



**ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL**  
**Facultad de Ingeniería Eléctrica**



"FLUJO DE CARGA EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCION CON MODELOS DE CARGA Y TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION DE VOLTAJE"

**TESIS DE GRADO**  
Previa a la obtención del Título de:  
**INGENIERO EN ELECTRICIDAD**

Especialización: **POTENCIA**

Presentado por:  
**Oscar Xavier Quevedo García**

Guayaquil - Ecuador  
1.989

## AGRADECIMIENTO

Al Ing. Cristóbal Mera G. -

Director de tesis, y a todas aquellas personas que de una u otra forma, colaboraron en la realización del presente trabajo.-

.....

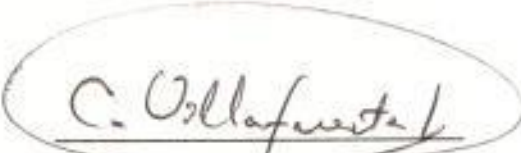
# DEDICATORIA

- A MIS PADRES
- A MI ESPOSA
- A MIS HERMANOS

A dense, dark, handwritten scribble consisting of many overlapping, chaotic lines, likely representing a signature or initials. It is positioned above a horizontal dashed line.

ING. CRISTOBAL MERA G.

DIRECTOR DE TESIS



C. Villafuerte P.

ING. CARLOS VILLAFUERTE P.  
SUBDECANO DE LA FACULTAD  
DE INGENIERIA ELECTRICA



ING. CRISTOBAL MERA G.

DIRECTOR DE TESIS



Jorge Flores M.

ING. JORGE FLORES M.  
MIEMBRO PRINCIPAL DEL  
TRIBUNAL DE GRADO



Jorge Chiriboga

ING. JORGE CHIRIBOGA  
MIEMBRO PRINCIPAL DEL  
TRIBUNAL DE GRADO

## DECLARACION EXPRESA

---

"La responsabilidad por los hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis, me corresponden exclusivamente; y, el patrimonio intelectual de la misma, a la, ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL"

(Reglamento de Exámenes y Titulos Profesionales de la  
E S P O L ).



---

OSCAR XAVIER QUEVEDO GARCIA

## RESUMEN

Los Sistemas de Distribución están compuestos por una serie de elementos desbalanceados, y así mismo las cargas que generalmente son desbalanceadas son dependientes de las variaciones de voltaje que existan; por lo que para analizar el comportamiento de dichos sistemas es necesario desarrollar un sistema que permita considerar las tres fases independientemente.

Esta tesis trata sobre la aplicación del cálculo de FLUJO DE CARGA modelando la misma y todos los elementos del Sistema de Distribución como variables dependientes del voltaje.

En el Capítulo I se describirán conceptos básicos para poder realizar un cálculo de Flujo de Carga.

El Capítulo II tratará sobre el modelaje mismo de los elementos que conforman un Sistema Eléctrico. Esto es como serán simuladas las líneas de distribución tanto trifásicas como monofásicas de dos y una fase. También

se buscará el modelo de un banco de transformadores, un banco de capacitores y un regulador de voltaje.

El Capítulo III ya trata más profundamente el desarrollo del Flujo de Carga, mediante el método de la escalera como solución a este tipo de problemas.

El Capítulo IV nos indica cuál es el procedimiento que debemos seguir para ser un usuario del programa.

También se indica cuál es el diagrama de flujo para la realización del programa.

En el Capítulo V se compararán los resultados de esta aplicación con otros desarrollados anteriormente, los cuales consideran la carga como constante, e independiente de la variación del voltaje de barras.

Como parte final de esta monografía se enunciarán algunas conclusiones y recomendaciones para quienes sean usuarios de esta aplicación.



## INDICE GENERAL

|                         | PAGINA |
|-------------------------|--------|
| RESUMEN -----           | VI     |
| INDICE GENERAL -----    | VIII   |
| INDICE DE FIGURAS ----- | XII    |
| INDICE DE TABLAS -----  | XV     |
| INTRODUCCION -----      | 17     |

### CAPITULO I

FLUJO DE CARGA TRIFASICO EN LOS SISTEMAS DE  
DISTRIBUCION.

1.1. Conceptos básicos y definición del flujo  
de carga trifásico en los sistemas de  
distribución -----

|  |    |
|--|----|
| 1.2. Análisis de los flujos de carga<br>existentes ----- | 20 |
|--|----|

## Capítulo II

DESCRIPCION Y MODELAJE DE LOS ELEMENTOS QUE  
QUE CONFORMAN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCION.

|   |    |
|---|----|
| 2.1. Descripción de los elementos de un Sis-<br>tema de Distribución. -----         | 22 |
| 2.1.1. Líneas de Distribución de tres ,<br>dos y una fase. -----                    | 23 |
| 2.1.2. Bancos de capacitores. -----   | 46 |
| 2.1.3. Transformadores de Distribución-   | 47 |
| 2.1.4. Cargas eléctricas en función del<br>voltaje de barras. -----                 | 49 |
| 2.1.5 Reguladores de voltaje en barras<br>y líneas. -----                           | 54 |
| 2.2. Modelaje de los elementos que conforman<br>los Sistemas de Distribución. ----- | 58 |

## CAPITULO III

## PAGINA

## METODO DE SOLUCION DEL PROBLEMA.

|  |    |
|--|----|
| 3.1. Método de solución del Flujo de Carga Trifásico. -----                        | 65 |
| 3.1.1. Solución de circuitos monofásicos no lineales. -----                        | 65 |
| 3.1.2. Solución de circuitos monofásicos con ramificaciones laterales              | 72 |
| 3.1.3 Solución de Sistemas Trifásicos radiales. -----                              | 76 |
| 3.2. Formulación de Y barra utilizando ordenamiento y almacenamiento óptimo. ----- | 80 |

## CAPITULO IV

ELABORACION DEL PROGRAMA PARA RESOLVER EL FLUJO DE CARGA TRIFASICO EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCION; APLICADO A UN COMPUTADOR PERSONAL.

|                              |    |
|------------------------------|----|
| 4.1. Generalidades. -----    | 87 |
| 4.2. Ingreso de datos. ----- | 91 |

|                                 | PAGINA |
|---------------------------------|--------|
| 4.3. Proceso iterativo. -----   | 92     |
| 4.4 Salida de resultados. ----- | 108    |
| 4.5 Listado del programa. ----- | 109    |

## CAPITULO V

### ANALISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS Y EJEMPLOS DE APLICACION.

|   |     |
|---|-----|
| 5.1. Comparación con los resultados de un Flujo de Carga por fase y modelo de carga constante. -----  | 111 |
| 5.2. Comparación con los resultados de un Flujo de Carga trifásico y modelo de carga constante. ----- | 121 |
| 5.3. Ejemplos de aplicación. -----  | 129 |
| <br>  |     |
| CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. -----   | 136 |
| APENDICES. -----  | 139 |
| BIBLIOGRAFIA. -----   | 158 |

## INTRODUCCION

En países como el nuestro en vías de desarrollo los Sistemas de Distribución están en constante expansión, por lo que los Ingenieros encargados de planificar los trabajos de ampliación y desarrollo deben tener una herramienta que les permita hacer un análisis muy preciso del comportamiento del sistema en lo referente a operación económica y eficiente del despacho de carga. Esta herramienta se llama FLUJO DE CARGA.

Desde la década de los años 30 se ha venido desarrollando y perfeccionando este cálculo. Con el advenimiento de las computadoras personales y de su masivo uso se ha tratado de emigrar hacia esta aplicación, ya que su maniobrabilidad hace que ya no se tenga que depender de un gran computador que procese la información que se desea analizar sino que talvez en el sitio mismo donde se requiera un cálculo de Flujo de Carga se pueden establecer ciertos parámetros, que influirán grandemente en la ampliación o construcción del Sistema de Distribución.

El objetivo de esta tesis es desarrollar un programa para computadora personal que calcule el Flujo de Carga considerando los elementos de los Sistemas de Distribución dependientes de la variación del voltaje de barras. La mayoría de los programas desarrollados consideran a cada uno de los elementos del Sistema como constantes.

Se utilizará el método de la escalera como solución al problema de Flujo de Carga. Este considera un voltaje en un punto dado y a partir de éste se va calculando la corriente en cada uno de los ramales al igual que la caída de voltaje según sea el caso, hasta llegar a la barra de oscilación, determinando el error existente para hacer uso de éste como instrumento de convergencia de la aplicación.

El programa se lo desarrollará en lenguaje FORTRAN IV y se compararán los resultados con los de otras aplicaciones.

## CAPITULO I

FLUJO DE CARGA TRIFASICO EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCION.

1.1. CONCEPTOS BASICOS Y DEFINICION DEL FLUJO DE CARGA TRIFASICO EN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCION.

El cálculo de flujo de carga nos da como resultado los datos de voltaje, corriente y potencia de un sistema ya sea este de transmisión o de subtransmisión.

Este nos permitirá determinar el comportamiento del sistema bajo las condiciones dadas.

Los elementos de los sistemas de distribución, objeto del análisis de esta tesis, están compuestos de líneas de distribución, reguladores de voltaje, bancos de capacitores y las cargas. El modelaje de éstos elementos se lo hará en el siguiente capítulo.

El solucionar el flujo de carga mediante este método implica que se deberán tener datos y se obtendrán resultados de cada una de las fases del sistema. Esto nos permitirá tener una mejor visión, ya que por lo general se realiza tanto el análisis como el cálculo por fase o unifilarmente.

Mediante el método de la escalera se obtendrá una resolución mucho más rápida que los otros métodos de cálculo de flujo de carga.

#### 1.2. ANALISIS DE LOS FLUJOS DE CARGA EXISTENTES.

Actualmente se tienen a mano muchos programas para computadoras para calcular el Flujo de Carga para Sistemas de Transmisión y de Subtransmisión o Distribución. La mayoría de estas aplicaciones se basan en la hipótesis de que los Sistemas son perfectamente balanceados, pero en la realidad no tenemos esto.

Para obtener un resultado con uno de estos modelos se debe asumir que las corrientes de las tres fases están perfectamente balanceadas y que las li-



neas que transmiten la energía eléctrica deben estar transpuestas a lo largo de su recorrido.

Podemos aceptar que los resultados de éstos métodos son confiables para sistemas de transmisión en los que estas consideraciones son válidas.

Los sistemas de distribución están por su misma naturaleza constituidos por elementos desbalanceados, la carga es desbalanceada debido a que los usuarios no tienen perfectamente balanceadas sus instalaciones.

Si se desea calcular el flujo de carga por este método se obtendrán resultados poco confiables, en otras palabras los resultados no coincidirán con las mediciones de operación del sistema.

En conclusión se debe calcular el flujo de carga considerando la carga constante, para los sistemas de transmisión eléctrica. Para sistemas de subtransmisión o de distribución se debe aplicar el método trifásico considerando la carga variable.

## CAPITULO II

DESCRIPCION Y MODELAJE DE LOS ELEMENTOS QUE CONFORMAN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCION.

2.1. DESCRIPCION DE LOS ELEMENTOS DE UN SISTEMA DE DISTRIBUCION.

Uno de los elementos que conforman un sistema de distribución son las líneas de transporte de energía eléctrica; por lo general están a alta tensión. Esto se lo hace así para evitar pérdidas de potencia en las líneas. Estas pueden ser de una o tres fases. Para líneas de una y dos fases debe existir un hilo de neutro, para que sirva de retorno. En caso de que una línea trifásica sea completamente desbalanceada también habrá una línea de retorno.

