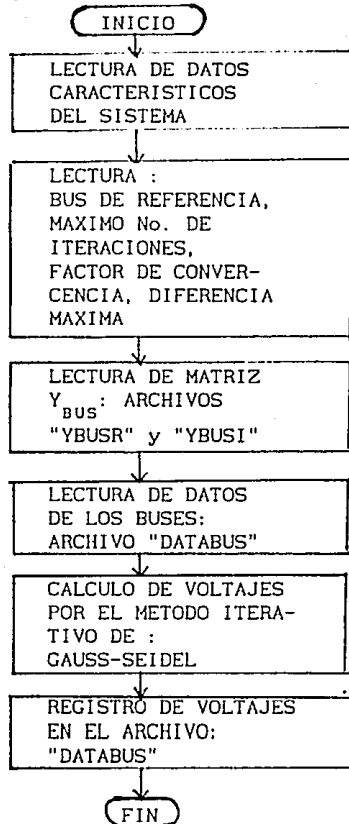


Figura 3.17 Diagrama de Flujo del Programa SISPOT04

DEPFI

BASE:
100 MVA

ESTUDIO DE CARGAS EN SISTEMAS DE POTENCIA

FLUJO DE ENERGIA ENTRE LINEAS

NODO P	NODO Q	POTENCIA		TOTAL
		REAL	REACTIVA	
1	2	.8882458	-8.590315E-02	.89239
2	1	-.8741535	6.155745E-02	.8763182
1	3	.407074	1.152043E-02	.407237
3	1	-.3951639	-3.010451E-02	.396309
2	3	.2468496	3.545226E-02	.2493824
3	2	-.2433382	-6.783665E-02	.2526169
2	4	.2792806	2.961491E-02	.2808464
4	2	-.2748712	-5.927906E-02	.2811907
2	5	.5481971	7.340712E-02	.5530701
5	2	-.5369463	-7.165545E-02	.5417064
3	4	.1888219	-5.200633E-02	.1958039
4	3	-.1884656	3.210811E-02	.1911811
4	5	6.376306E-02	-2.283430E-02	.067351
5	4	-6.326464E-02	-2.834251E-02	6.913165E-02

Figura 3.18 Listado de Resultados de SISPOT05.

FECHA
dd/mm/aa

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTONOMA DE MEXICO

PAG. 1

D E F F I

BASE:
100 MVA

ESTUDIO DE CARGAS EN SISTEMAS DE POTENCIA

RESULTADOS FINALES EN LOS BUSES

BUS No TIPO	V O L T A J E		P O T E N C I A		TIPO POTENCIA
	P. REAL	P. IMAGINARIA	P. REAL	P. IMAGINARIA	
1 0	1.06	0	1.29532	-7.438273E-02	GENERADA
2 1	1.046195	-5.126288E-02	.2001737	.2000317	GENERADA
3 1	1.020309	-8.917825E-02	-.4496802	-.1499475	CARGA
4 1	1.019167	-9.503724E-02	-.3999748	-5.000527E-02	CARGA
5 1	1.012097	-.1090352	-.6000001	-9.999797E-02	CARGA

Figura 3.19 (Cont.) Listado de Resultados de SISPOT05.

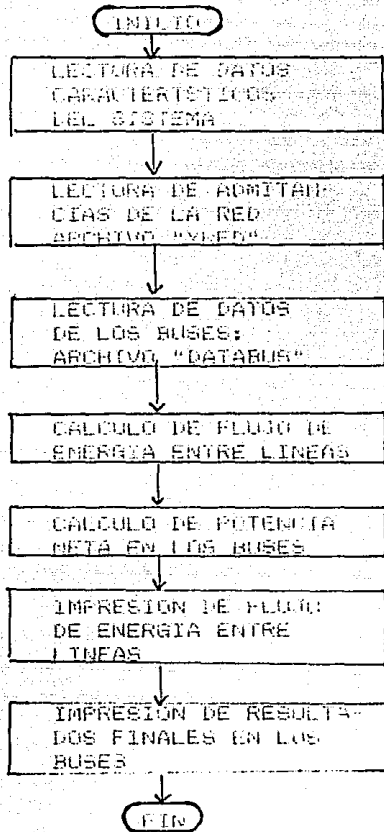


Figura 3.20 Diagrama de Flujo de Programa SISPOT05

Capítulo Cuatro

ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO

4.1 Introducción

El funcionamiento normal de un sistema eléctrico de potencia es balanceado, esta situación se puede interrumpir por medio de incidentes indeseables. Si el aislamiento del sistema fallase en un determinado punto o si un objeto conductor hiciera contacto con un conductor de potencia, se dice que ocurre un "corto circuito" o falla. El Instituto de Ingenieros Electricistas define una falla, en un conductor o cable de la siguiente forma:

"Un falla de un conductor o cable es la pérdida total o parcial de su aislamiento o de su continuidad".

Los sistemas eléctricos de potencia están sujetos a cuatro tipos de corto circuitos de interés más general:

1. Corto Circuito trifásico.
2. Corto circuito de línea a tierra.
3. Corto circuito de línea a línea.
4. Corto circuito de doble línea a tierra.

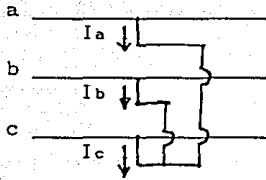
Estos tipos de corto circuito se muestran en la figura 4.1.

El estudio de corto circuito es de suma importancia en el diseño y operación de un sistema eléctrico de potencia, debido a que a partir de este estudio se determinan las corrientes y voltajes del sistema cuando ocurren corto circuitos. En un estudio de corto circuito, se aplican fallas de diversos tipos en varios puntos de la red, obteniéndose de este modo las corrientes circulantes de falla. A estas corrientes se les conoce como corrientes de corto circuito.

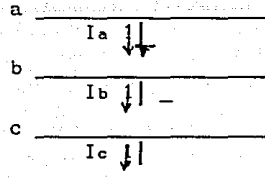
El cálculo de las corrientes de corto circuito puede ser dividido a dos tipos principales:

- a). Cálculo de corto circuito trifásico cuando la red permanece balanceada eléctricamente. Para realizar estos cálculos se pueden emplear los circuitos equivalentes monofásicos tal como los cálculos de flujo de cargas.
- b). Cálculos de corto circuitos no balanceados. Para facilitar el cálculo de este tipo de falla se utiliza el método de componentes simétricas.

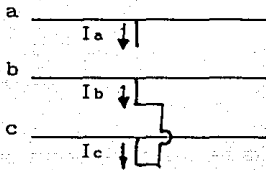
Los objetivos principales de un estudio de corto circuito pueden ser enumerados como sigue :



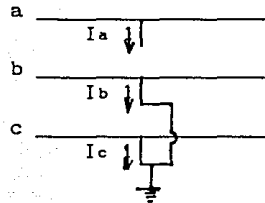
(a) Corto Circuito Trifásico



(b) Corto Circuito Línea a Tierra



(c) Corto Circuito Línea a Línea



(d) Corto Circuito Doble Línea a Tierra

Figura 4.1 Tipos de Corto Circuito

1. Determinar las corrientes de corto circuito trifásico.
2. determinar la corriente asimétrica para corto circuito de una línea a tierra, doble línea a tierra y línea a línea.
3. Investigar y probar la operación los relevadores de protección.
4. Determinar la capacidad de los interruptores colocados en el sistema.
5. Determinar la distribución de la corriente de falla y los niveles de voltaje en los buses durante las fallas.

La información que se obtiene de un estudio de corto circuito es empleada principalmente para diseñar su sistema adecuado de relevadores de protección y para determinar la capacidad de los interruptores. El sistema de relevadores deberá ser capaz de detectar la existencia de una falla e iniciar las operaciones de desconexión. Esto es necesario para asegurar un mínimo de discontinuidad en el servicio y limitar el daño que pueda causar la falla.

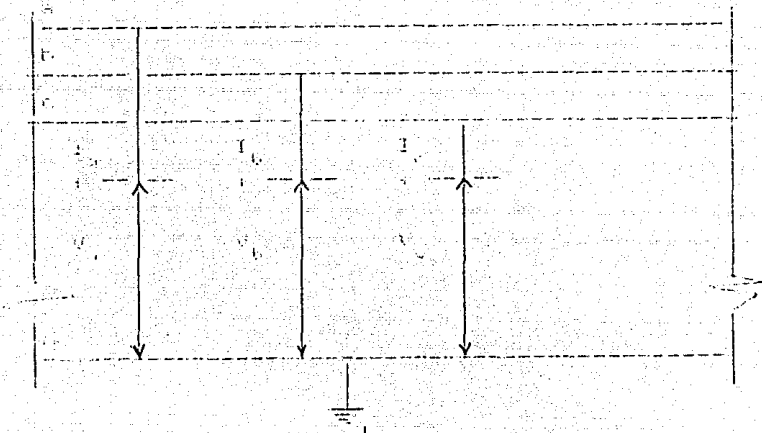


Figura 4.2 Circuito General Trifásico

4.2 Conexión Entre las Redes de Secuencia

Antes de iniciar el análisis de cada falla, considerese la representación general mostrada en la figura 4.2. Las terminales que se muestran en esta figura, servirán para simular fallas y facilitarán la comprensión de la representación de fallas por medio de redes de secuencia, así como la obtención de las ecuaciones descriptivas de cada falla. Obsérvese las asignaciones de polaridad positiva a las cantidades por fase y que el flujo de las corrientes es hacia fuera del sistema.

Se pueden construir circuitos equivalentes generales de secuencia para el sistema, como los que se indican en la figura 4.3.

Las terminales mostradas corresponden a las terminales generales de entrada de la figura 4.2. Notese que el sentido positivo de los valores de secuencia es compatible con los correspondientes valores por fase.

4.2.1 Corto Circuito Trifásico

Considerese la figura 4.4 en la que se representa la falla en forma general, Z_f es la impedancia de falla, que normalmente se considera igual a cero.

Las condiciones terminales que se presentan nos permite escribir

$$\begin{aligned}
 V_a &= I_a Z_f \\
 V_b &= I_b Z_f \\
 V_c &= I_c Z_f
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

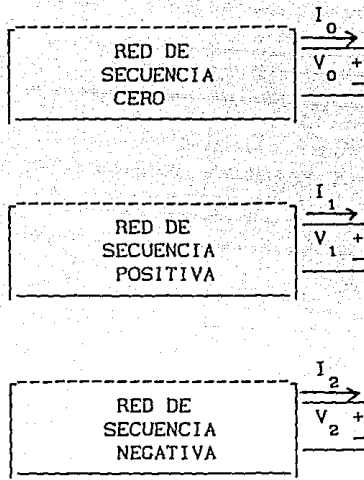


Figura 4.3 Circuito General de Secuencia

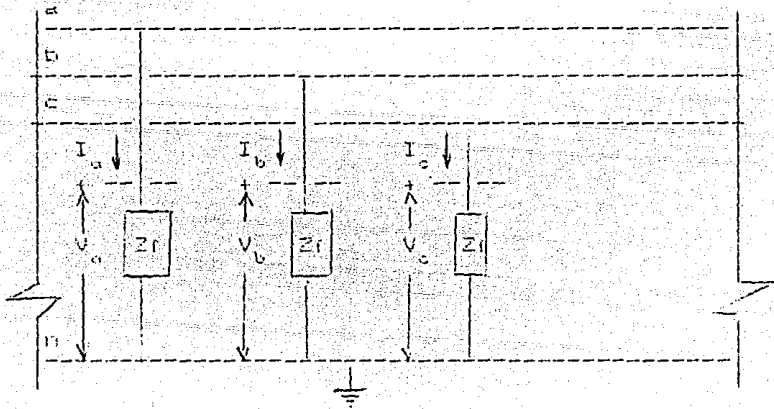


Figura 4.4 Falla General Trifásica

en forma matricial

$$V_a \quad Z_f \quad 0 \quad 0 \quad I_a$$

$$V_b = 0 \quad Z_f \quad 0 \quad I_b$$

$$V_c = 0 \quad 0 \quad Z_f \quad I_c$$

(4.2)

Usando la ecuación de transformación $Z_{012} = (T_s^*)^t (Z_{abc}) (T_s)$

$$Z_r \ 0 \ 0$$

$$Z_{012} = (T_s^*)^t \begin{matrix} 0 & Z_r & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{matrix} (T_s)$$

$$0 \ 0 \ Z_f$$

donde

$$T_s^* = \frac{1}{3^{1/2}} \begin{matrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & a & a^2 \end{matrix}$$

$$y \quad (T_s^*)^t = \frac{1}{3^{1/2}} \begin{matrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{matrix}$$

se obtiene

$$Z_r \ 0 \ 0$$

$$Z_{012} = \begin{matrix} 0 & Z_r & 0 \\ 0 & 0 & Z_f \end{matrix}$$

$$0 \ 0 \ Z_f$$

de acuerdo con esto

$$V_0 = I_0 Z_r$$

$$V_1 = I_1 Z_1$$

$$V_2 = I_2 Z_2$$

(4.3)

en la figura 4.5 se muestran las conexiones correspondientes de los circuitos de secuencia.