Otro de los elementos son las impedancias tanto resistivas como inductivas. Siendo los efectos de acoplamiento tomados como impedancia.

Para determinar las impedancias propias y mutuas se aplican las ecuaciones de CARSON en un sistema trifásico aterrizado.

En los métodos tradicionales se asume que las líneas están completamente transpuestas y que las corrientes están balanceadas. Los cálculos de las impedancias serán expuestas posteriormente.

#### 2.1.1. LINEAS DE DISTRIBUCION DE TRES, DOS Y UNA FASE

##### Líneas de tres fases

Para determinar el modelo matemático de una línea de distribución trifásica, debemos conocer que está conformado por tres hilos, más un conductor de neutro aterrizado y la tierra.

El modelo de este tipo de línea lo apreciamos en la figura N° 2.1.1.

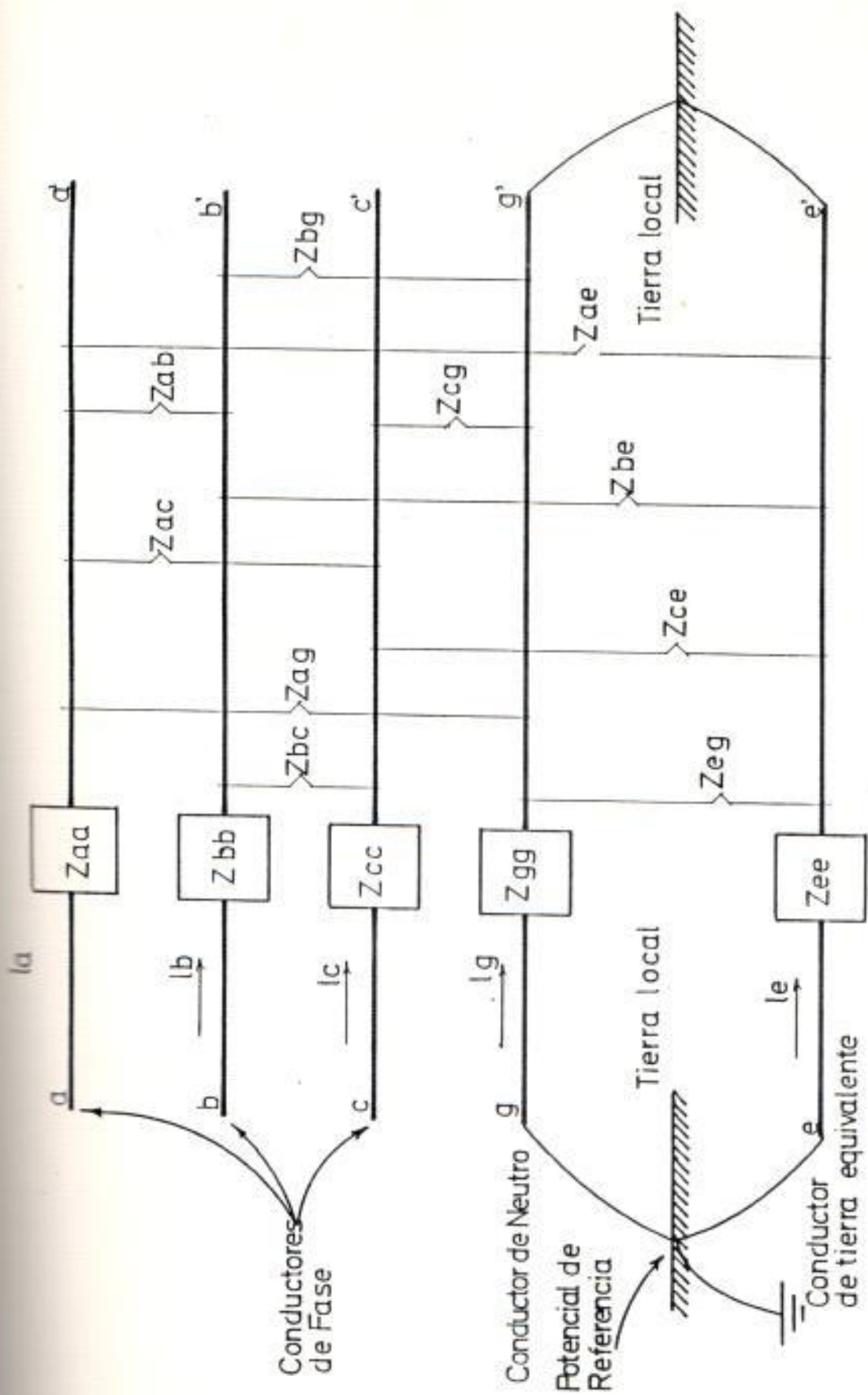


FIGURA N° 2.11. MODELO DE LINEA DE DISTRIBUCION DE TRES FASES

Los voltajes mostrados se refieren al potencial de referencia indicado.

Las caídas de tensión en cada conductor se la debe expresar en términos de las corrientes ( $I_a$ ,  $I_b$ ,  $I_c$ ,  $I_e$ ), y de las impedancias propias y mutuas de los conductores.

Las ecuaciones de cálculo de las caídas de voltaje a través de los conductores son :

$$V_a - V_a' = I_a \cdot Z_{aa} + I_b \cdot Z_{ab} + I_c \cdot Z_{ac} + I_g \cdot Z_{ag} + I_e \cdot Z_{ae}.$$

$$V_b - V_b' = I_a \cdot Z_{ba} + I_b \cdot Z_{bb} + I_c \cdot Z_{bc} + I_g \cdot Z_{bg} + I_e \cdot Z_{be}.$$

$$V_c - V_c' = I_a \cdot Z_{ca} + I_b \cdot Z_{cb} + I_c \cdot Z_{cc} + I_g \cdot Z_{cg} + I_e \cdot Z_{ce}.$$

$$V_g - V_g' = I_a \cdot Z_{ga} + I_b \cdot Z_{gb} + I_c \cdot Z_{gc} + I_g \cdot Z_{gg} + I_e \cdot Z_{ge}.$$

$$V_e - V_e' = I_a \cdot Z_{ea} + I_b \cdot Z_{eb} + I_c \cdot Z_{ec} + I_g \cdot Z_{eg} + I_e \cdot Z_{ee}. \quad ( 1 )$$

Estas ecuaciones se las puede enunciar en forma matricial :

$$\begin{bmatrix} V_a - V_{a'} \\ V_b - V_{b'} \\ V_c - V_{c'} \\ V_g - V_{g'} \\ V_e - V_{e'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ac} & Z_{ag} & Z_{ae} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bg} & Z_{be} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cg} & Z_{ce} \\ Z_{ga} & Z_{gb} & Z_{gc} & Z_{gg} & Z_{ge} \\ Z_{ea} & Z_{eb} & Z_{ec} & Z_{eg} & Z_{ee} \end{bmatrix} \star \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_g \\ I_e \end{bmatrix} \quad ( 2 )$$

Definamos los voltajes de línea con referencia al potencial de tierra (  $V_e$  y  $V_{e'}$ , respectivamente ).

$$V_a = V_a - V_e = V_{ae}$$

$$V_b = V_b - V_e = V_{be}$$

$$V_c = V_c - V_e = V_{ce}$$

( 3 )

Los potenciales de tierra y neutro están relacionados de la siguiente manera:

$$V_g = V_g - V_e = 0$$

$$V_e = V_e - V_e = 0$$

$$V_{g'} = V_{e'} = 0$$

( 4 )

De las ecuaciones anteriores se obtiene :

$$\begin{bmatrix} V_{ae}-V_{a'} \\ V_{be}-V_{b'} \\ V_{ce}-V_{c'} \\ 0 -V_{e'} \\ 0 -V_{e'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ca} & Z_{ag} & Z_{ac} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bc} & Z_{bg} & Z_{be} \\ Z_{ca} & Z_{cb} & Z_{cc} & Z_{cg} & Z_{ce} \\ Z_{ga} & Z_{gb} & Z_{gc} & Z_{gg} & Z_{ge} \\ Z_{ea} & Z_{eb} & Z_{ec} & Z_{eg} & Z_{ee} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_g \\ I_e \end{bmatrix} \quad ( 5 )$$

Se conoce por la ley de Kirchhoff que :

$$I_a + I_b + I_c + I_g + I_e = 0 \quad ( 6 )$$

Si despejamos la corriente tierra ( $I_e$ ) :

$$I_e = - I_a - I_b - I_c - I_g \quad ( 7 )$$

Para reducir la matriz (5), se deberá restar la fila cinco con las diferentes líneas.

Fila 1 - Fila 5 :

$$V_{ae}-V_{a'}+V_{e'} =$$

$$\begin{aligned} & I_a * Z_{aa} + I_b * Z_{ab} + I_c * Z_{ac} + I_g * Z_{ag} + I_e * Z_{eg} \\ & - I_a * Z_{ea} - I_b * Z_{eb} - I_c * Z_{ec} - I_g * I_{eg} - I_e * Z_{ee} \end{aligned} \quad ( 8 )$$

$$\begin{aligned}
V_{ae}-V_{a'e'} &= I_a*(Z_{aa} - Z_{ea} - Z_{ae} + Z_{ee}) \\
&+ I_b*(Z_{ab} - Z_{eb} - Z_{ae} + Z_{ee}) \\
&+ I_c*(Z_{ac} - Z_{ec} - Z_{ae} + Z_{ee}) \\
&+ I_g*(Z_{ag} - Z_{eg} - Z_{ae} + Z_{ee})
\end{aligned}$$

( 9 )

Fila 2 - Fila 5 :

$$\begin{aligned}
V_{be}-V_{b'e'}+V_{e'} &= \\
&I_a*Z_{ba}+I_b*Z_{bb}+I_c*Z_{bc}+I_g*Z_{bg}+I_e*Z_{be} \\
&-I_a*Z_{ea}-I_b*Z_{eb}-I_c*Z_{ec}-I_g*Z_{eg}-I_e*Z_{ee}
\end{aligned}$$

( 10 )

$$\begin{aligned}
V_{be}-V_{b'e'} &= I_a*(Z_{ba} - Z_{ea} - Z_{be} + Z_{ee}) \\
&+ I_b*(Z_{bb} - Z_{eb} - Z_{be} + Z_{ee}) \\
&+ I_c*(Z_{bc} - Z_{ec} - Z_{eb} + Z_{ee}) \\
&+ I_g*(Z_{bg} - Z_{eg} - Z_{be} + Z_{ee})
\end{aligned}$$

( 11 )

Fila 3 - Fila 5 :

$$\begin{aligned}
V_{ce}-V_{c'e'}+V_{e'} &= \\
&I_a*Z_{ca}+I_b*Z_{cb}+I_c*Z_{cc}+I_g*Z_{cg}+I_e*Z_{ce} \\
&-I_a*Z_{ea}-I_b*Z_{eb}-I_c*Z_{ec}-I_g*Z_{eg}-I_e*Z_{ee}
\end{aligned}$$

( 12 )



$$\begin{aligned}
V_{ce} - V_{c'e'} &= I_a \cdot (Z_{ca} - Z_{ea} - Z_{ce} + Z_{ee}) \\
&+ I_b \cdot (Z_{cb} - Z_{eb} - Z_{ce} + Z_{ee}) \\
&+ I_c \cdot (Z_{cc} - Z_{ec} - Z_{ce} + Z_{ee}) \\
&+ I_g \cdot (Z_{cg} - Z_{eg} - Z_{ce} + Z_{ee}).
\end{aligned}
\tag{13}$$

Fila 4 - Fila 5 :

$$\begin{aligned}
0 - V_e + V_{e'} &= I_a \cdot Z_{ga} + I_b \cdot Z_{gb} + I_c \cdot Z_{gc} + I_g \cdot Z_{gg} + I_e \cdot Z_{ge} \\
&- I_a \cdot Z_{ea} - I_b \cdot Z_{eb} - I_c \cdot Z_{ec} + I_g \cdot Z_{eg} - I_e \cdot Z_{ee}
\end{aligned}
\tag{14}$$

$$\begin{aligned}
0 &= I_a \cdot (Z_{ga} - Z_{ea} - Z_{ge} + Z_{ee}) \\
&+ I_b \cdot (Z_{gb} - Z_{eb} - Z_{ge} + Z_{ee}) \\
&+ I_c \cdot (Z_{gc} - Z_{ec} - Z_{ge} + Z_{ee}) \\
&+ I_g \cdot (Z_{gg} - Z_{eg} - Z_{ge} + Z_{ee})
\end{aligned}
\tag{15}$$

Si lo expresamos en forma matricial estas ecuaciones obtenemos :

$$\begin{bmatrix} V_{ae} - V_{a'e'} \\ V_{be} - V_{b'e'} \\ V_{ce} - V_{c'e'} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Z_{aa}} & \overline{Z_{ab}} & \overline{Z_{ac}} & \overline{Z_{ag}} \\ \overline{Z_{ba}} & \overline{Z_{bb}} & \overline{Z_{bc}} & \overline{Z_{bg}} \\ \overline{Z_{ca}} & \overline{Z_{cb}} & \overline{Z_{cc}} & \overline{Z_{cg}} \\ \overline{Z_{ga}} & \overline{Z_{gb}} & \overline{Z_{gc}} & \overline{Z_{gg}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \\ I_g \end{bmatrix}
\tag{16}$$

En la que :

$$\overline{Zaa} = Zaa - Zea - Zae + Zee$$

$$\overline{Zab} = Zab - Zeb - Zae + Zee$$

$$\overline{Zac} = Zac - Zec - Zae + Zee$$

$$\overline{Zag} = Zag - Zeg - Zae + Zee$$

$$\overline{Zba} = Zba - Zea - Zbe + Zee$$

$$\overline{Zbb} = Zbb - Zeb - Zbe + Zee$$

$$\overline{Zbc} = Zbc - Zec - Zbe + Zee$$

$$\overline{Zbg} = Zbg - Zeg - Zbe + Zee$$

$$\overline{Zca} = Zca - Zea - Zce + Zee$$

$$\overline{Zcb} = Zcb - Zeb - Zce + Zee$$

$$\overline{Zcc} = Zcc - Zec - Zce + Zee$$

$$\overline{Zcg} = Zcg - Zeg - Zce + Zee$$

$$\overline{Zga} = Zga - Zea - Zge + Zee$$

$$\overline{Zgb} = Zgb - Zeb - Zge + Zee$$

$$\overline{Zgc} = Zgc - Zec - Zge + Zee$$

$$\overline{Zgg} = Zgg - Zeg - Zge + Zee$$

( 17 )

Si reducimos matricialmente y eliminamos la cuarta fila de la ecuación (16) tenemos :

$$\begin{bmatrix} \overline{V_{ae}} - \overline{V_{a'e'}} \\ \overline{V_{be}} - \overline{V_{b'e'}} \\ \overline{V_{ce}} - \overline{V_{c'e'}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{Z_{aa}} & \overline{Z_{ab}} & \overline{Z_{ac}} \\ \overline{Z_{ba}} & \overline{Z_{bb}} & \overline{Z_{bc}} \\ \overline{Z_{ca}} & \overline{Z_{cb}} & \overline{Z_{cc}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \overline{I_a} \\ \overline{I_b} \\ \overline{I_c} \end{bmatrix} \quad ( 18 )$$

$$\begin{bmatrix} \overline{Z_{aa}} & \overline{Z_{ab}} & \overline{Z_{ac}} \\ \overline{Z_{ba}} & \overline{Z_{bb}} & \overline{Z_{bc}} \\ \overline{Z_{ca}} & \overline{Z_{cb}} & \overline{Z_{cc}} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \overline{Z_{aa}} & \overline{Z_{ab}} & \overline{Z_{ac}} \\ \overline{Z_{ba}} & \overline{Z_{bb}} & \overline{Z_{bc}} \\ \overline{Z_{ca}} & \overline{Z_{cb}} & \overline{Z_{cc}} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} \overline{Z_{ag}} \\ \overline{Z_{bg}} \\ \overline{Z_{cg}} \end{bmatrix} * \left[ \frac{1}{\overline{Z_{gg}}} \right] * \begin{bmatrix} \overline{Z_{ga}} & \overline{Z_{gb}} & \overline{Z_{gc}} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} \overline{Z_{aa} - \frac{\overline{Z_{ag}} * \overline{Z_{ga}}}{\overline{Z_{gg}}} } & \overline{Z_{ab} - \frac{\overline{Z_{ag}} * \overline{Z_{gb}}}{\overline{Z_{gg}}} } & \overline{Z_{ac} - \frac{\overline{Z_{ag}} * \overline{Z_{gc}}}{\overline{Z_{gg}}} } \\ \overline{Z_{ba} - \frac{\overline{Z_{bg}} * \overline{Z_{ga}}}{\overline{Z_{gg}}} } & \overline{Z_{bb} - \frac{\overline{Z_{bg}} * \overline{Z_{gb}}}{\overline{Z_{gg}}} } & \overline{Z_{bc} - \frac{\overline{Z_{bg}} * \overline{Z_{gc}}}{\overline{Z_{gg}}} } \\ \overline{Z_{ca} - \frac{\overline{Z_{cg}} * \overline{Z_{ga}}}{\overline{Z_{gg}}} } & \overline{Z_{cb} - \frac{\overline{Z_{cg}} * \overline{Z_{gb}}}{\overline{Z_{gg}}} } & \overline{Z_{cc} - \frac{\overline{Z_{cg}} * \overline{Z_{gc}}}{\overline{Z_{gg}}} } \end{bmatrix} \quad ( 19 )$$

La ecuación (18) puede ser expresada en forma más simple, de la siguiente manera :

$$\overline{V_{abc}} = \overline{Z_{abc}} * \overline{I_{abc}} \quad ( 20 )$$

De la ecuación (18) obtendremos una expresión matricial de las corrientes de línea en función de la diferencia de voltaje y de las admitancias propias y mutuas de las líneas.

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{\overline{Y_{aa}}} & \overline{\overline{Y_{ab}}} & \overline{\overline{Y_{ac}}} \\ \overline{\overline{Y_{ba}}} & \overline{\overline{Y_{bb}}} & \overline{\overline{Y_{bc}}} \\ \overline{\overline{Y_{ca}}} & \overline{\overline{Y_{cb}}} & \overline{\overline{Y_{cc}}} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_{ae} - V_a'e' \\ V_{be} - V_b'e' \\ V_{ce} - V_c'e' \end{bmatrix} \quad ( 21 )$$

en donde :

$$\begin{bmatrix} \overline{\overline{Y_{aa}}} & \overline{\overline{Y_{ab}}} & \overline{\overline{Y_{ac}}} \\ \overline{\overline{Y_{ba}}} & \overline{\overline{Y_{bb}}} & \overline{\overline{Y_{bc}}} \\ \overline{\overline{Y_{ca}}} & \overline{\overline{Y_{cb}}} & \overline{\overline{Y_{cc}}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \overline{\overline{Z_{aa}}} & \overline{\overline{Z_{ab}}} & \overline{\overline{Z_{ac}}} \\ \overline{\overline{Z_{ba}}} & \overline{\overline{Z_{bb}}} & \overline{\overline{Z_{bc}}} \\ \overline{\overline{Z_{ca}}} & \overline{\overline{Z_{cb}}} & \overline{\overline{Z_{cc}}} \end{bmatrix}^{-1} \quad ( 22 )$$

### Líneas de dos fases

Estos tipos de líneas están compuestos de dos fases, un conductor de neutro aterrizado en varios y la tierra. Para nuestro caso la nomenclatura será: las fases A y B, el neutro G y la tierra E.

El modelo de la línea de dos fases en la que se encuentran indicadas las impedancias propias y mutuas y otros detalles los podemos observar en la figura N° 2.1.2.

Todos los voltajes de las líneas están referidos al potencial de referencia, todos ellos referidos.

Las ecuaciones para determinar las caídas de voltaje a través de los conductores son:

$$\begin{aligned}
 V_a - V_a' &= I_a Z_{aa} + I_b Z_{ab} + I_g Z_{ag} + I_e Z_{ae} \\
 V_b - V_b' &= I_a Z_{ba} + I_b Z_{bb} + I_g Z_{bg} + I_e Z_{be} \\
 V_g - V_g' &= I_a Z_{ga} + I_b Z_{gb} + I_g Z_{gg} + I_e Z_{ge} \\
 V_e - V_e' &= I_a Z_{ea} + I_b Z_{eb} + I_g Z_{eg} + I_e Z_{ee}
 \end{aligned}
 \tag{ 23 }$$

Escritas en forma matricial :

$$\begin{bmatrix} V_a - V_a' \\ V_b - V_b' \\ V_g - V_g' \\ V_e - V_e' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ag} & Z_{ae} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bg} & Z_{be} \\ Z_{ga} & Z_{gb} & Z_{gg} & Z_{ge} \\ Z_{ea} & Z_{eb} & Z_{eg} & Z_{ee} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_g \\ I_e \end{bmatrix}
 \tag{ 24 }$$