Como los circuitos de secuencia cero y negativa son pasivos ($V_0 = I_0 = I_2 = V_2 = 0$), solamente se considera el circuito de secuencia positiva.

4.2.2 Corto Circuito de Línea a Tierra

Considerese la figura 4.6 en la que se representa este tipo de falla en forma general.

Las condiciones terminales son tales que podemos escribir

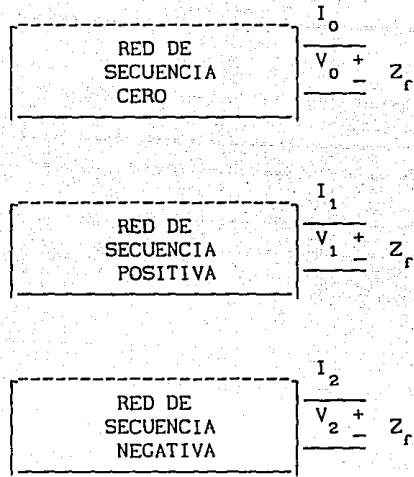


Figura 4.5 Conexiones de las Redes de Secuencia Para Simular una Falla Trifásica Balanceada

$$I_b = 0 \quad (4.4)$$

$$I_c = 0 \quad (4.5)$$

$$V_a = I_a Z_f \quad (4.6)$$

evidentemente de las ecuaciones (4.4) y (4.5)

$$I_b = I_c$$

que expresada en componentes simétricas es igual a

$$I_0 + a^2 I_1 + a I_2 = I_0 + a I_1 + a^2 I_2$$

obteniendo

$$(a^2 - a) I_1 = (a - a^2) I_2$$

$$I_1 = I_2 \quad (4.7)$$

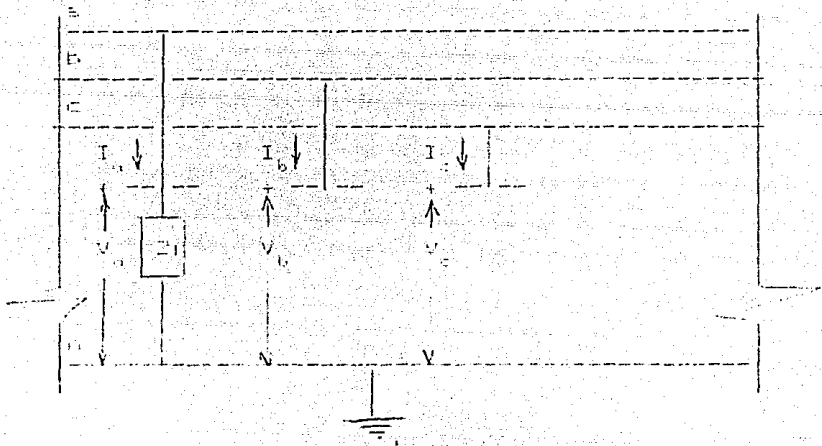


Figura 4.6 Falla General de Línea a Tierra

además

$$I_b = I_0 + a^2 I_1 + a I_2 = 0$$

$$I_0 + (a^2 + a) I_1 = 0$$

como

$$I_0 = -(a^2 + a) I_1$$

$$I_0 = I_1 \quad (4.8)$$

de la ecuación (4.6)

$$V_a = z_f I_a$$

$$V_0 + V_1 + V_2 = z_f (I_0 + I_1 + I_2)$$

$$V_0 + V_1 + V_2 = 3z_f I_1 \quad (4.9)$$

En general las ecuaciones (4.6), (4.7) y (4.8) se deben cumplir en forma simultánea. Estas condiciones se satisfacen si se conectan los circuitos de secuencia, como se muestra en la figura 4.7.

4.3 Estudio de Corto Circuito con Computadora

El análisis de corto circuito con computadora, ofrece amplias ventajas como flexibilidad para cambiar datos y efectuar cálculos diferentes y con mayor rapidez y precisión.

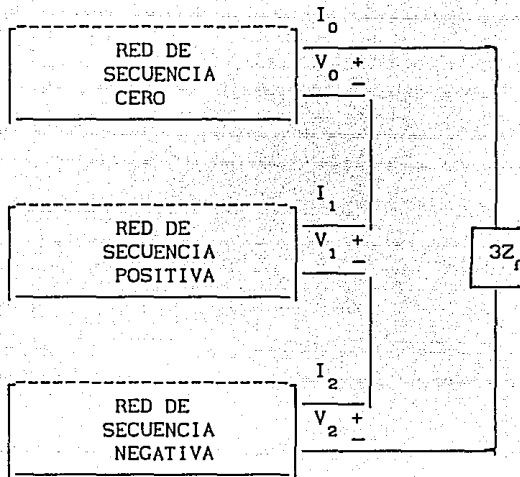


Figura 4.7 Conexión de las Redes de Secuencia Para Analizar una Falla de Línea a Tierra.

La técnica que se va a emplear se basa en la formación de la matriz de impedancia nodal Z_{BUS} . Se observará que este método proporciona un medio eficiente para determinar corrientes y voltajes de corto circuito, pues estos valores pueden ser obtenidos con pocas operaciones, y considerando únicamente algunas partes de la matriz de impedancia nodal.

4.3 Ecuaciones Generales para Estudio de Corto Circuito.

La notación que se usará para deducir las ecuaciones para los diferentes tipos de fallas es el siguiente. En primer lugar, se designará al bus donde ocurre la falla con la letra "p". Al bus de referencia se le designa con la letra "r". La notación para las corrientes y voltajes de secuencia son :

V_0 = Vector de voltajes de secuencia cero en los buses (dimensión $n \times 1$).

V_1 = Vector de voltajes de secuencia positiva en los buses (dimensión $n \times 1$).

V_2 = Vector de voltajes de secuencia negativa en los buses (dimensión $n \times 1$).

I_0 = Vector de corrientes de falla secuencia cero (dimensión $n \times 1$).

I_1 = Vector de corrientes de secuencia positiva
(dimensión $n \times 1$).

I_2 = Vector de corrientes de secuencia negativa
(dimensión $n \times 1$).

El elemento i -ésimo de cada uno de los vectores anteriores sería respectivamente $V_1^0, V_1^1, V_1^2, I_1^0, I_1^1$ y I_1^2 donde los subíndices se refieren a el número de bus y el superíndice indica la secuencia. En la figura 4.8 se indican las convenciones de asignación positiva.

Las matrices de impedancia necesarias son :

Z_0 = Matriz de impedancia de falla de secuencia cero
(dimensión $n \times n$).

Z_1 = Matriz de impedancia de falla de secuencia positiva
(dimensión $n \times n$).

Z_2 = Matriz de impedancia de falla de secuencia negativa
(dimensión $n \times n$).

El elemento de renglón " i " y columna " j " para cada una de las matrices sería Z_{ij}^0, Z_{ij}^1 y Z_{ij}^2 respectivamente.

Las matrices de impedancia cero y negativa se pueden formular directamente, ya que están formadas por elementos pasivos únicamente. Por otro lado, para la matriz de secuencia positiva, se necesitan hacer algunas consideraciones debido a que en ella se encuentran las fuentes de voltaje.

Si se desprecian las corrientes de prefalla, se pueden tener dos implicaciones: primera, no hay más trayectoria a tierra que las máquinas, y segundo, todas las corrientes de línea son cero. De acuerdo a lo segundo, todos los voltajes internos de las fuentes generadora son iguales, tanto en magnitud como en fase. Por tanto, se pueden combinar en una fuente equivalente. El circuito simplificado se muestra en la figura 4.8b, con el punto "0" simbolizando una terminal de la fuente equivalente. Para formar Z_1 ,

la fuente E es puesta a cero, conectando el punto 0 a r . De este modo se hace que el circuito resultante de secuencia positiva sea pasivo y se procede de la misma forma como se hizo para las matrices de secuencia cero y negativa.

Las ecuaciones que interrelacionan las cantidades de secuencia son :

$$V_0 = -Z_0 I_0 \quad (4.10)$$

$$V_1 = E - Z_1 I_1 \quad (4.11)$$

$$V_2 = -Z_2 I_2 \quad (4.12)$$

Todos los elementos del vector E son iguales a $1.00 / 0^\circ$. Los signos negativos se deben a la inversión del sentido de la corriente definida positivamente. Las terminaciones externas se hacen en el p -ésimo bus para modelar a cualquiera de las fallas básicas.

La ventaja de este procedimiento se hace evidente cuando se observa que

todas las corrientes son cero, hasta que se cierre externamente el circuito. Como se cierra sólo un bus (el p-ésimo), entonces solamente I_p^0 , I_p^0 e I_p^0 no son cero.

Ahora, se pueden cerrar los circuitos de secuencia general, que se muestran en la figura 4.8 en el bus p (bus de falla) de acuerdo a el tipo de falla. Se debe recordar que $I_q = 0$ ($q = 1, 2, 3, \dots, n$ $p \neq q$). Las ecuaciones (4.10), (4.11) y (4.12) son la base para el siguiente desarrollo.

4.3.1 Corto Circuito trifásico

Como se observa en la figura 4.6 para este tipo de falla

$$V_0 = V_2 = 0 \quad (4.13)$$

$$I_0 = I_2 = 0 \quad (4.14)$$

$$V_p^1 = I_2^1 Z_f \quad (4.15a)$$

$$V_p^1 = E - \sum_{i=1}^n Z_{pi}^1 I_i^1 \quad (4.15b)$$

pero $I_i^1 = 0$, para $i = 1, 2, \dots, n$ excepto para $i=p$ (I_p^1).