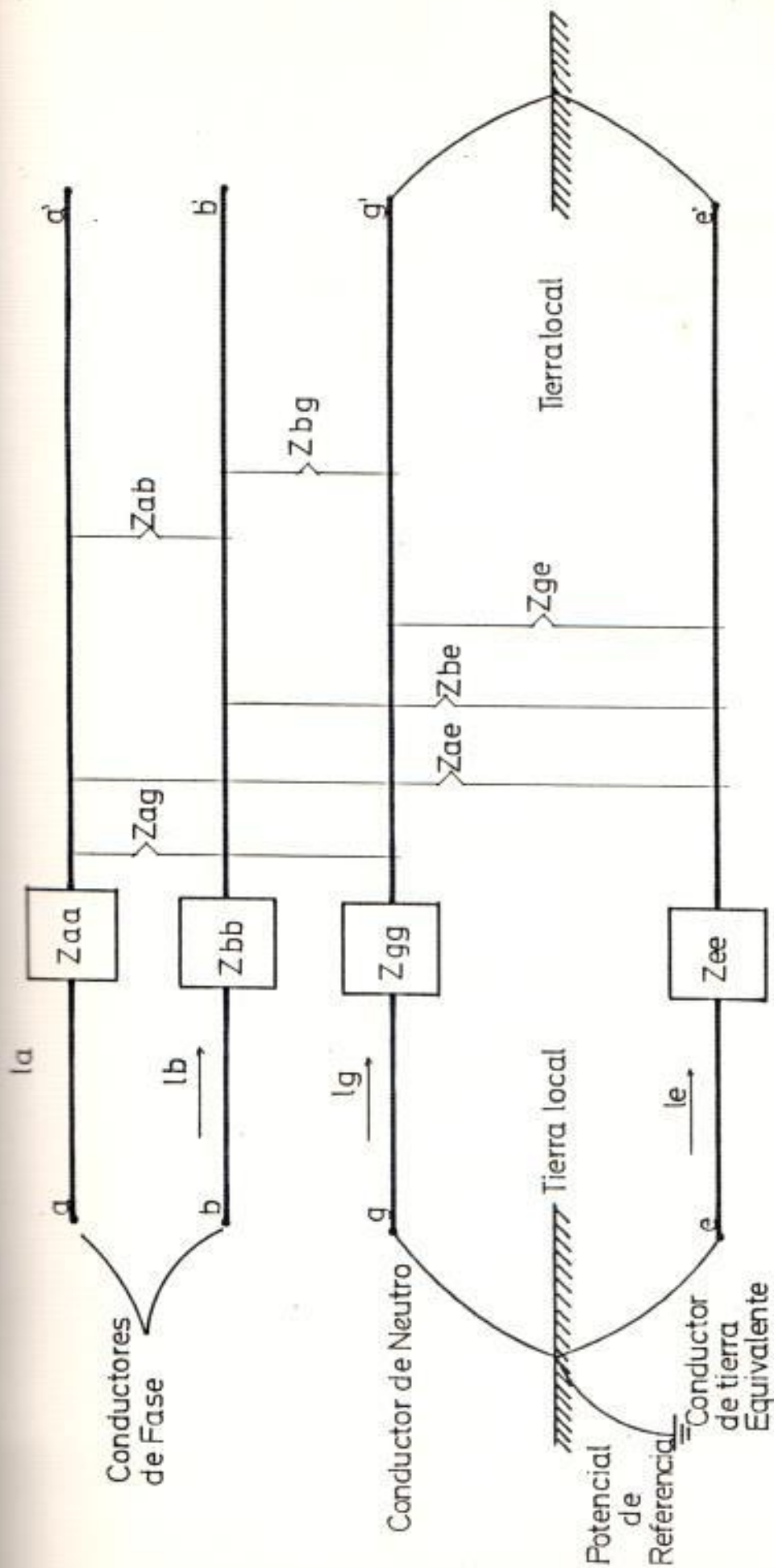


FIGURA N°2.1.2. MODELO DE LINEA DE DISTRIBUCION DE DOS FASES

Los voltajes iniciales están referidos respecto a su potencial de tierra y como éste está unido directamente al punto de referencia tenemos :

$$\begin{aligned} V_a &= V_a - V_e = V_{ae} \\ V_b &= V_b - V_e = V_{be} \end{aligned} \quad ( 25 )$$

Los voltajes  $V_a'$  y  $V_b'$  no están referidos a su potencial de tierra local ( $V_e'$ ) sino con respecto al voltaje tomado como referencia, es por esta razón que los voltajes  $V_a'e'$  y  $V_b'e'$  se los obtendrá en forma matricial.

Los potenciales de tierra y neutro se comportan de la siguiente manera :

$$\begin{aligned} V_g &= V_e = 0 \\ V_g' &= V_e' = 0 \end{aligned} \quad ( 26 )$$

De las ecuaciones anteriores obtenemos :

$$\begin{bmatrix} V_{ae} - V_a' \\ V_{be} - V_b' \\ 0 - V_e' \\ 0 - V_e' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ag} & Z_{ae} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bg} & Z_{be} \\ Z_{ga} & Z_{gb} & Z_{gg} & Z_{ge} \\ Z_{ea} & Z_{eb} & Z_{eg} & Z_{ee} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_g \\ I_e \end{bmatrix} \quad ( 27 )$$

También conocemos que :

$$I_a + I_b + I_g + I_e = 0$$

( 28 )

Despejando  $I_e$  tenemos :

$$I_e = -I_a - I_b - I_g$$

( 29 )

Mediante el artificio matemático de la resta para reducir un sistema matricial tenemos :

Fila 1 - Fila 5 :

$$\begin{aligned} V_{ae} - V_{a'e'} + V_{e'} &= I_a * Z_{aa} + I_b * Z_{ab} + I_g * Z_{ag} + I_e * Z_{ae} \\ &\quad - I_a * Z_{ea} - I_b * Z_{eb} - I_g * Z_{eg} - I_e * Z_{ee} \end{aligned}$$

( 30 )

$$\begin{aligned} V_{ae} - V_{a'e'} &= I_a * (Z_{aa} - Z_{ea} - Z_{ae} + Z_{ee}) \\ &\quad + I_b * (Z_{ab} - Z_{eb} - Z_{ae} + Z_{ee}) \\ &\quad + I_g * (Z_{ag} - Z_{eg} - Z_{ae} + Z_{ee}) \end{aligned}$$

( 31 )



Fila 2 - Fila 5 :

$$\begin{aligned} V_{be} - V_{b'e'} + V_{e'} &= I_a * Z_{ba} + I_b * Z_{bb} + I_g * Z_{bg} + I_e * Z_{be} \\ &\quad - I_a * Z_{ea} - I_b * Z_{eb} - I_g * Z_{eg} - I_e * Z_{ee} \end{aligned} \quad ( 32 )$$

$$\begin{aligned} V_{be} - V_{b'e'} &= I_a * (Z_{ba} - Z_{ea} - Z_{be} + Z_{be}) \\ &\quad + I_b * (Z_{bb} - Z_{eb} - Z_{be} + Z_{ee}) \\ &\quad + I_g * (Z_{bg} - Z_{eg} - Z_{be} + Z_{ee}) \end{aligned} \quad ( 33 )$$

Fila 3 - Fila 5 :

$$\begin{aligned} 0 - V_{e'} + V_{e'} &= I_a * Z_{ga} + I_b * Z_{gb} + I_g * Z_{gg} + I_e * Z_{ge} \\ &\quad - I_a * Z_{ea} - I_b * Z_{eb} - I_g * Z_{ge} + I_e * Z_{ee} \end{aligned} \quad ( 34 )$$

$$\begin{aligned} 0 &= I_a * (Z_{ga} - Z_{ea} - Z_{ge} - Z_{ee}) \\ &\quad + I_b * (Z_{gb} - Z_{eb} - Z_{ge} + Z_{ee}) \\ &\quad + I_g * (Z_{gg} - Z_{eg} - Z_{ge} + Z_{ee}) \end{aligned} \quad ( 35 )$$

De esta última obtenemos :

$$\begin{bmatrix} V_{ae} - V_{a'e'} \\ V_{be} - V_{b'e'} \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} & Z_{ag} \\ Z_{ba} & Z_{bb} & Z_{bg} \\ Z_{ga} & Z_{gb} & Z_{gg} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \\ I_g \end{bmatrix} \quad ( 36 )$$

En donde :

$$Z_{aa} = Z_{aa} - Z_{ea} - Z_{ae} + Z_{ee}$$

$$Z_{ab} = Z_{ab} - Z_{eb} - Z_{ae} + Z_{ee}$$

$$Z_{ag} = Z_{ag} - Z_{eg} - Z_{ae} + Z_{ee}$$

$$Z_{ba} = Z_{ba} - Z_{ea} - Z_{be} + Z_{ee}$$

$$Z_{bb} = Z_{bb} - Z_{eb} - Z_{be} + Z_{ee}$$

$$Z_{bg} = Z_{bg} - Z_{eg} - Z_{be} + Z_{ee}$$

$$Z_{ga} = Z_{ga} - Z_{ea} - Z_{ge} + Z_{ee}$$

$$Z_{gb} = Z_{gb} - Z_{eb} - Z_{ge} + Z_{ee}$$

$$Z_{gg} = Z_{gg} - Z_{eg} - Z_{ge} + Z_{ee}$$

( 37 )

Si reducimos la matriz, eliminando la tercera fila de la ecuación (36) tenemos :

$$\begin{bmatrix} V_{ae} - V_{a'e'} \\ V_{be} - V_{b'e'} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} \\ Z_{ba} & Z_{bb} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} \quad ( 38 )$$

En donde :

$$\begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} \\ Z_{ba} & Z_{bb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} \\ Z_{ba} & Z_{bb} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} Z_{ag} \\ Z_{bg} \end{bmatrix} * \left[ \frac{1}{Z_{gg}} \right] * \begin{bmatrix} Z_{ga} & Z_{gb} \end{bmatrix}$$

Es igual a :

$$\begin{bmatrix} Z_{aa} - \frac{Z_{ag} * Z_{ga}}{Z_{gg}} & Z_{ab} - \frac{Z_{ag} * Z_{gb}}{Z_{gg}} \\ Z_{ba} - \frac{Z_{bg} * Z_{ga}}{Z_{gg}} & Z_{bb} - \frac{Z_{bg} * Z_{gb}}{Z_{gg}} \end{bmatrix} \quad ( 39 )$$

La ecuación (38) se la puede expresar de una manera más simple, de la siguiente forma :

$$V^{ab} = Z^{ab} * I^{ab} \quad ( 40 )$$

De la ecuación (38) se puede encontrar una expresión para las corrientes de línea en función de la diferencia de voltajes y de las admitancias propias y mutuas de las líneas :

$$\begin{bmatrix} I_a \\ I_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} \\ Y_{ba} & Y_{bb} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} V_{ae} - V_a'e' \\ V_{be} - V_b'e' \end{bmatrix} \quad ( 41 )$$

en donde :

$$\begin{bmatrix} Y_{aa} & Y_{ab} \\ Y_{ba} & Y_{bb} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ab} \\ Z_{ba} & Z_{bb} \end{bmatrix}^{-1} \quad ( 42 )$$

### Líneas de una fase

Este tipo de líneas son las más frecuentemente utilizadas en sistemas de distribución, esta línea está formada por una fase o conductor, un hilo de neutro aterrizado en varios puntos y la tierra.

Su representación esquemática es mostrada en la figura N° 2.1.3. Los seis voltajes considerados en el circuito están todos referidos al potencial de referencia de la figura.

La caída de voltaje para cada conductor puede ser determinada por las corrientes:  $I_a, I_g, e I_e$  y por las impedancias propias :

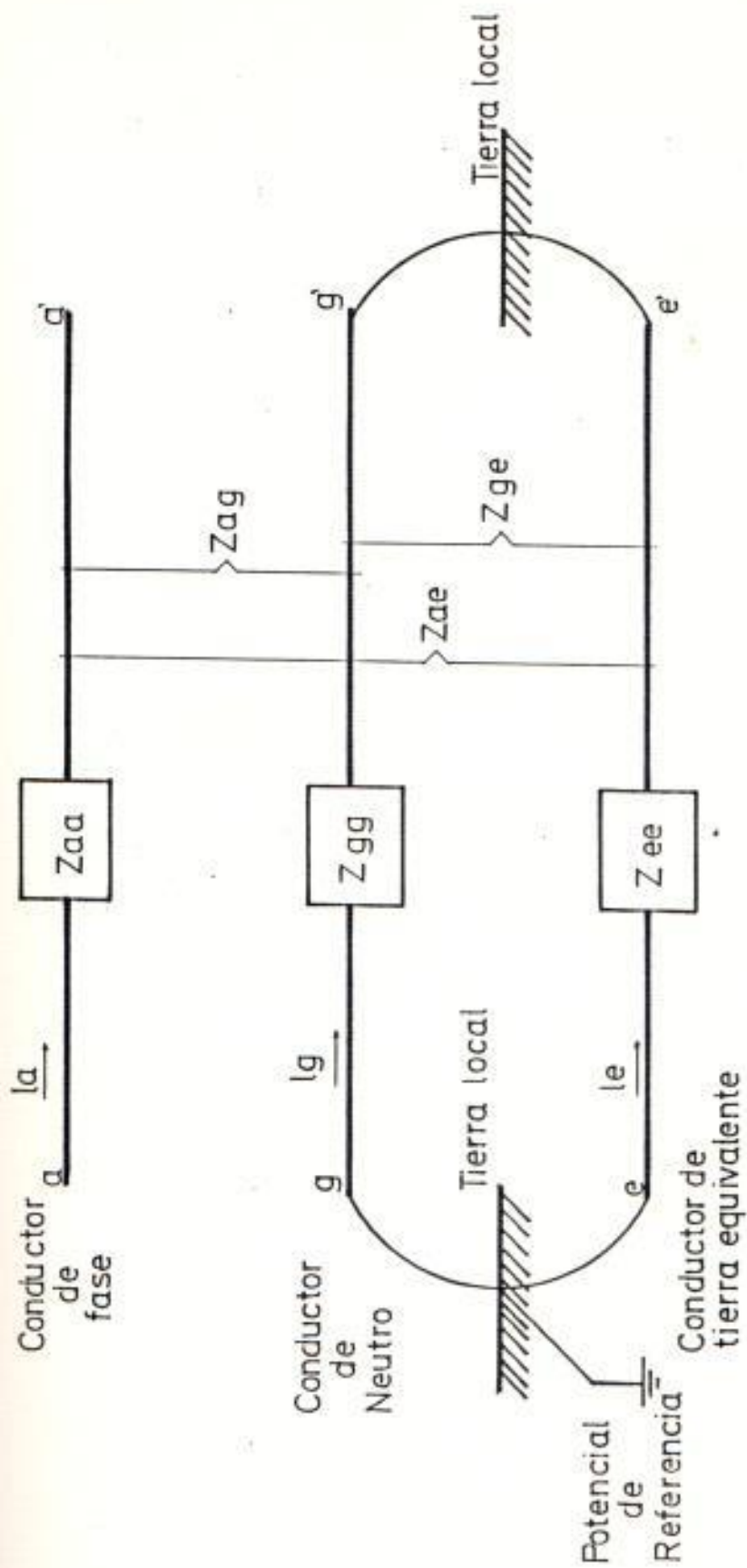


FIGURA N° 2.13 MODELO DE LA LINEA DE DISTRIBUCION DE UNA FASE

Zaa, Zgg y Zee y por las impedancias mutuas Zag, Zae y Zge de los conductores.

Las ecuaciones que determinan las caídas de voltaje a través de los conductores son :

$$\begin{aligned} V_a - V_a' &= I_a \cdot Z_{aa} + I_g \cdot Z_{ag} + I_e \cdot Z_{ae} \\ V_g - V_g' &= I_a \cdot Z_{ga} + I_g \cdot Z_{gg} + I_e \cdot Z_{ge} \\ V_e - V_e' &= I_a \cdot Z_{ea} + I_g \cdot Z_{eg} + I_e \cdot Z_{ee} \quad ( 43 ) \end{aligned}$$

Estas ecuaciones en forma matricial son :

$$\begin{bmatrix} V_a - V_a' \\ V_g - V_g' \\ V_e - V_e' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ag} & Z_{ae} \\ Z_{ga} & Z_{gg} & Z_{ge} \\ Z_{ea} & Z_{eg} & Z_{ee} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_g \\ I_e \end{bmatrix} \quad ( 44 )$$

Ahora vamos a expresar los voltajes en los extremos de la línea  $V_a$  y  $V_a'$  con respecto al potencial de tierra local.

El voltaje en el punto "a" está expresado con respecto a su potencial de tierra local, ya que éste se encuentra conectado directamente al punto de referencia, por lo tanto :

$$V_a = V_a - V_e = V_{ae}$$

( 45 )

El voltaje  $V_a'$  no está expresado con respecto a su potencial de tierra local  $V_e'$ , sino que es tomado con respecto al voltaje seleccionado como referencia, de aquí que debemos obtener los voltajes  $V_a'e'$  por medio de reducciones matriciales.

Los potenciales de tierra y neutro están relacionados de la siguiente manera :

$$V_g = V_e = 0$$

$$V_g' = V_e' = 0$$

( 46 )

De donde obtenemos:

$$\begin{bmatrix} V_{ae} - V_a' \\ 0 - V_e' \\ 0 - V_e' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ag} & Z_{ae} \\ Z_{ga} & Z_{gg} & Z_{ge} \\ Z_{ea} & Z_{eg} & Z_{ee} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_a \\ I_g \\ I_e \end{bmatrix}$$

( 47 )

También conocemos que :

$$I_a + I_g + I_e = 0$$

( 48 )

Despejando Ie tenemos :

$$I_e = -I_a - I_g \quad ( 49 )$$

Para reducir el sistema de la ecuación (47), utilizaremos el mismo método utilizado en párrafos anteriores, esto es la resta de filas:

Fila 1 - Fila 2 :

$$\begin{aligned} V_{ae} - V_a' + V_e' &= I_a \cdot Z_{aa} + I_g \cdot Z_{ag} + I_e \cdot Z_{ae} \\ &\quad - I_a \cdot Z_{ea} - I_g \cdot Z_{eg} - I_e \cdot Z_{ee} \end{aligned} \quad ( 50 )$$

$$\begin{aligned} V_{ae} - V_a'e' &= I_a \cdot (Z_{aa} - Z_{ea} - Z_{ae} + Z_{ee}) \\ &\quad + I_g \cdot (Z_{ag} - Z_{eg} - Z_{ae} + Z_{ee}) \end{aligned} \quad ( 51 )$$

Fila 2 - Fila 3 :

$$\begin{aligned} 0 - V_e' + V_e' &= I_a \cdot Z_{ga} + I_g \cdot Z_{gg} + I_e \cdot Z_{ge} \\ &\quad - I_a \cdot Z_{ea} - I_g \cdot Z_{gg} - I_e \cdot Z_{ge} \end{aligned} \quad ( 52 )$$



$$\begin{aligned}
0 &= I_a \cdot (Z_{ga} - Z_{ea} - Z_{ge} + Z_{ee}) \\
&+ I_g \cdot (Z_{gg} - Z_{eg} - Z_{ge} + Z_{ee})
\end{aligned}
\tag{53}$$

Expresándolo en forma matricial :

$$\begin{bmatrix} V_{ae} - V_a'e' \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{aa} & Z_{ag} \\ Z_{ga} & Z_{gg} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} I_e \\ I_g \end{bmatrix}
\tag{54}$$

En donde :

$$\begin{aligned}
Z_{aa} &= Z_{aa} - Z_{ea} - Z_{ae} + Z_{ee} \\
Z_{ag} &= Z_{ag} - Z_{eg} - Z_{ae} + Z_{ee} \\
Z_{ga} &= Z_{ga} - Z_{ea} - Z_{ge} + Z_{ee} \\
Z_{gg} &= Z_{gg} - Z_{eg} - Z_{ge} + Z_{ee}
\end{aligned}
\tag{55}$$

Haciendo la reducción matricial para eliminar la fila 2 de la ecuación 54 tenemos :

$$V_{ae} - V_a'e' = Z_{aa} * I_a
\tag{56}$$

En donde :

$$Z_{aa} = Z_{aa} - \begin{bmatrix} Z_{ag} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} 1 \\ Z_{gg} \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} Z_{ga} \end{bmatrix}
\tag{57}$$

De la ecuación (56) podemos obtener una expresión para determinar la corriente de línea en función de la diferencia de voltaje entre los extremos del conductor y de las admitancias propias y mutuas de las líneas:

$$I_a = Y_a * (V_{ae} - V_a'e') \quad ( 58 )$$

en donde :

$$Y_a = [Z_{aa}]^{-1} \quad ( 59 )$$

#### 2.1.2. BANCOS DE CAPACITORES.

En los sistemas de distribución se utilizan frecuentemente los bancos de capacitores.

Con la instalación de éstos; lo que obtenemos como resultado es el mejoramiento de los niveles de voltaje. También se disminuyen las pérdidas y se mejora el factor de potencia del sistema.

Los bancos de capacitores pueden estar compuestos de unidades monofásicas o trifásicas. Las unidades monofásicas son fabricadas normalmente de 50, 100, y 150 Kvar; y las unidades trifásicas de 300, 450, 600, 900 y 1200 Kvar.

Los capacitores presentan una capacitancia constante y dependen únicamente de los materiales usados en su construcción y de las características geométricas del mismo.

Los capacitores presentan una reactancia capacitiva constante, al igual que su admitancia.

### 2.1.3. TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCION.

Los transformadores de capacidad nominal desde tres hasta quinientos Kva. son clasificados como transformadores de distribución. El nivel de voltaje de ellos alcanza hasta los quince Kv.

Un medio de clasificación para diferenciar entre los varios tipos de transformadores de distribución es el medio de enfriamiento y el nivel de aislación de los mismos. En una clasificación bien amplia, los transformadores de distribución pueden ser secos o llenos de un líquido aislante.

Los transformadores de distribución que están enfriados por aire también su medio aislante es el aire. Este tipo de transformador es comunmente utilizado en donde exista peligro de fuego por la presencia de aceite, que es el medio que se utiliza en el otro tipo de transformador.

Los transformadores llenados por líquido pueden ser clasificados en dos tipos : de aceite o de líquido inerte.

En instalaciones a la intemperie, esto es, en los postes, el tipo más utilizado es el de aceite. También se lo usa en subestaciones de distribución.

En cambio donde exista en extremo el peli-

gro de fuego se deberá utilizar el tipo inerte.

Su representación es mostrada en la figura 2.1.4. Esta consiste de un número determinado de vueltas de alambre aislado alrededor de un núcleo de hierro. Vemos también su circuito equivalente ideal.

#### 2.1.4. CARGAS ELECTRICAS EN FUNCION DEL VOLTAJE DE BARRAS.

El modelaje de las cargas para sistemas de potencia ha recibido una atención especial en los recientes años.

La industria de energía ha considerado la potencia en la barra de carga como una constante para el análisis en estado estable. Este concepto no siempre es verdadero.

Debido a un entendimiento limitado de la carga y la imposibilidad de recolección de datos, ningún modelo de carga ha sido utilizado para los programas de flujo de carga.