Por consiguiente :

$$V_p^1 = E - Z_{pp}^1 I_p^1$$

$$V_p^1 = I_p^1 Z_f = E - Z_{pp}^1 I_p^1$$

la corriente de corto circuito en el bus de falla es

$$I_p^1 = \frac{E}{Z_f + Z_{pp}^1} \quad (4.16)$$

Los voltajes en los otros buses son

$$V_q^1 = E - Z_{qp}^1 I_p^1$$

$$V_q^1 = \left(1 - \frac{Z_{qp}^1}{Z_f + Z_{pp}^1}\right) E$$

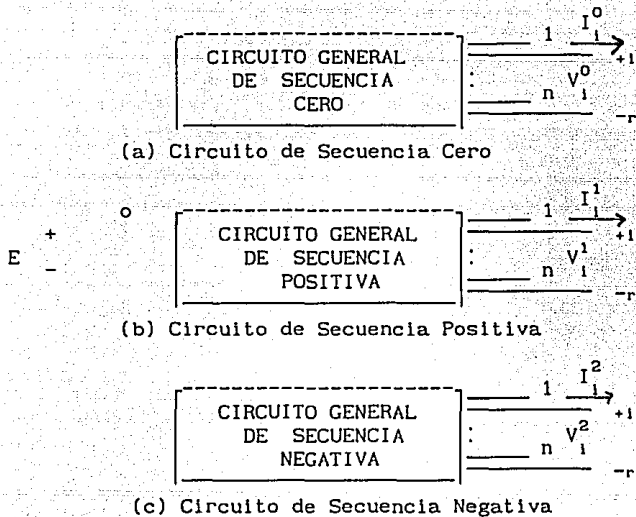


Figura 4.8 Circuitos de Secuencia Para Análisis de Fallas.

$$V_q^1 = \left(\frac{Z_f + Z_{pp}^1 - Z_{qp}^1}{Z_f + Z_{pp}^1} \right) E \quad (4.17)$$

$$q = 1, 2, 3, \dots, n$$

$$q \neq p$$

Expresando la ecuación (4.16) en forma de matrices y recordando que $E = 3^{1/2} \angle 0^\circ$ en valores unitarios.

$$\begin{matrix} I_p^0 \\ I_p^1 \\ I_p^2 \end{matrix} = \begin{matrix} 0 \\ 3^{1/2} \\ 0 \end{matrix} \frac{1}{Z_f + Z_{pp}^1} \quad (4.18)$$

Las corrientes por fase en el bus p se obtienen premultiplicando ambos lados de la ecuación (4.17) por T_s . Estas corrientes se obtienen de

$$\begin{aligned}
 I_p^a &= 1 \\
 I_p^b &= \frac{1}{Z_f + Z_{pp}^1} a^2 \\
 I_p^c &= a
 \end{aligned}
 \tag{4.19}$$

El voltaje en el bus p en el que ocurre el corto circuito es

$$\begin{aligned}
 V_p^{0,1,2} &= Z_p^{0,1,2} I_p^{0,1,2} \\
 V_p^0 &= Z_f + 3Z_g \quad 0 \\
 V_p^1 &= Z_f \quad \frac{3^{1/2}}{Z_f + Z_{pp}^1} \\
 V_p^2 &= Z_f \quad 0
 \end{aligned}
 \tag{4.20}$$

que se reduce a

$$\begin{aligned}
 V_p^0 &= 0 \\
 V_p^1 &= \frac{3^{1/2} Z_f}{Z_f + Z_{pp}^1} \\
 V_p^2 &= 0
 \end{aligned}
 \tag{4.21}$$

Los voltajes de corto circuito en cada fase son

$$\begin{aligned}
 V_p^a &= 1 \\
 V_p^b &= \frac{Z_f}{Z_f + Z_{pp}^1} a^2 \\
 V_p^c &= a
 \end{aligned}
 \tag{4.22}$$

Los voltajes en los demás buses, de la Ec. (4.22) son

$$\begin{aligned}
 V_q^0 &= 0 \quad Z_{qp}^0 \quad 0 \\
 V_q^1 &= 3^{1/2} \quad Z_{qp}^1 \quad \frac{3^{1/2}}{Z_f + Z_{pp}^1} \\
 V_q^2 &= 0 \quad Z_{qp}^2 \quad 0
 \end{aligned}
 \tag{4.23}$$

que se reduce a

$$\begin{aligned}
 V_q^0 &= 0 \\
 V_q^1 &= 3^{1/2} \left(1 - \frac{Z_{qp}}{Z_f + Z_{pp}} \right) \\
 V_q^2 &= 0
 \end{aligned} \tag{4.24}$$

en componentes de fase

$$\begin{aligned}
 V_q^a &= 1 \\
 V_q^b &= \left(1 - \frac{Z_{qp}^1}{Z_f + Z_{pp}^1} \right) a^2 \\
 V_q^c &= a
 \end{aligned} \tag{4.25}$$

Las corrientes en los elementos de la red durante la falla se pueden calcular con la ecuación

$$i_{IJ(F)}^{0,1,2} = y_{IJ}^{0,1,2} - (V_{I(F)}^{0,1,2} - V_{J(F)}^{0,1,2}) \tag{4.26}$$

Como los voltajes de secuencia cero y negativa son iguales a cero para un corto circuito trifásico en la Ec. (4.26) se reduce a

$$\begin{aligned}
 i_{IJ(F)}^0 &= 0 \\
 i_{IJ(F)}^1 &= y_{IJ, IJ}^1 - (V_{I(F)}^1 - V_{J(F)}^1) \\
 i_{IJ(F)}^2 &= 0
 \end{aligned} \tag{4.27}$$

Las corrientes de fase

$$\begin{aligned}
 i_{IJ(F)}^0 &= 0 \\
 i_{IJ(F)}^1 &= \frac{y_{IJ, IJ}^1 - (V_{I(F)}^1 - V_{J(F)}^1)}{3^{1/2}} a^2 \\
 i_{IJ(F)}^2 &= a
 \end{aligned} \tag{4.28}$$

Notese que el voltaje de línea a tierra se supuso igual a uno por unidad en la deducción de las formulas de esta sección

4.3.2 Corto Circuito de Línea a Tierra

Vease la figura 4.7. Como se mencionó el único bus en que circula

corriente es en el que ocurre la falla y por tanto :

$$I_q^0 = I_q^1 = I_q^2 = 0 ; \quad p=q=1, 2, 3, \dots, n$$

y

$$I_p^0 = I_p^1 = I_p^2 \quad (4.29)$$

de acuerdo a la Ley de kirchhoff de los voltajes

$$\begin{aligned} V_p^0 + V_p^1 + V_p^2 &= 3Z_f I_p^1 \\ E - Z_{pp}^0 I_p^0 - Z_{pp}^1 I_p^1 - Z_{pp}^2 I_p^2 &= 3Z_f I_p^1 \end{aligned}$$

por consiguiente

$$I_p^1 = \frac{E}{Z_{pp}^0 + Z_{pp}^1 + Z_{pp}^2 + 3Z_f} \quad (4.30)$$

Los voltajes en los otros buses son

$$\begin{aligned} V_q^0 &= -Z_{qp}^0 I_p^0 \\ V_q^1 &= -Z_{qp}^1 I_p^1 \\ &\quad - Z_{qp}^2 E \\ V_q^0 &= \frac{-Z_{qp}^2 E}{Z_{pp}^0 + Z_{pp}^1 + Z_{pp}^2 + 3Z_f} \end{aligned} \quad (4.31)$$

$$V_q^1 = E - Z_{qp}^1 I_p^1$$

$$V_q^1 = \left(1 - \frac{Z_{qp}^1}{Z_{pp}^0 + Z_{pp}^1 + Z_{pp}^2 + 3Z_f}\right) E \quad (4.32)$$

$$V_q^2 = -Z_{qp}^2 I_p^2$$

$$V_q^2 = -Z_{qp}^2 I_p^1$$

$$V_q^2 = \frac{-Z_{qp}^2 E}{Z_{pp}^0 + Z_{pp}^1 + Z_{pp}^2 + 3Z_f} \quad (4.33)$$

Expresando la Ec. (4.28) en forma matricial y recordando que $E = 3^{1/2} \angle 0^\circ$, además haciendo $Z_{pp}^1 = Z_{pp}^2$

$$\begin{matrix} I_p^0 \\ I_p^1 \\ I_p^2 \end{matrix} = \frac{3^{1/2}}{\begin{matrix} Z_{pp}^0 + 2Z_{pp}^1 + 3Z_f \\ Z_{pp}^0 + 2Z_{pp}^1 + 3Z_f \\ Z_{pp}^0 + 2Z_{pp}^1 + 3Z_f \end{matrix}} \begin{matrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{matrix} \quad (4.34)$$

Las corrientes de falla en cada fase del bus se obtienen premultiplicando ambos lados de la Ec. (4.34) por T_b . Estas corrientes son

$$\begin{matrix} I_p^a \\ I_p^b \\ I_p^c \end{matrix} = \begin{matrix} \frac{3}{Z_{pp}^0 + 2Z_{pp}^1 + 3Z_f} \\ 0 \\ 0 \end{matrix} \quad (4.35)$$

El voltaje en el bus p donde ocurre el corto circuito de la figura 4.7 es

$$\begin{aligned} V_p^0 &= Z_{pp}^0 I_p^0 \\ V_p^1 &= I_p^1 (Z_{pp}^0 + Z_{pp}^1 + 3Z_f) \\ V_p^2 &= Z_{pp}^2 I_p^2 \end{aligned}$$

recordando que $I_p^0 = I_p^1 = I_p^2 = \frac{3^{1/2}}{Z_{pp}^0 + 2Z_{pp}^1 + 3Z_f}$

$$\begin{matrix} V_p^0 \\ V_p^1 \\ V_p^2 \end{matrix} = \frac{3^{1/2}}{Z_{pp}^0 + 2Z_{pp}^1 + 3Z_f} \begin{matrix} -Z_{pp}^0 \\ Z_{pp}^0 + 2Z_{pp}^1 + 3Z_f \\ -Z_{pp}^1 \end{matrix} \quad (4.36)$$

Los voltajes de fase en el bus de falla son

$$\begin{aligned}
 V_P^a &= \frac{3Z_f}{Z_{PP}^0 + 2Z_{PP}^1 + 3Z_f} \\
 V_P^b &= \frac{a^2 - (Z_{PP}^0 - Z_{PP}^1)}{Z_{PP}^0 + 2Z_{PP}^1 + 3Z_f} \\
 V_P^c &= \frac{a - (Z_{PP}^0 - Z_{PP}^1)}{Z_{PP}^0 + 2Z_{PP}^1 + 3Z_f}
 \end{aligned} \tag{4.37}$$

El voltaje en los otros buses es

$$\begin{aligned}
 V_q^0 &= 0 \\
 V_q^1 &= 3^{1/2} - \frac{3^{1/2}}{Z_{PP}^0 + 2Z_{PP}^1 + 3Z_f} Z_{qP}^1 \\
 V_q^2 &= 0
 \end{aligned} \tag{4.38}$$

Los voltajes de fase son

$$\begin{aligned}
 V_q^0 &= 1 \\
 V_q^1 &= a^2 - \frac{1}{Z_{PP}^0 + 2Z_{PP}^1 + 3Z_f} (Z_{qP}^0 - 2Z_{qP}^1) \\
 V_q^2 &= a \\
 & \quad (Z_{qP}^0 - Z_{qP}^1)
 \end{aligned} \tag{4.39}$$

Las corrientes de falla en los elementos de la red se pueden obtener de

$$i_{ij}^{0,1,2} = \frac{(V_i^{0,1,2} - V_j^{0,1,2})}{Z_{ij}^{0,1,2}} \tag{4.40}$$

que en forma matricial se expresa como

$$i_{ij}^0 = \frac{V_i^0 - V_j^0}{Z_{ij}^0}$$

$$i_{ij}^1 = \frac{V_i^1 - V_j^1}{Z_{ij}^1}$$

$$i_{ij}^2 = \frac{V_i^2 - V_j^2}{Z_{ij}^2}$$

las corrientes de fase se obtienen a partir de

$$i_{ij}^{a,b,c} = T_s i_{ij}^{0,1,2} \quad (4.41)$$

Notese que en la derivación de las formulas de esta sección se supuso que el voltaje de línea a tierra es igual a uno por unidad.