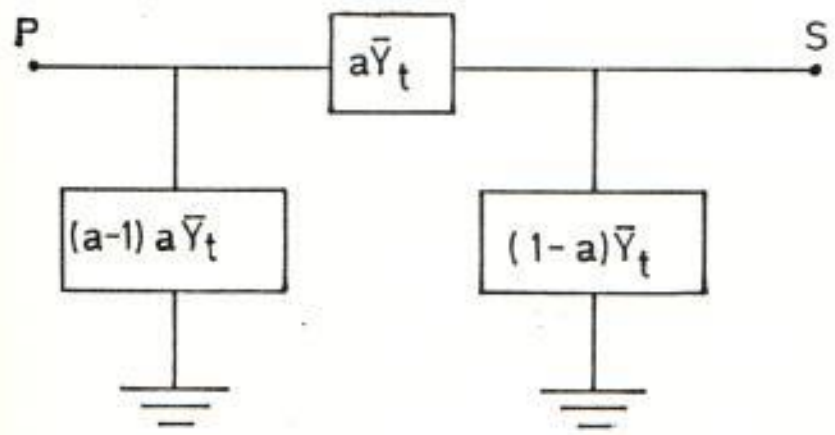
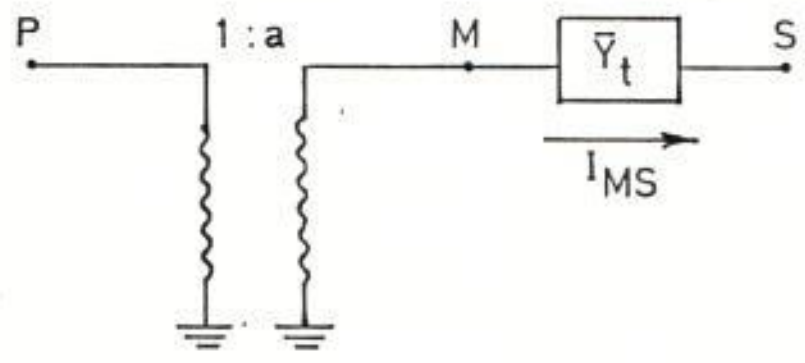
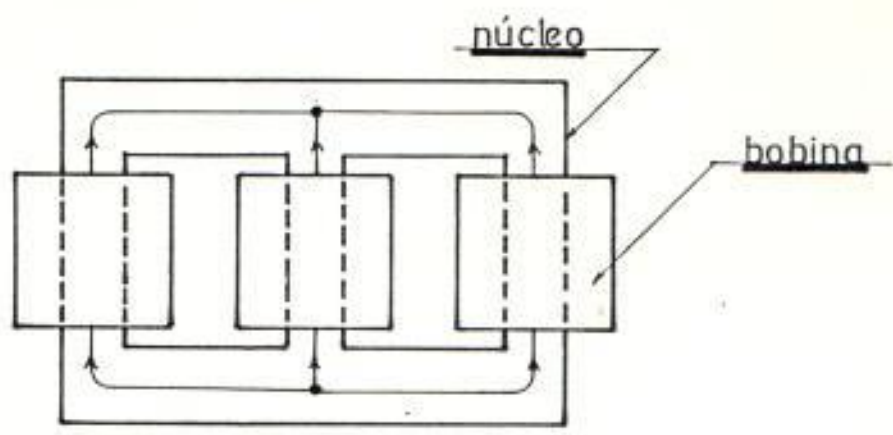


FIGURA 2.14.

MODELO DE TRANSFORMADOR Y SUS EQUIVALENTES

El programa de flujo de carga está diseñado para calcular la solución del sistema para un cierto momento. Es en este momento particular, donde un número fijo de unidades de carga son activadas y operando en estado estable. El único factor que afectará a la carga es el voltaje de las barras.

Para ilustrar la clase de modelo de carga que se necesita en situaciones de estado estable tomaremos como ejemplo un calentador de agua. Este es una carga resistiva cuyo demanda de potencia es proporcional al cuadrado del voltaje.

$$P = \frac{V^2}{R}$$

Los diferentes voltajes de operación crearán diferentes demandas de carga. Sin embargo el patrón de la demanda de potencia es un modelo sofisticado, y esto se debe a los ciclos, cuando se monitorea por un prolongado lapso de tiempo.

Si hay cientos de calentadores de agua en

estado encendido/apagado, la demanda total de potencia de estos calentadores pueden ser estimados mediante la suma del promedio de consumo de energía de cada calentador en un periodo dado. Cuando éstos generan el menor calentamiento para cualquier instante del ciclo, se denomina banda de bajo voltaje. Los efectos del cuadrado del voltaje están directamente relacionados con el periodo encendido-apagado e inversamente proporcional a la relación de radiación de calor. Este modelo es únicamente válido para pruebas de laboratorio.

Un modelo de carga para una subestación no solamente debería incluir el rendimiento de las componentes de carga, sino que debe tomar en consideración las líneas de distribución, los transformadores de servicio y los bancos de capacitores.

La parte reactiva del modelo de carga  $Q$  será modificado a un modelo tipo incremental. Acorde a experiencias previas, en un voltaje nominal dado, la demanda de carga  $Q$  calculada del modelo que no considera la



variación de la carga en función del voltaje, es rara vez cercana a la demanda real.

Por ejemplo, si asumimos que la carga de una subestación consiste en su mayoría de motores de tamaño pequeño, entonces los modelos encontrados en forma estadística y pruebas de campo son:

$$P = 1.00 + 0.4439*\delta V + 1.3300*\delta V^2$$

$$Q = 1.071 + 3.6890*\delta V + 8.1599*\delta V^2$$

Si la demanda de potencia real en esta barra es de 100 MW cuando el voltaje es 1.0 p.u. y el incremento de voltaje es cero, según el modelo, el valor de la potencia reactiva debería ser 107.1 MVAR. El factor de potencia de sistemas de distribución óptimo debería ser mantenido a 0.95%. Esto significa que la potencia reactiva para esta subestación pudiera ser 32.87 MVAR o menos. Existe una gran diferencia entre estos dos valores. Esta puede ser causada por la diversidad de motores de diferentes fabricantes. Por otra parte el aporte desconocido de capacitores en sistemas de dis-

tribución en servicio.

En la práctica, los esquemas de control de los bancos de capacitores son muy sofisticados que hace que sea muy difícil determinar el valor real de los capacitores.

#### 2.1.5. REGULADORES DE VOLTAJE EN BARRAS Y LINEAS.

Un regulador de voltaje es un autotransformador, el cual está compuesto de un devanado de excitación primario conectado en paralelo con la carga y de un devanado secundario conectado en serie con la carga. Es en este devanado donde existen unas derivaciones, llamadas TAPS, éste es un mecanismo automático que aumentan o disminuyen el voltaje del circuito sin interrumpir la corriente de carga.

Los reguladores son generalmente utilizados en zonas rurales, los cuales controlan las variaciones de voltaje en las salidas de las subestaciones y corrigen la excesiva

caída de voltaje en las alimentadoras del sistema de distribución.

El rango que se consigue con los reguladores de voltaje es un diez por ciento por arriba y por abajo de su valor nominal del voltaje de la barra al cual se encuentra conectado. Esta variación de  $\pm 10$  por ciento se la consigue mediante 32 pasos, siendo 16 de ellos para elevar el voltaje y los otros 16 para reducirlo.

El modelo del regulador de voltaje monofásico será una impedancia en serie con un regulador de voltaje ideal. Vea la figura N° 2.1.5.

Para conformar un banco trifásico de reguladores de voltaje se debe utilizar un regulador monofásico para cada fase, siendo la operación de cada unidad independiente de las otras.

Vea la figura N° 2.1.6.

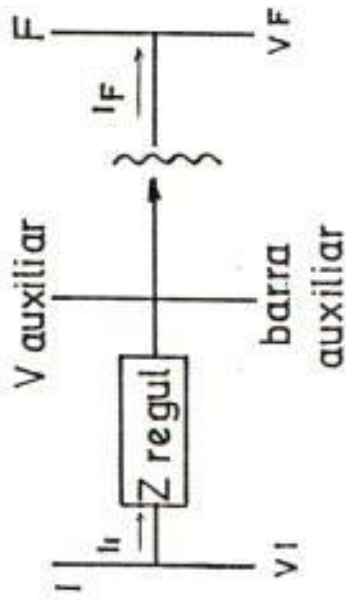
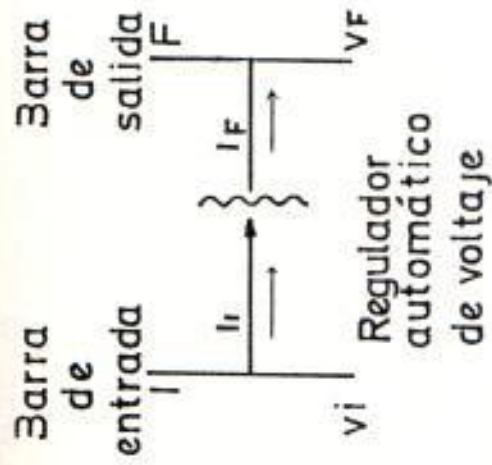


FIGURA Nº 2.1.5.

MODELO DE UN REGULADOR DE VOLTAJE MONOFASICO

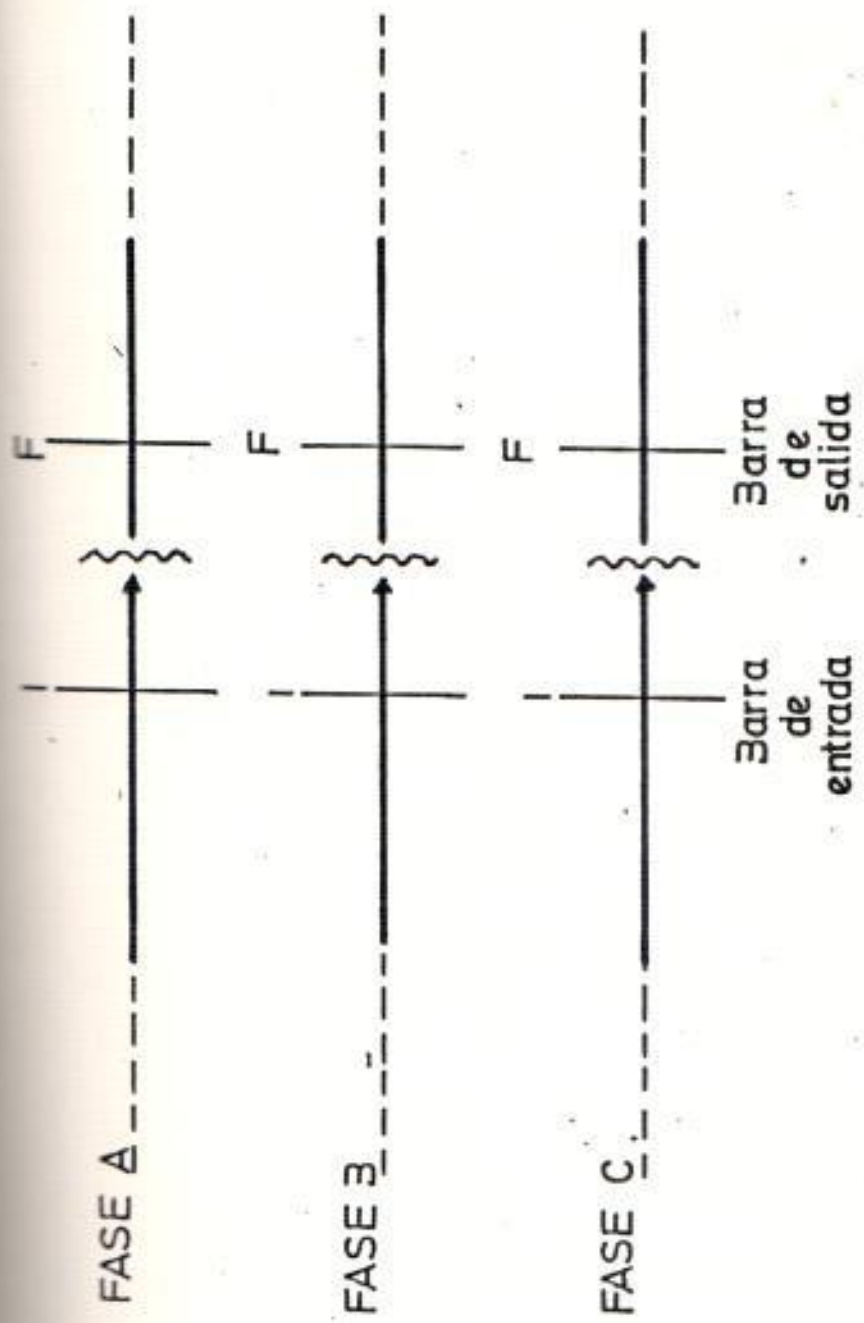


FIGURA N<sup>o</sup> 2.1.6.