Capítulo Cinco

PROGRAMAS PARA REALIZAR ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO

5.1 Sistema Para Realizar el Estudio de Corto Circuito

En este capítulo se describen los programas para llevar a cabo un estudio de corto circuito los dos casos que se desarrollaron son : corto circuito trifásico, que es el tipo de falla más severa y su cálculo es el de menor dificultad, y el de corto circuito de línea a tierra, que es el más frecuente en los sistemas eléctricos de potencia.

Los cálculos para desarrollar estos análisis se basan en las ecuaciones deducidas en el capítulo cuatro, utilizando la matriz de impedancia nodal de secuencia .

El paso inicial es la lectura de los datos del sistema, estos datos incluyen las impedancias de secuencia de todos los elementos del sistema, así como su ubicación, esta información se obtiene a partir de la gráfica de la red. El siguiente paso es formar las matrices de impedancia nodal de secuencia cero, positiva y negativa. Una vez formadas las matrices de impedancia nodal de secuencia se procede a realizar los cálculos para la falla trifásica o de línea a tierra según sea la situación, después de hechos los cálculos, el paso final es imprimir resultados, los cuales son:

1. Corriente total de falla
2. Voltajes en los buses durante la falla
3. Corrientes en el sistema durante la falla

El diagrama presentado en la figura 5.1 muestra las etapas mencionadas.

5.2 Captura de Datos para Realizar Estudio de Corto Circuito (SISPOT06).

La función del programa SISPOT06, es la de introducir los datos necesarios para el estudio de corto circuito, estos datos son las impedancias de la red de secuencia cero y positiva (se hace la suposición que la red de secuencia negativa es igual a la de secuencia positiva).

Supongase que el sistema al que se va a hacer el estudio es el representado en la figura 5.2. El primer paso del estudio consistirá en convertir a todas las impedancias de la red, tanto de secuencia positiva como cero a la base de potencia y voltaje escogida. Una vez realizado esto, se deberá proceder a numerar a todos los elementos conectados entre dos buses, así como todos los buses del sistema, esto nos da como resultado el diagrama unifilar de la figura 5.3.

De acuerdo con esta numeración, este sistema consta de 4 buses y 5

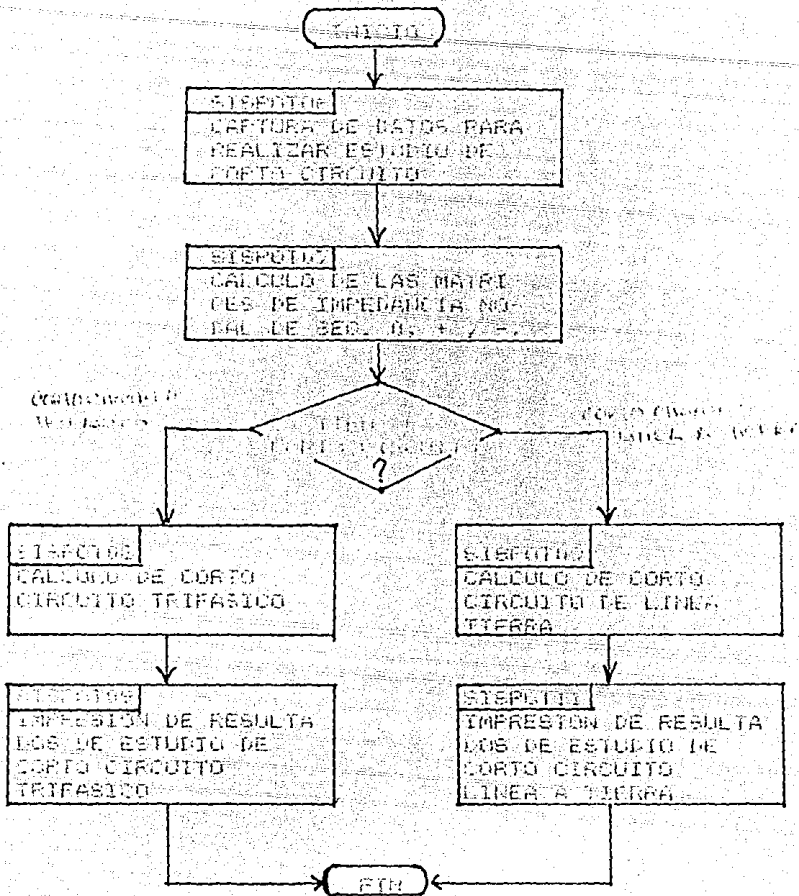


Figura 5.1 Procedimiento Para Realizar Estudio de Corto Circuito

elementos. El bus cero es el bus conectado a tierra y es el que se utiliza como referencia para los voltajes.

Es importante que siempre se le deberá asignar el número cero al bus de tierra, ya que esto afectará a todos los resultados que se obtengan del estudio.

Una vez numerados todos los elementos y buses del sistema se procede a construir las gráficas de la red. Estas gráficas son las gráficas de la red de secuencia cero y positiva/negativa.

Debe recordarse que para formar la gráfica de la red de secuencia cero es

necesario determinar primero por que ramas fluyen corrientes de secuencia cero o en que puntos se pueden aplicar voltajes de secuencia cero.

Las gráficas de las redes de secuencia para el sistema de ejemplo se muestra en la figura 5.4.

Como se puede observar, por el elemento dos no fluye corriente de secuencia cero, por lo que no aparece en la gráfica de la red de secuencia cero.

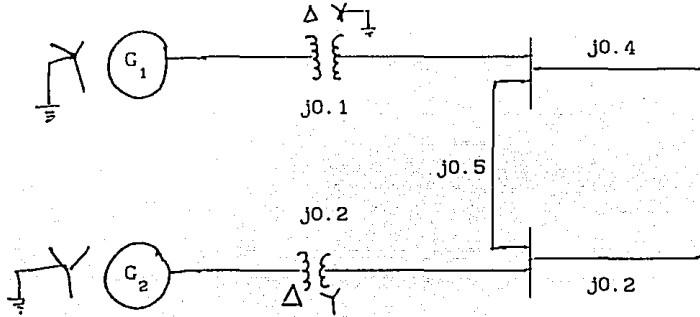


Figura 5.2 Diagrama Unifilar del Sistema de Ejemplo

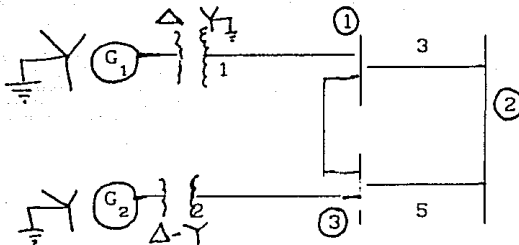
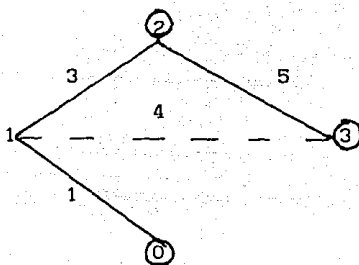
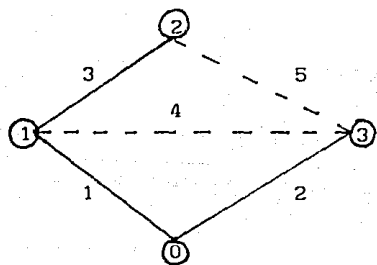
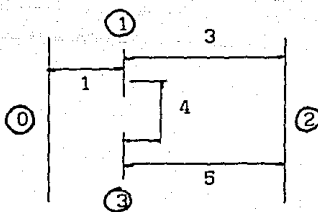
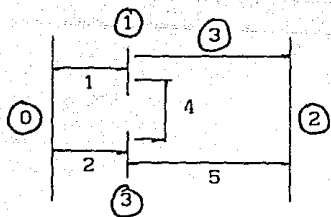


Figura 5.3 Numeración de Elementos y Buses

Al construir la gráfica de la red se determina que elementos son ramas o uniones, de acuerdo a los conceptos de topología de la red. De este modo, se observa en la figura 5.4 que la red de secuencia positiva/negativa consta de tres ramas (elementos 1, 2 y 3) y dos uniones (elementos 4 y 5), y que la red de secuencia cero consta de tres ramas (elementos 1, 3 y 5) y una unión (elemento 4).

Después de construir las gráficas de la red todos los elementos quedan determinados e identificados y es posible construir una tabla en la que se indiquen todas las características, una tabla de este tipo para el sistema que se esta ejemplificando sería la tabla 5.1

En esta tabla se determina la interconexión de todos los elementos del sistema (entre que nodos están conectados), las impedancias de secuencia positiva/negativa de cada elemento y su función en la gráfica topológica de la red (si el elemento es rama o unión o no existe en la red). Esta función



(a) Gráfica de la Red de Secuencia +/-.

(b) Gráfica de la Red de Secuencia 0.

rama —————
 unión - - - - -

Figura 5.4 Gráficas de las Redes de Secuencia

se especifica por medio de lo que en la tabla se indica como clave topológica y que si es igual a cero señala que el elemento es una rama, si es igual a uno señala que el elemento es una unión y si es igual a dos indica que el elemento no existe en la red de secuencia cero.

ELEMENTO NUMERO	NODO SALIDA (P)	DE LLEGADA (Q)	IMPEDANCIA POS./NEG. +/-	SECUENCIA CERO 0	CLAVE	
					TOPOLOGICA SEC. +/-	SEC. 0
1	0	1	J0.1	J0.09	0	0
2	0	3	J0.2	J0.15	0	2
3	1	2	J0.4	J0.13	0	0
4	1	3	J0.5	J0.2	1	1
5	2	3	J0.2	J0.50	1	0

Tabla 5.1 Datos del Sistema

Formada la tabla en la que se resumen todos los datos del sistema, se están posibilidad de alimentarlos a la computadora por medio del programa SISPOT06.

La ejecución de este programa se inicia tecleando

RUN "SISPOT06"

enseguida aparecerá el mensaje

PROGRAMA QUE CAPTURA DATOS
NECESARIOS PARA REALIZAR UN ESTUDIO DE
CORTO CIRCUITO

CONTINUAMOS ?
SI o NO ?

Se debe responder SI si se desea continuar con la ejecución del programa.

Ahora al igual que en los programas para el estudio de cargas se piden algunos datos característicos del sistema eléctrico de potencia en estudio, estos datos son :

NUMERO DE ELEMENTOS DE LA RED ?
ELEMENTOS >= 1000K?

Para los programas desarrollados para el estudio de corto circuito, el máximo número de elementos de que puede constar el sistema es de 100. Otro dato característico que se requiere es el de la potencia base del del sistema por unidad

BASE DEL SISTEMA POR UNIDAD:

POTENCIA BASE EN MVA?
POTENCIA = ?

Este programa tiene dos funciones : primero, introducir los datos del

sistema a la computadora y segundo, una vez introducidos estos datos, permitir cambiarlos o corregirlos.

Se escoge que función se va a ejecutar cuando aparece el mensaje

*DESEA :

- 0. NUEVO INICIO
- 1. CAPTURAR DATOS
- 2. CAMBIAR DATOS

Como se va a describir primero el proceso de captura se escoge la función de captura esto es la función 1 (la función cero o nuevo inicio refierca errores cometidos en los datos característicos, es decir para su modificación).

Ahora el programa pregunta que impedancia de secuencia se desea capturar, esto lo hace por medio del mensaje :

QUE IMPEDANCIA DESE CAPTURAR?

- 0. REGRESAMO A *DESEA
- 1. IMPEDANCIA DE SECUENCIA CERO
- 2. IMPEDANCIA DE SEC. POSITIVA/NEGATIVA

Supongase que primero se va a capturar la impedancia de secuencia cero, se debe entonces escoger la opción 1.

Después de responder con 1, aparecerá la pantalla de captura, el aspecto de esta pantalla se muestra en la figura 5.5 como se puede observar, los datos que se introducen por medio de esta pantalla son los datos de la tabla 5.1, en la pantalla se indica que elemento se está capturando, apareciendo una pantalla para cada elemento, también se señala que impedancia se esta introduciendo .

Para introducir las impedancias de secuencia positiva/negativa, sólo se debe responder con 2 a las opciones para escoger que impedancia se desea capturar, el aspecto de la pantalla de captura se muestra en la figura 5.6, también aquí aparecerá una pantalla para cada elemento .

Una vez que se han introducido todos los datos de la red de secuencia cero y positiva/negativa, el programa procede a almacenarlos en archivos en el diskette, en el archivo ZPRIMO a la red de secuencia cero y en el archivo ZPRIM1 a la red de secuencia positiva/negativa.

Después de almacenar los datos, el programa lista los datos que se han accedado. Estos listados se hacen para fines de registro y para verificar que los datos se han introducido correctamente, los listados para el sistema que se escogió como ejemplo se ilustran en las figuras 5.7 y 5.8.

Si en los listados que se obtengan se observa que hay errores, o si se desea cambiar algunos datos previamente accedados, esto se puede hacer usando este programa. Para hacerlo solo se debe escoger en la opción dos cuando aparezca el mensaje

*DESEA

- 0. NUEVO INICIO
- 1. CAPTURAR DATOS
- 2. CAMBIAR DATOS

ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO
CAPTURA DE REDES DE SECUENCIA

```
SECUENCIA  C E R O  
  
ELEMENTO  
XX  
  
NODO DE          NODO DE  
SALIDA (P)      LLEGADA (Q)  
XX              XX  
  
IMPEDANCIA  
XXXX  
  
CLAVE TOPOLOGICA  
X
```

Figura 5.5 Pantalla de Captura Para la Red de Secuencia Cero.

Enseguida se preguntará

- QUE IMPEDANCIA DESEA CAMBIAR ?
1. IMPEDANCIA DE SECUENCIA CERO
2. IMPEDANCIA DE SEC. POSITIVA/NEGATIVA

aquí se debe escoger que impedancia es la que se va a cambiar o corregir, el programa procede ahora a leer la impedancia correspondiente desde el diskette, desde los archivos ZPRIMO o ZPRIMI, dependiendo de que impedancia se va a corregir. Después de leer los datos desde el archivo, el programa pide el número del elemento que se va a corregir, esto lo requiere cuando aparece el mensaje

NUMERO DE ELEMENTO QUE DESEA CAMBIAR ?
(0 = NO CAMBIO)?

dandosele aquí el número del elemento que se desea cambiar. Después de señalar el elemento que se va a corregir, aparecerá la pantalla de captura para el elemento correspondiente, esta pantalla será igual a las mostradas en las figuras 5.5 y 5.6 según corresponda.

Hechas las correcciones para el elemento dado, volverá a repetirse el mensaje

NUMERO DE ELEMENTO QUE DESEA CAMBIAR?
(0 = NO CAMBIO)?

ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO
CAPTURA DE REDES DE SECUENCIA

SECUENCIA POSITIVA/NEGATIVA

ELEMENTO
XX

NODO DE
SALIDA (P)
XX

NODO DE
LLEGADA (Q)
XX

IMPEDANCIA
XXXX

CLAVE TOPOLOGICA
X

Figura 5.6 Pantalla de Captura Para la Red de Secuencia Positiva/Negativa

Si se va a cambiar otro elemento, aquí se da su número, pero si ya no se desea cambiar otro elemento se da como respuesta cero. El programa procederá ahora a registrar los nuevos datos en el archivo en el diskette y después a listar nuevamente la red de secuencia que se corrigió, el listado será igual a los mostrados en las figuras 5.7 y 5.8 y deberán estar registradas las correcciones y cambios realizados.

En la figura 5.9 se muestra el diagrama de flujo del programa SISPOT06.

D E F I

MODELO:
1980-1984

ESTUDIO DE CLATO CIRCUITO EN SISTEMAS DE POTENCIA

DATOS DE LA RED DE SECUENCIA CERO

ELEMENTO NÚMERO	NODO SALIDA P	NODO LLEGADA Q	VALOR IMPEDANCIA	CLAVE TOPOLOGICA	TIPO DE ELEMENTO
1	0	1	9.0000001E-02	0	RAMA
2	0	3	.15	2	
3	1	2	.13	0	RAMA
4	1	3	.2	1	UNION
5	2	3	.5	0	RAMA

Figura 5.7 Listado de los Datos de la Red de Secuencia Cero.

D E R F I

BASE :
1074 MW

ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO EN SISTEMAS DE POTENCIA

DATOS DE LA RED DE SECUENCIA POSITIVA/NEGATIVA

ELEMENTO NUMERO	MODULO SALIDA P	MODULO LLEGADA O	VALOR IMPEDANCIA	CLAVE TOPOLOGICA	TIPO DE ELEMENTO
1	0	1	.1	0	RAMA
2	0	3	.2	0	RAMA
3	1	2	.4	0	RAMA
4	1	3	.5	1	UNION
5	2	3	.2	1	UNION

Figura 5.8 Listado de los Datos de la Red de Secuencia Positiva/Negativa.

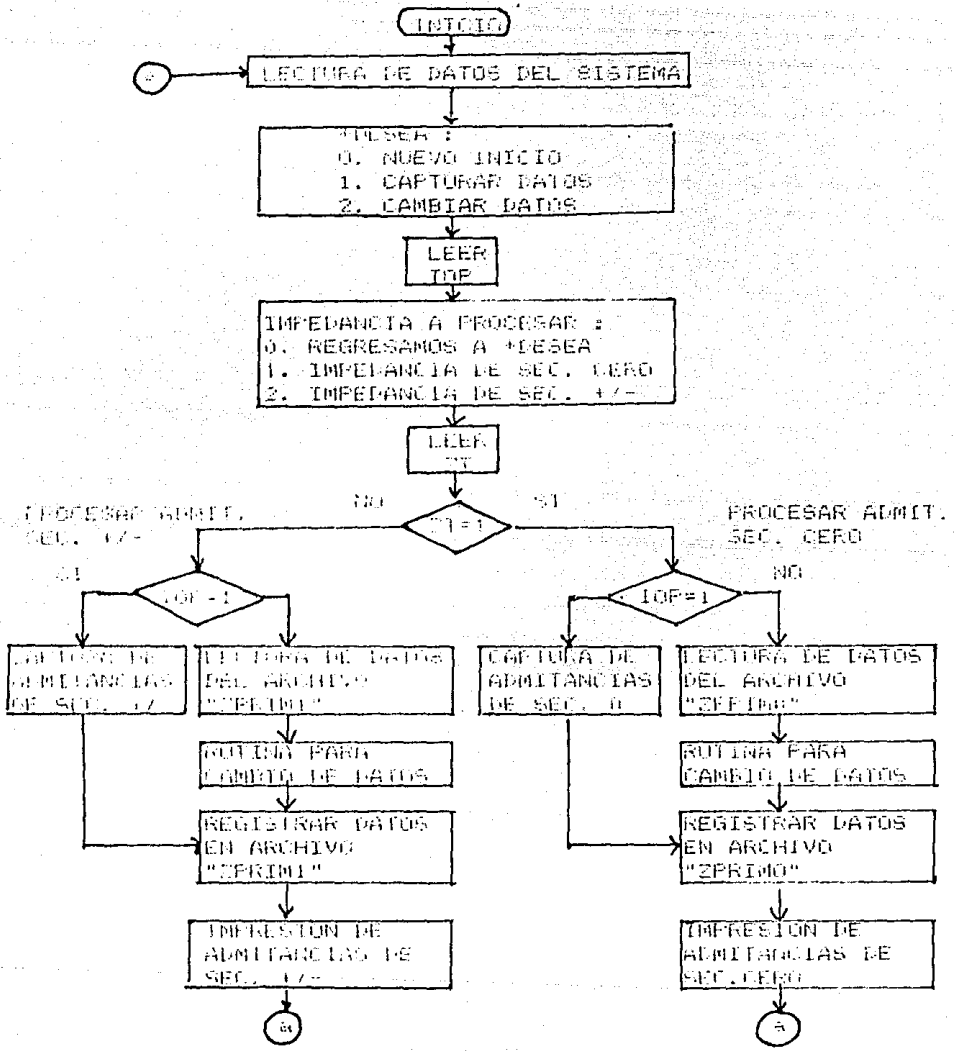


Figura 5.9 Diagrama de Flujoa del Programa SISPOT06

5.3 Cálculo de la Matriz de Impedancia Nodal Z_{BUS} (SISPOT07).

La matriz de impedancia nodal Z_{BUS} puede obtenerse por varios métodos, uno de estos consiste en invertir la matriz de admitancia nodal Y_{BUS} . El método que se empleará en el presente trabajo se basa en un algoritmo que permite obtener la matriz directamente de los parámetros del sistema y del número de buses.

El algoritmo consiste en ir formando la matriz de impedancia por pasos, simulando la construcción de la red agregando un elemento a la vez, tomando como base la gráfica formada a partir de los conceptos de la topología de la red, es decir, al ir agregando elemento por elemento se considera la gráfica para analizar cuando un elemento corresponde a una rama o cuando una unión.

Cada ocasión que se agrega un elemento se forma una matriz para la red parcial.

Una red parcial se representa en forma de diagrama en la figura 5.10.

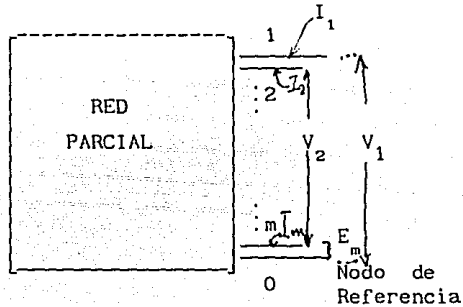


Figura 5.10 Representación de una Red Parcial

La adición de una rama en la figura 5.11 y la adición de una unión en la figura 5.12.

En la figuras 5.11 y 5.12 se designa el elemento que se agrega como elemento p-q.

Si el elemento que se agregue es una rama, se agrega un nuevo bus "q" a la red parcial y la matriz de impedancia resultante es de dimensión $(m + 1) \times (m + 1)$, donde "m" es el número del último bus agregado. Para obtener la nueva matriz de impedancia se requiere sólo el cálculo de los elementos del nuevo renglón y la nueva columna.

Si elemento p-q es una unión, no se agrega nuevo bus a la red parcial. Por consiguiente la dimensión de la matriz no se altera, sin embargo, todos los elementos de la matriz deberán volver a calcularse para incluir los efectos de la unión agregada.

Formúlas Para Agregar Una Rama

En las siguientes formulas se asume que la red consiste de elementos

pasivos y bilaterales. De tal modo $Z_{qi} = Z_{iq}$ donde $i = 1, 2, 3, \dots, m$ y se refiere a los buses de la red parcial, sin incluir el nuevo bus "q". También se asume que el elemento p-q (rama agregada) no está acoplada magnéticamente con los buses restantes de la red parcial.