MODELO DE UN BANCO TRIFASICO DE REGULADORES DE VOLTAJE

2.2. MODELAJE DE LOS ELEMENTOS QUE CONFORMAN LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCION.

1.- Los modelos de las líneas de distribución se los describe a continuación :

El modelo de una línea trifásica es:

$$\begin{array}{c} \text{a} \\ \text{b} \\ \text{c} \end{array} \begin{bmatrix} \text{a} & \text{b} & \text{c} \\ \text{Z}_{11} & \text{Z}_{12} & \text{Z}_{13} \\ \text{Z}_{21} & \text{Z}_{22} & \text{Z}_{23} \\ \text{Z}_{31} & \text{Z}_{32} & \text{Z}_{33} \end{bmatrix}$$

Para líneas de dos fases el modelo es:

$$\begin{array}{c} \text{a} \\ \text{b} \\ \text{c} \end{array} \begin{bmatrix} \text{a} & \text{b} & \text{c} \\ \text{Z}_{11} & \text{Z}_{12} & 0 \\ \text{Z}_{21} & \text{Z}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{c} \text{a} \\ \text{b} \\ \text{c} \end{array} \begin{bmatrix} \text{a} & \text{b} & \text{c} \\ \text{Z}_{11} & 0 & \text{Z}_{13} \\ 0 & 0 & 0 \\ \text{Z}_{31} & 0 & \text{Z}_{33} \end{bmatrix} \begin{array}{c} \text{a} \\ \text{b} \\ \text{c} \end{array} \begin{bmatrix} \text{a} & \text{b} & \text{c} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \text{Z}_{22} & \text{Z}_{23} \\ 0 & \text{Z}_{32} & \text{Z}_{33} \end{bmatrix}$$

FASES A-B                  FASES A-C                  FASES B-C

El modelo de una línea de una fase es :

$$\begin{array}{c} \text{a} \\ \text{b} \\ \text{c} \end{array} \begin{bmatrix} \text{a} & \text{b} & \text{c} \\ \text{Z}_{11} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{c} \text{a} \\ \text{b} \\ \text{c} \end{array} \begin{bmatrix} \text{a} & \text{b} & \text{c} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & \text{Z}_{22} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{array}{c} \text{a} \\ \text{b} \\ \text{c} \end{array} \begin{bmatrix} \text{a} & \text{b} & \text{c} \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \text{Z}_{33} \end{bmatrix}$$

FASE A                  FASE B                  FASE C

2.- El modelo para los bancos de capacitores:  
Vemos que en la figura N° 2.2.1. los capacitores son modelados para el análisis de sistemas de potencia como una admitancia en paralelo y constante.

Luego la potencia reactiva Q del banco de capacitores es igual a :

$$Q = (V^2) * Y$$

En donde :

V : es el voltaje nominal.

Q : representa la potencia nominal.

Y : es la admitancia capacitiva.

La expresión anterior es válida para cuando se tienen los valores en por unidad.

La potencia que es capaz de suministrar el banco, se la representa por la siguiente expresión.

$$\frac{Q(\text{nominal})}{Q(\text{nueva})} = \frac{V^2(\text{nominal})}{V^2(\text{nuevo})}$$

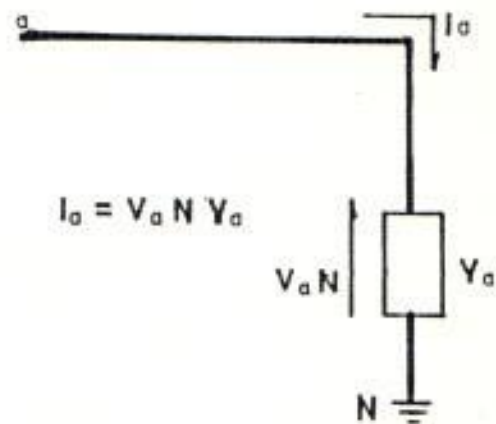
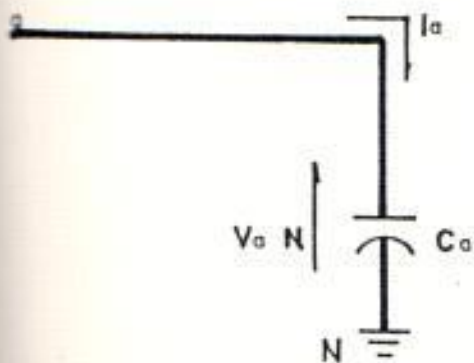


FIGURA Nº 2.2.1.

MODELO DEL BANCO DE CAPACITORES



De esta expresión notamos que la potencia reactiva es directamente proporcional al cuadrado del voltaje que se aplique a sus terminales.

3.- El modelo que utilizaremos para las cargas en los sistemas de distribución es la siguiente:

Tenemos que las cargas pueden ser trifásicas o monofásicas, y están constituidas de una parte real, esto es, la potencia activa y de otra imaginaria, la potencia reactiva.

Las expresiones matemáticas que nos permiten representar las cargas son las siguientes :

$$S_{1\phi} = P_{1\phi} + jQ_{1\phi}$$

$$S_{3\phi} = P_{3\phi} + jQ_{3\phi}$$

Los modelos utilizados para representar las cargas son :

a) Cuando la carga es trifásica, se considera que ésta se encuentra conectada en Y. Tal como lo vemos en la figura N° 2.2.2.

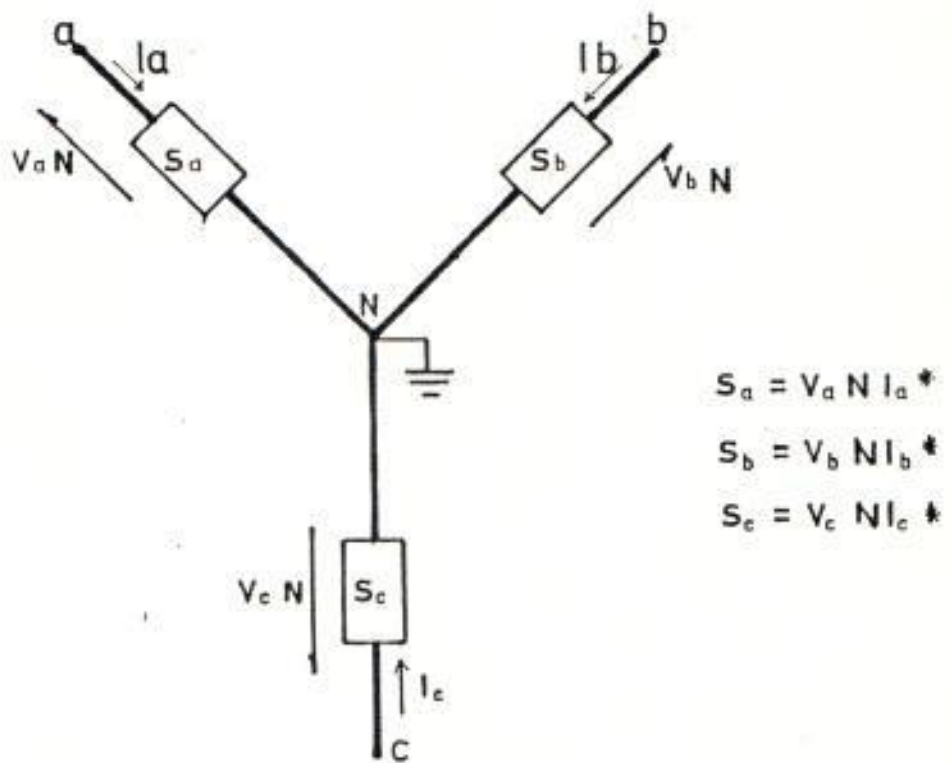


FIGURA N<sup>o</sup> 2.2.2.

MODELO DE LA CARGA TRIFASICA

b) Cuando la carga es monofásica se la considera conectada entre fase y tierra, tal como lo vemos en la figura N° 2.2.3.

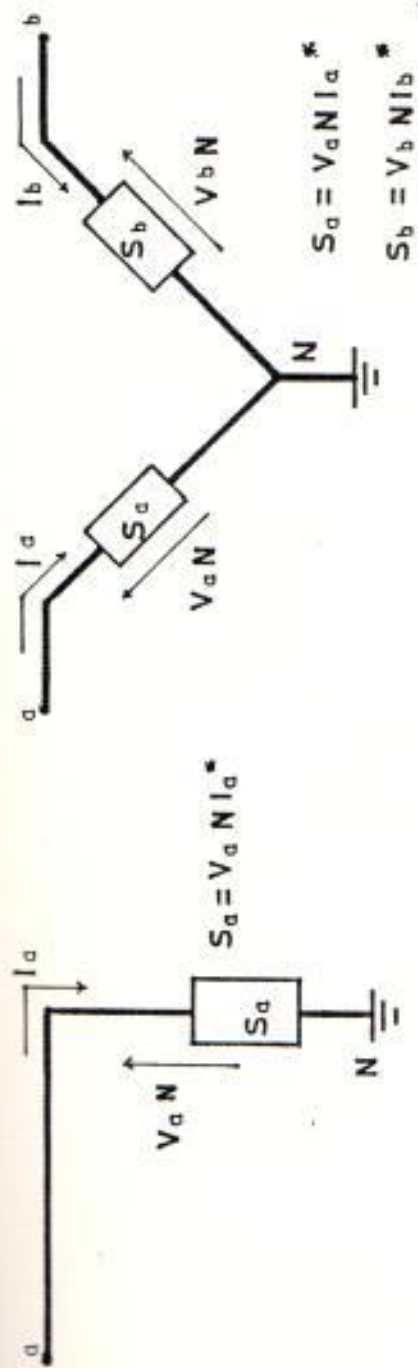


FIGURA Nº 2.2.3.

MODELO DE LA CARGA MONOFASICA

## CAPITULO III

### METODO DE SOLUCION DEL PROBLEMA.

#### 3.1. METODO DE SOLUCION DEL FLUJO DE CARGA TRIFASICO.

El método de solución que aplicaré para la resolución del problema de flujo de carga trifásico es la técnica de la escalera. Este consiste en asumir un cierto valor de voltaje en la barra final de un sistema de distribución, y a partir de este punto se calcularán las caídas de voltaje y las corrientes en los diferentes ramales del circuito hasta llegar a la barra de oscilación o generación.

##### 3.1.1. SOLUCION DE CIRCUITOS MONOFASICOS NO LINEALES.

Para analizar la solución de circuitos monofásicos lineales nos serviremos de la fi-

gura N° 3.1.1., en el que se compone de impedancias y admitancias, las mismas que son constantes.

Para resolver este tipo de circuitos se asume un valor de voltaje  $V_4$ , en el punto 4, y es a partir de este paso se calculan los diferentes parámetros del circuito.