La matriz de impedancia nodal antes de agregar el elemento p-q tiene la forma

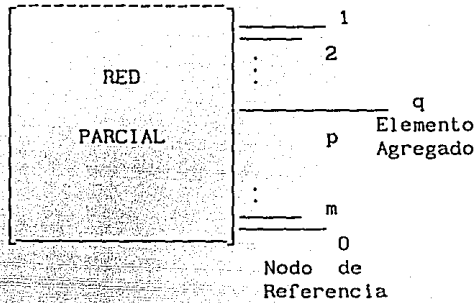


Figura 5.11 Adición de una rama de la Red Parcial

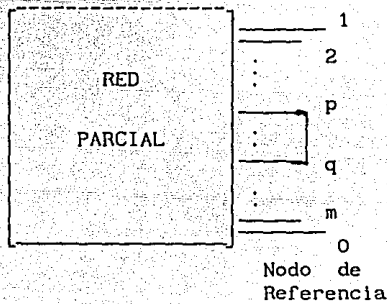


Figura 5.12 Adición de una unión de la Red Parcial

$$\begin{array}{r}
 \begin{array}{cccc}
 & 1 & 2 & p & m \\
 1 & Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1p} & \dots & Z_{1m} \\
 2 & Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2p} & \dots & Z_{2m} \\
 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 p & Z_{p1} & Z_{p2} & \dots & Z_{pp} & \dots & Z_{pm} \\
 & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 m & Z_{m1} & Z_{m2} & \dots & Z_{mp} & \dots & Z_{mm}
 \end{array} \\
 Z = & & & & & & \\
 & & & & & &
 \end{array} \tag{5.1}$$

Si el elemento agregado p-q es una unión, se crea un nodo ficticio "f" que se eliminará después, el proceso es parecido a cuando se agrega una rama pues se crea el renglón y columna "f".

Al crear el nodo ficticio "f" se modifica la red misma, que debe regresar a su estado real, por lo que se implementa un procedimiento que elimine de la matriz creada al nodo "f", y modifique al mismo tiempo al resto de los elementos de la matriz afectada por la introducción del nodo "f".

La red parcial con el nodo ficticio toma la forma que se muestra en la figura 5.13.

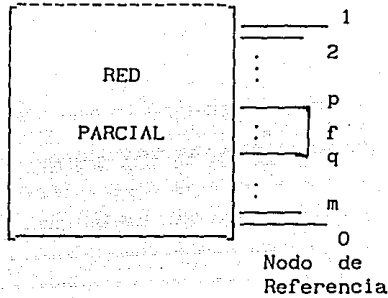


Figura 5.13 Creación del Nodo Ficticio "f"

La matriz de impedancia, antes de agregarle el elemento p-q tiene la forma que se muestra en la ecuación 6.1. Al agregarle el elemento p-q se le agrega el renglón columna "f" debido al nodo ficticio y toma la forma :

$$\begin{matrix}
 & 1 & 2 & \dots & p & \dots & m & \text{"f"} \\
 1 & Z_{11} & Z_{12} & \dots & Z_{1p} & \dots & Z_{1m} & Z_{1f} \\
 2 & Z_{21} & Z_{22} & \dots & Z_{2p} & \dots & Z_{2m} & Z_{2f} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 Z_{BUS} = p & Z_{p1} & Z_{p2} & \dots & Z_{pp} & \dots & Z_{pm} & Z_{pf} \\
 \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\
 m & Z_{m1} & Z_{m2} & \dots & Z_{mp} & \dots & Z_{mm} & Z_{mf} \\
 \text{"f"} & Z_{f1} & Z_{f2} & \dots & Z_{fp} & \dots & Z_{fm} & Z_{ff}
 \end{matrix} \quad (5.5)$$

Los elementos del renglón y columna "f" se obtienen a partir de las siguientes ecuaciones :
 "p" no es el nodo de referencia

$$\begin{aligned} Z_{fi} &= Z_{pi} - Z_{qi} \\ Z_{if} &= Z_{ip} - Z_{iq} \\ i &= 1, 2, \dots, m \\ i &\neq f \end{aligned} \quad (5.6a)$$

"p" es el nodo de referencia

$$\begin{aligned} Z_{fi} &= -Z_{qi} \\ Z_{if} &= -Z_{iq} \\ i &= 1, 2, \dots, m \\ i &\neq f \end{aligned} \quad (5.6b)$$

El elemento de la diagonal principal se obtiene de :

"p" no es el nodo de referencia

$$Z_{ff} = Z_{pf} - Z_{qf} + z_{pq,pq} \quad (5.7a)$$

"p" es el nodo de referencia

$$Z_{ff} = -Z_{qf} + z_{pq,pq} \quad (5.7b)$$

Una vez creado el renglón y columna correspondiente a al nodo ficticio "f", estos deben eliminarse, aunque al momento de eliminarlos deben modificarse los elementos de la matriz Z_{BUS} la ecuación con que se realiza esto es :

$$Z_{ij(nueva)} = Z_{ij(vieja)} - \frac{Z_{if} Z_{rj}}{Z_{ff}} \quad (5.8)$$

donde

$$i = 1, 2, \dots, m$$

$$j = 1, 2, \dots, m$$

Después de aplicar esta ecuación se elimina el renglón y columna "f" y se modifican todos los elementos de la matriz Z_{BUS} , incluyendo de esta forma el efecto de haber agregado el elemento unión p-q.

El programa SISPOT07 realiza todos los cálculos para obtener la matriz de impedancia de secuencia cero, positiva/negativa.

La ejecución del programa se inicia tecleando

RUN "SISPOT07"

Enseguida aparecerá el mensaje :

PROGRAMA QUE OBTIENE LAS MATRICES DE
IMPEDANCIA NODAL (ZBUS) DESECUENCIA
CERO, POSITIVA Y NEGATIVA.

CONTINUAMOS ?
SI o NO ?

Para calcular la matriz Z_{BUS} se debe responder que SI.

Ahora el programa pedirá los datos característicos del sistema :

NUMERO DE ELEMENTOS DE LA RED ?
ELEMENTOS \geq 100 OK?

BASE DEL SISTEMA POR UNIDAD :

POTENCIA BASE EN MVA ?
POTENCIA = ?

Una vez que se han dado todos los datos característicos del sistema, el programa procede a calcular la matriz Z_{BUS} de secuencia cero.

Antes de iniciar el cálculo, el programa hace la lectura de los datos de los elementos de la red de secuencia cero, almacenados en el diskette en el archivo ZPRIMO, para posteriormente calcular la matriz Z_{BUS} , el proceso de cálculo es exactamente el que se ha explicado y consiste en aplicar las ecuaciones (5.3), (5.4), (5.6), (5.7) y (5.8).

Calculada la matriz Z_{BUS} de secuencia cero, es almacenada en el diskette en el archivo ZBUSO.

Ahora el programa procede a calcular la matriz de impedancia Z_{BUS} de secuencia positiva/negativa, al igual que para el cálculo de la matriz de impedancia nodal de secuencia cero, el programa primero hace la lectura de los elementos de la red de Sec. +/- almacenados en el diskette en el archivo ZPRIMI.

Para calcular la matriz de impedancia nodal de Sec. +/- el programa aplica las mismas ecuaciones que utilizó para el cálculo de la matriz Z_{BUS} de secuencia cero.

Obtenida la matriz Z_{BUS} de Sec. +/- es almacenada en el archivo ZBUS1.

Todos los pasos del programa se muestran en forma gráfica en el diagrama de flujo del programa en la figura 5.14

Las matrices Z_{BUS} obtenidas por la computadora para el sistema se proporcionan en la figura 5.15 y 5.16.

5.4 Programas Para el Estudio de Corto Circuito Trifásico

5.4.1 Programa que Realiza Cálculos Para Estudio de Corto Circuito Trifásico (SISPOT08)

Después de obtener las matrices de impedancia nodal de secuencia, si el tipo de corto circuito que se desea estudiar es el trifásico, el programa que se deberá utilizar enseguida es el programa SISPOT08. Este programa realiza todos los cálculos necesarios para determinar :

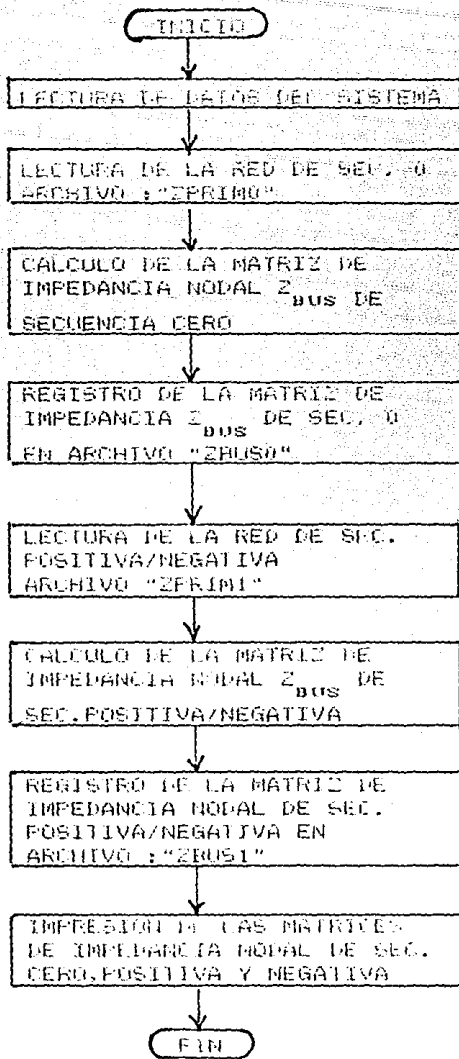


Figura 5.14 Diagrama de Flujo del Programa SISPOT07

BASE :
100 MVA

ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO EN SISTEMAS DE POTENCIA

M A T R I Z Z B U S (SECUENCIA CERO)

RENDON 1

Z 0(1 , 1)= 6.206897E-02
Z 0(1 , 2)= 6.206897E-02
Z 0(1 , 3)= 6.206897E-02

RENDON 2

Z 0(2 , 1)= 6.206897E-02
Z 0(2 , 2)= .192069
Z 0(2 , 3)= .192069

RENDON 3

Z 0(3 , 1)= 6.206897E-02
Z 0(3 , 2)= .192069
Z 0(3 , 3)= .192069

Figura 5.15 Matriz Z_{BUS} (SEC. 0) del Sistema de la Figura 5.2
Calculada con el Programa SISPOT07

NO. :
1000 1144

ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO EN SISTEMAS DE POTENCIA

M A T R I Z Z B U S (SEC. POSITIVA/NEGATIVA)

REGION 1

Z +/- (1 , 1) = 8.253969E-02
Z +/- (1 , 2) = 5.079365E-02
Z +/- (1 , 3) = 3.492863E-02

REGION 2

Z +/- (2 , 1) = 5.079365E-02
Z +/- (2 , 2) = .215873
Z +/- (2 , 3) = .0784127

REGION 3

Z +/- (3 , 1) = 3.492863E-02
Z +/- (3 , 2) = .0784127
Z +/- (3 , 3) = .1301567

Figura 5.16 Matriz Z_{BUS} (SEC. +/-) del Sistema de la Figura 5.2
Calculada con el Programa SISPO7

- La corriente total en el bus de falla
- Los voltajes en los buses durante la falla
- Las corrientes en el sistema durante la falla

Los datos que deben prepararse antes de ejecutar este programa son : la matriz de impedancia nodal de secuencia positiva, los datos de la red capturados con el programa SISPOT06 y el número del bus de falla ; si falta alguno de estos datos, este programa no podrá ser utilizado.

La ejecución del programa se inicia tecleando :

RUN"SISPOT08"

apareciendo a continuación el mensaje :

PROGRAMA QUE REALIZA CALCULOS PARA
LLEVAR A CABO UN ESTUDIO DE CORTO
CIRCUITO TRIFASICO.

ESTE PROGRAMA OBTIENE :

1. LA CORRIENTE TOTAL EN EL BUS DE FALLA
2. VOLTAJE EN LOS BUSES DURANTE LA FALLA
3. CORRIENTES EN EL SISTEMA DURANTE LA FALLA

CONTINUAMOS ?
SI o NO ?

Deber contestarse que SI para continuar la ejecución del programa.

Ahora el programa solicita algunos datos característicos del sistema, estos son:

NUMERO DE ELEMENTOS DE LA RED ?
ELEMENTOS >= 100 OK ?

NUMERO (<= 30) DE BUSES DE LA RED ?
▪ INCLUYA EL DE REFERENCIA ▪ ?

Enseguida pide el numero del bus donde ocurre el corto circuito.

NUMERO DEL BUS DONDE OCURRE LA FALLA ?

Después de leer este dato, el programa procede a leer los datos almacenados en los archivos desde el diskette. El primer archivo que se lee, es el archivo donde esta la matriz de impedancia nodal de secuencia positiva (archivo ZBUS1) y después hace la lectura de los datos de la red de secuencia positiva (archivo ZPRIM1).

Una vez que se han leído todos los datos del programa, se inicia la fase de cálculo. Los resultados se obtienen primero en componentes simétricas y después son transformados a valores por fase utilizando las matrices de transformación.

El primer cálculo que se realiza es con el fin de obtener la corriente en el bus de falla, esta corriente se obtiene por medio de la ecuación (4.18).

Debe hacerse la aclaración que en todos los cálculos, tanto en los de corto circuito trifásico, como en los de corto circuito de línea a tierra, se supone que la impedancia de falla (Z_f) es igual a cero.

Después de calcular la corriente de falla en el bus de falla, el programa calcula los voltajes en los buses durante la falla, esto lo hace usando la ecuación (4.24).

Finalmente, se hace el cálculo de las corrientes en el sistema durante la falla, el cálculo de estas ecuaciones lo permite la ecuación (4.26).

Obtenidos los resultados en componentes simétricas, éstos son transformados a valores por fase. Para determinar la corriente y voltaje por fase en el bus de falla, se hace uso de las ecuaciones (4.19) y (4.22) respectivamente. Para obtener los voltajes por fase en los buses se utiliza la ecuación (4.25) y para determinar las corrientes por fase en el sistema se usa la ecuación (4.28).

Transformados los datos a valores por fase, el programa los registra inmediatamente en archivos en el diskette, para que desde allí puedan ser tomados por el siguiente programa, que es el que lista todos los resultados obtenidos con este programa.

Los primeros resultados que se registran, son la corriente y el voltaje en el bus de falla, este resultado una vez calculado se almacenan en el archivo BUSF3. Calculados los voltajes en el sistema durante la falla, estos se registran en el archivo VOLT3, y finalmente obtenidas las corrientes en el sistema, estas son registradas en el archivo CORF3.

En el diagrama de flujo de la figura 5.17 se representa la secuencia de operaciones ejecutadas por el programa SISPOT08.

5.4.2 Programa que Lista Resultados Finales del Estudio de Corto Circuito Trifásico (SISPOT09)

El paso final del estudio de corto circuito trifásico, es la impresión de los resultados del estudio, estos resultados son los calculados por el programa SISPOT08.

Se inicia la ejecución del programa tecleando :

```
RUN "SISPOT09"
```

apareciendo enseguida el mensaje :

```
PROGRAMA QUE IMPRIME RESULTADOS DEL  
ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO TRIFASICO
```

```
CONTINUAMOS ?
```

```
SI o NO ?
```

Se responde que SI para continuar con el proceso. El siguiente paso del programa es la lectura de los datos característicos del sistema, estos datos son :

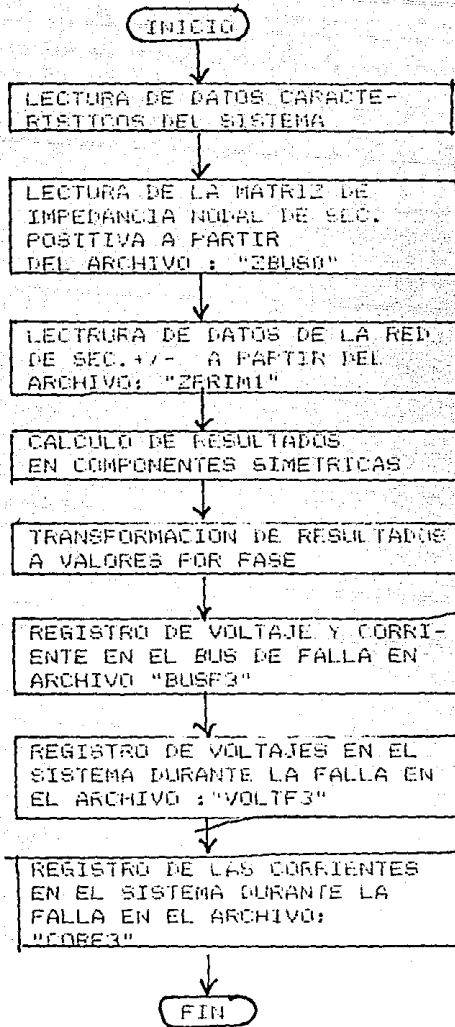


Figura 5.17 Diagrama de Flujo del Programa SISPOT08

NUMERO DE ELEMENTOS DE LA RED ?
ELEMENTOS \geq 100 OK ?

NUMERO (\leq 30) DE BUSES DEL SISTEMA?
* INCLUYA EL BUS DE REFERENCIA * ?

BASE DEL SISTEMA POR UNIDAD :
POTENCIA BASE EN MVA?
POTENCIA =?

después de esto, el programa solicita el número del bus en que ocurre el corto circuito, desplegando el mensaje :

NUMERO DEL BUS DONDE OCURRE LA FALLA ?

Ahora el program inicia la lectura de los resultados que están almacenados en el diskette. Estos resultados son : el voltaje y la corriente en el bus de falla, almacenados en el archivo BUSF3, los voltajes en todos los buses del sistema, almacenados en el archivo VOLTFF3, y finalmente, las corrientes en el sistema, almacenados en el archivo CORFF3.

Hecha la lectura de todos los resultados, el programa inicia la impresión. La impresión de la corriente y el voltaje en el bus de falla, tiene la forma mostrada en la figura 5.18, los voltajes en los buses del sistema se muestran en la figura 5.19 y las corrientes en el sistema en la figura 5.20.

Los resultados indicados en las figuras 5.18, 5.19 y 5.20 son los resultados de un estudio de corto circuito para el sistema de la figura 5.2, cuando ocurre un corto circuito en el bus 1.

El diagrama de flujo del programa se muestra en la figura 5.21.

5.5 Programas Para el Estudio de Corto Circuito de Línea a Tierra

5.5.1 Programa que Realiza cálculos Para Estudio de Corto Circuito de Línea a Tierra (SISPOT10)

Si el tipo de corto circuito que se desea analizar es un corto circuito de línea a tierra, el programa que deberá utilizarse después de calcular las matrices de impedancia nodal, debe ser el programa SISPOT10 (reflerase a la figura 5.1). Este programa es el que desarrolla todos los cálculos necesarios para encontrar :

La corriente total en el bus de falla
Los voltajes en todos los buses durante la falla
Las corrientes en el sistema durante la falla

la ejecución de este programa se inicia tecleando

RUN "SISPOT10"

C. E. C. F. I.

PVA

ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO EN SISTEMAS DE POTENCIA

EJEMPLO: FALLA TRIFÁSICA - FIG. 5.18

CORRIENTE Y VOLTAJE EN EL BUS DE FALLA
BUS DE FALLA 1

$$I_A = 12.11530 \angle 0$$

$$I_B = 12.11530 \angle 240$$

$$I_C = 12.11530 \angle 120$$

$$V_A = 0 \angle 0$$

$$V_B = 0 \angle 0$$

$$V_C = 0 \angle 0$$

Figura 5.18 Corriente y Voltaje en el Bus de Falla

ESTUDIO DE CORTE CIRCUNTO EN SISTEMAS DE POTENCIA

**** FALLA TRIFÁSICA ****

VOLTAJES EN LOS BUSES DURANTE LA FALLA
BUS DE FALLA 1

BUS NUMERO	VA	*** V D L T A J E S VB	*** VC
0	1 / 0	1 / 240	1 / 120
1	0 / 0	0 / 0	0 / 0
2	.3846154 / 0	.3846154 / 240	.3846154 / 120
3	.5769232 / 0	.5769232 / 240	.5769232 / 120

Figura 5.19 Voltajes en los Buses del Sistema Durante la Falla.

D E P O S I

TÍTULO :
170 - IMA

ESTUDIO DE CIRCUITO EN SISTEMAS DE POTENCIA

***** FALLA TRIFÁSICA *****

CORRIENTES EN EL SISTEMA DURANTE LA FALLA
BUS DE FALLA 1

ELEMENTO NÚMERO	NODO P SALIDA	NODO Q LLEGADA	C O R R I E N T E S		
			IA	IB	IC
1	0	1	10 / 0	10 / 240	10 / 120
2	0	3	2.115384 / 0	2.115384 / 240	2.115384 / 120
3	1	2	-0.9615385 / 0	-0.9615385 / 240	-0.9615385 / 120
4	1	3	-1.153846 / 0	-1.153846 / 240	-1.153846 / 120
5	2	3	-0.9615389 / 0	-0.9615389 / 240	-0.9615389 / 120

Figura 5.20 Corrientes en el Sistema Durante la Falla

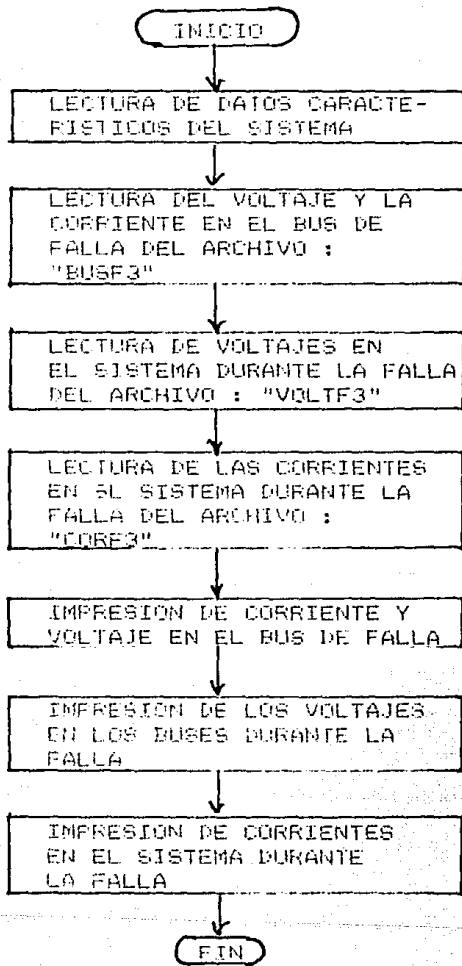


Figura 5.21 Diagrama de Flujo del Programa SISPOT09.

apareciendo a continuación el mensaje :

PROGRAMA QUE REALIZA CALCULOS PARA
LLEVAR A CABO UN ESTUDIO DE CORTO
CIRCUITO DE LINEA A TIERRA

ESTE PROGRAMA OBTIENE :

1. CORRIENTE TOTAL EN EL BUS DE FALLA
2. VOLTAJES EN LOS BUSES DURANTE LA FALLA
3. CORRIENTES EN EL SISTEMA DURANTE LA FALLA

CONTINUAMOS ?

SI o NO ?

Se debe responder que SI para seguir con la ejecución del programa.

El programa solicitará ahora los datos característicos del sistema, estos datos son :

NUMERO DE ELEMENTOS DE LA RED?
ELEMENTOS \leq 100 OK ?

NUMERO (\leq 30) DE BUSES DEL SISTEMA?
* INCLUYA EL BUS DE REFERENCIA * ?

y finalmente pedirá, el número del bus donde ocurre el corto circuito, éste dato lo pide con el mensaje :

NUMERO DEL BUS DONDE OCURRE LA FALLA ?

Después de que se le dan todos los datos por medio del teclado, el programa pasa a hacer la lectura de los demás datos que necesitará, y que se encuentran almacenados en los archivos en el diskette.

La matriz de impedancia nodal de secuencia cero , es leída a partir del archivo ZBUS0, y la de secuencia positiva/negativa del archivo ZBUS1, también son tomados desde el diskette los datos de la red de secuencia positiva/negativa, estos datos se almacenaron previamente en el archivo ZPRIM1.

Una vez que se han leído todos los datos, el programa procede a realizar los cálculos, los resultados que obtiene el programa inicialmente, se obtienen en componentes simétricas. El primer cálculo que se realiza es para obtener la corriente y el voltaje en el bus de falla, la corriente se obtiene utilizando la ecuación (4.34) y el voltaje se obtiene utilizando la ecuación (4.36).

El cálculo de los voltajes en los buses del sistema se hace utilizando la ecuación (4.38) y el cálculo de las corrientes se hace por medio de la ecuación (4.26).

Obtenidos los resultados en componentes simétricas el siguiente paso es transformarlos a valores por fase. El cálculo de la corriente y voltaje en el bus de falla se hace utilizando las ecuaciones (4.35) y (4.37) respectivamente. El cálculo de los voltajes en los buses en valores por fase se hace usando la ecuación (4.39) y finalmente el cálculo de las corrientes se hace usando la ecuación (4.41).

Después de obtener los valores por fase, éstos son almacenados en archivos

en el diskette, para que desde allí pudan ser tomados por el programa SISPOT11 que es el que imprime .

La corriente y el voltaje en el bus de falla se almacenan en el archivo BUSF1, los voltajes de fase en los buses son almacenados en el archivo VOLTf1 y finalmente las corrientes en el sistema son almacenadas en el archivo CORF1.

Toda la secuencia de operaciones del programa SISPOT10, se representa en forma gráfica en el diagrama de flujo de la figura 5.22.

5.5.2 Programa que Lista Resultados Finales del Estudio de Corto Circuito de Línea a Tierra (SISPOT11)

El programa SISPOT11 imprime los resultados del estudio de corto circuito de línea a tierra. La ejecución de este programa se inicia tecleando :

```
RUN "SISPOT11"
```

enseguida aparecerá el desplegado en pantalla :

```
PROGRAMA QUE IMPRIME RESULTADOS  
DEL ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO DE  
LINEA A TIERRA
```

```
CONTINUAMOS ?  
SI o NO ?
```

Se debe responder SI para seguir ejecutando el programa.

A continuación son solicitados los datos característicos del sistema :

```
NUMERO DE ELEMENTOS DE LA RED ?  
ELEMENTOS <= 100 OK?
```

```
NUMERO (<= 30 ) DE BUSES DEL SISTEMA?  
* INCLUYA EL BUS DE REFERENCIA *?
```

```
BASE DEL SISTEMA POR UNIDAD :
```

```
POTENCIA BASE EN MVA ?  
POTENCIA =?
```

después se pide el número del bus donde ocurre el corto circuito

```
NUMERO DEL BUS DONDE OCURRE LA FALLA ?
```

Proporcionados todos los datos anteriores por medio del teclado, el programa inicia la lectura de los resultados, almacenados en los archivos en el diskette. Lo primero que lee el programa es la corriente y el voltaje en el bus de falla, estos datos como se señaló, se almacenarán previamente en el archivo BUSF1. Los siguientes datos que son leídos desde el diskette son los

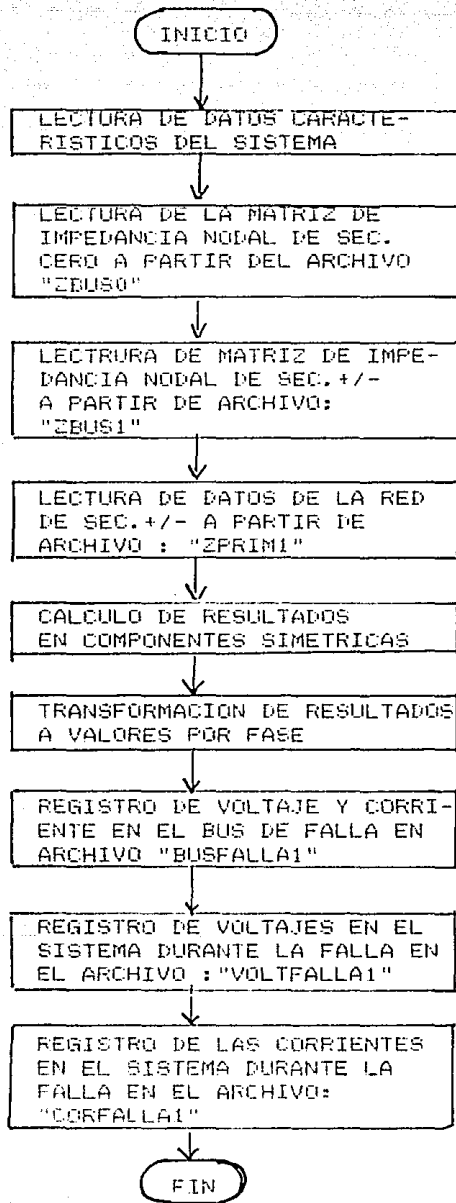


Figura 5.22 Diagrama de Flujo del Programa SISPOT10

voltajes en el sistema durante la falla, estos datos como se indicó, fueron almacenados por el programa SISPOT10 en el archivoVOLTFF1 y finalmente, se hace la lectura que contiene las corrientes de falla de la red.

Una vez que se han leído todos los datos del sistema, se inicia, la impresión, la impresión de los resultados para el sistema de la figura 6.2, para una falla de línea a tierra en el bus 1, se indican en las figuras 5.23, 5.24 y 5.25.

La secuencia de pasos ejecutados por el programa SISPOT11, se representa en forma gráfica en el diagrama de flujo de la figura 5.26.

FECHA:
02/09/2008

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PÁG. 3

NOMBRE:
100 NVA

D E P O S I T O

ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO EN SISTEMAS DE POTENCIA

**** FALLA DE LINEA A TIERRA ****

CORRIENTE Y VOLTAJE EN EL BUS DE FALLA
BUS DE FALLA 1

IA = 13.20723 / 0

IB = 0 / 0

IC = 0 / 0

VA = 0 / 0

VB = .9921028 / 244.6716

VC = .9581008 / 115.3285

Figura 5.23 Corriente y Voltaje en el Bus de Falla

D E P O S I T O

PAGE :
100 MVA

ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO EN SISTEMAS DE POTENCIA

***** FALLA DE LINEA A TIERRA *****

VOLTAJES EN LOS BUSES DURANTE LA FALLA
BUS DE FALLA 1

BUS NUMERO	*** VA	V O L T I A J E S VB	*** VC
0	1 / 0	.999978 / 239.9991	.999978 / 120.0009
1	0 / 0	.9981028 / 244.6716	.9981028 / 115.3285
2	.2795182 / 0	1.025699 / 237.5971	1.025699 / 122.4029
3	.4192772 / 0	1.064781 / 234.4268	1.064781 / 125.5733

Figura 5.24 Voltajes en los Buses del Sistema Durante la Falla.

FECHA:
DD/MM/AA:

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

PAG. 1

D E P E I

BASE:
100 MVA

ESTUDIO DE CORTO CIRCUITO EN SISTEMAS DE POTENCIA

***** FALLA DE LINEA A TIERRA *****

CORRIENTES EN EL SISTEMA DURANTE LA FALLA
BUS DE FALLA 1

ELEMENTO NUMERO	NODO P SALIDA	NODO Q LLEGADA	C O R R I E N T E S		
			IA	IB	IC
1	0	1	10.30361 / 90.0	-5.975908 / 90.0	-5.975908 / 90.0
2	0	3	1.537349 / 90.0	-7.685746 / 90.0	-7.685746 / 90.0
3	1	2	-6.987955 / 90.0	.3493977 / 90.0	.3493977 / 90.0
4	1	3	-8.355543 / 90.0	.4192772 / 90.0	.4192772 / 90.0
5	2	3	-6.98795 / 90.0	.3493975 / 90.0	.3493975 / 90.0

Figura 5.25 Corrientes en el Sistema Durante la Falla

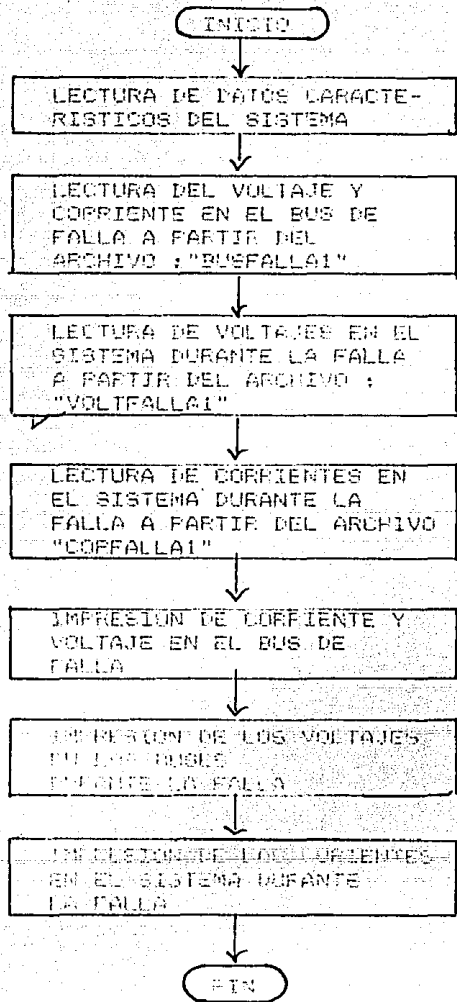


Figura 5.26 Diagrama de Flujo del Programa SISPO11.

REFERENCIAS

GROSS, Charles A.

"Power System Analysis"

Jhon Wiley & Sons 1979.

GLOVER, Duncan J., Sarma Mulukutla.

"Power System Analysis and Design"

PWS-KENT 1987.

STAGG, Glenn W. - El-Abiad, Ahmed H.

"Computer Methods in Power System Analysis"

New York, McGraw Hill, 1977.

STEVENSON, William D.

"Análisis de Sistemas Electricos de Potencia"

México, McGraw hill, 1979.

WEEDY, B. M.

"Electric Power System"

Londres, Jhon Wiley & Sons, 1972.