Así tenemos que la corriente  $I_4$  es :

$$I_4 = Y_4 * V_4$$

Con la corriente  $I_4$  calculamos la caída de voltaje en  $Z_3$  :

$$V_3 = I_3 * Z_3$$

Entonces calculamos el voltaje  $V_2$  mediante:

$$V_2 = V_4 + V_3$$

$$V_2 = V_4 + I_3 * Z_3$$

Luego la corriente  $I_2$  es igual a:

$$I_2 = Y_2 * V_2$$

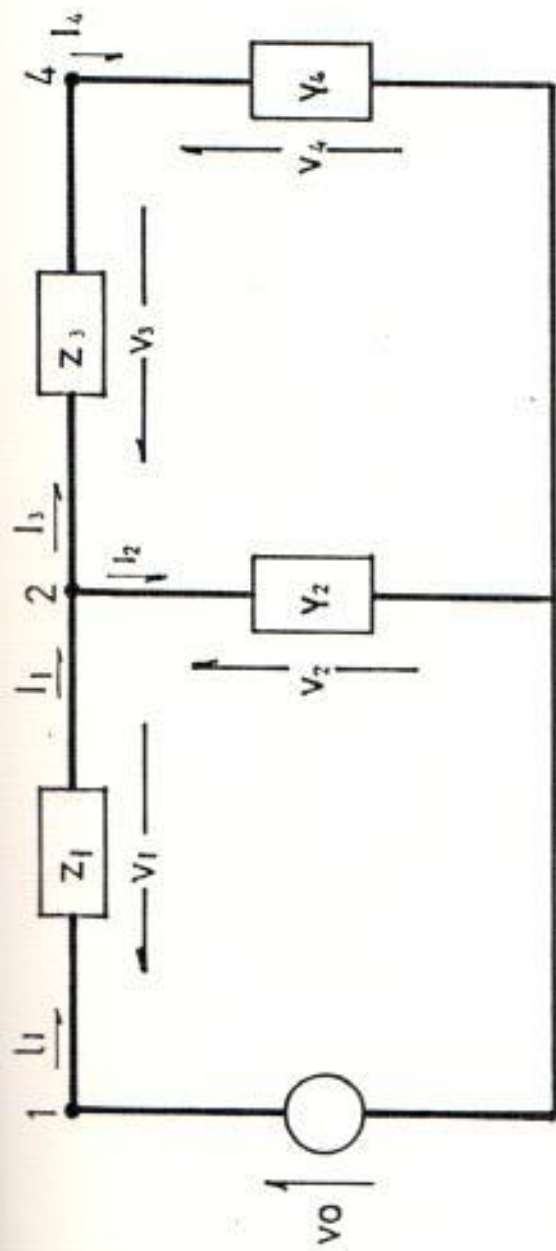


FIGURA 3.1.1.

CIRCUITO MONOFASICO LINEAL SIMPLE

Al aplicar las leyes de Kirchoff en el punto 2 obtenemos :

$$I_1 = I_2 + I_3$$

Si se repite el proceso hasta calcular el voltaje de la fuente  $V_0$  tenemos ;

$$V_1 = I_1 * Z_1$$

$$V_0 = V_1 + V_2$$

En cambio para circuitos monofásicos no lineales se utilizará un circuito similar al anterior con la diferencia que las admitancias son reemplazadas por cargas constantes que representan una potencia compleja constante.

El proceso de solución es idéntico al realizado anteriormente. Si nos referimos a la figura N° 3.1.2. tenemos:

Se asume un valor de voltaje en el punto 4, esto es  $V_4$  para calcular la corriente que pasa por la carga  $S_4$ .



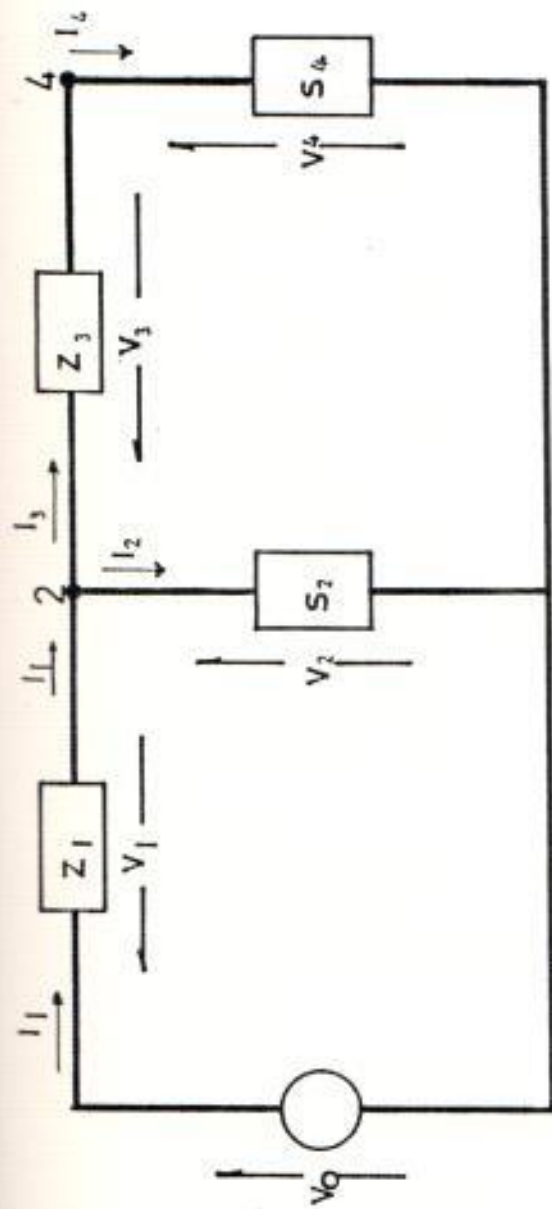


FIGURA Nº 3.1.2.

CIRCUITO MONOFASICO NO LINEAL

$$I4 = ( S4/V4 )^*$$

Luego continuamos calculando las demás variables del circuito, esto es :

$$I3 = I4$$

$$V3 = I3 * Z3$$

$$V2 = V3 + V4$$

$$I2 = ( S2/V2 )^*$$

$$I1 = I2 + I3$$

$$V1 = I1 * Z1$$

$$V0 = V1 + V2$$

Cuando las cargas son modeladas como potencia compleja constante, los sistemas de ecuaciones se convierten en no lineales.

Entonces la solución de las ecuaciones es un proceso iterativo.

Para sistemas radiales es muy difícil saber cual es el valor del voltaje de recepción, y para el proceso iterativo de solución se asume que el valor del voltaje de envío es siempre conocido.

Cuando se termina el cálculo del voltaje de la barra de envío, se compara con un valor real conocido, por medio de la siguiente relación :

$$E = V_0 \text{ (conocido)} - V_0 \text{ (calculado)}$$

Luego este error puede interpretarse como el producido por el hecho de haber tomado la asunción del voltaje en la barra de recepción.

Es entonces donde realmente comienza el proceso, ya que el valor de voltaje de la barra de recepción va a ser modificado por la siguiente relación :

$$V_{\text{recepción}}(\text{nuevo}) = V_{\text{recepción}}(\text{anterior}) + E$$

Con este nuevo valor del voltaje se debe realizar el cálculo de flujo de carga del sistema y así se seguirá hasta que el valor del error sea menor que la tolerancia permitida. Generalmente de acuerdo a la concepción del programa para llegar a un error de  $1 * 10^{**(-6)}$ , se necesitan menos de diez iteraciones.

### 3.1.2 SOLUCION DE CIRCUITOS MONOFASICOS CON RAMIFICACIONES LATERALES.

La técnica utilizada en esta tesis, también nos sirve de una manera óptima para resolver este tipo de circuitos, pese a que se tengan ramificaciones, ya que esto complica un poco la solución.

Consideremos la figura N° 3.1.3. para este caso.

Para resolver este tipo de circuitos, se debe al igual que los anteriores casos, asumir un valor de voltaje en la barra final de recepción.

Para este caso se observa dos barras finales, por lo que se puede escoger cualquiera de las dos para iniciar el cálculo.

La barra que escojeremos para iniciar el cálculo la barra cuatro; por lo que :

$$I_4 = ( S_4/V_4 )^{\wedge}$$

$$V_2 = V_4 + I_4 * Z_4$$

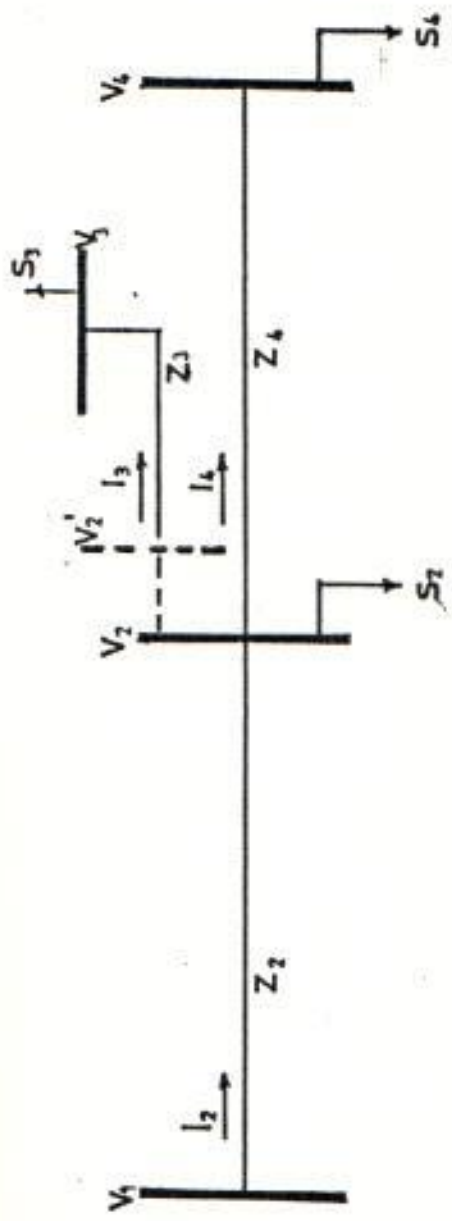


FIGURA N° 3.1.3.

CIRCUITO MONOFASICO NO LINEAL CON RAMIFICACIONES

Como en este punto es donde encontramos la derivación; lo que debemos calcular es la corriente  $I_2$  y para esto debemos conocer la corriente  $I_3$  ya que :

$$I_2 = I_3 + I_4 + (S_2/V_2)^*$$

Pero  $I_3$  no puede ser calculado mientras no se asuma un valor para  $V_3$  ya que :

$$I_3 = ( S_3/V_3 )^*$$

Debemos tomar el voltaje inicial de la barra 3, para calcular la corriente  $I_3$  y por último determinamos el valor del voltaje  $V_2'$  :

$$V_2' = V_3 + I_3 * Z_3$$

Debemos llegar hasta el punto en que  $V_2'$  sea igual a  $V_2$ . En caso de haber una diferencia, entonces será aplicado el procedimiento anteriormente enunciado para el cálculo del error.

$$E = V_2 - V_2'$$

Si E es mayor que la tolerancia permitida :

$$V3 \text{ (nuevo)} = V3 \text{ (anterior)} + E$$

Cuando este error sea menor que el límite de tolerancia permitido, se podrá determinar la corriente I2.

Luego :

$$V1 = V2 + I2 * Z2$$

Si este valor no es igual al voltaje inicial especificado, la solución debe ser ajustada mediante el error existente. Para calcular el error utilizamos la fórmula :

$$E = V1 \text{ (especificado)} - V1 \text{ (calculado)}$$

$$V4 \text{ (nuevo)} = V4 \text{ (anterior)} + E$$

Con éste valor de V4 repetimos el proceso iterativo hasta alcanzar un valor de error por debajo de la tolerancia especificada. Por esta razón nos vemos precisados a realizar un proceso iterativo dentro de el cálculo total.

Este tipo de sistemas radiales es muy utilizado en las redes de distribución.

### 3.1.3. SOLUCION DE SISTEMAS TRIFASICOS RADIALES.

Un ejemplo de este tipo de sistemas lo podemos apreciar en la figura N° 3.1.4.

Para utilizar la técnica de la escalera para circuitos trifásicos es necesario conocer el uso de los modelos trifásicos tal como se lo analizó en el capítulo anterior.

La diferencia que existe entre la solución de los circuitos monofásicos y los trifásicos es la forma como son expresadas las ecuaciones.

Se debe utilizar el álgebra tanto en su forma compleja así como la matricial.

Como en todos los casos se debe asumir el valor de voltaje  $V_3$  de recepción :



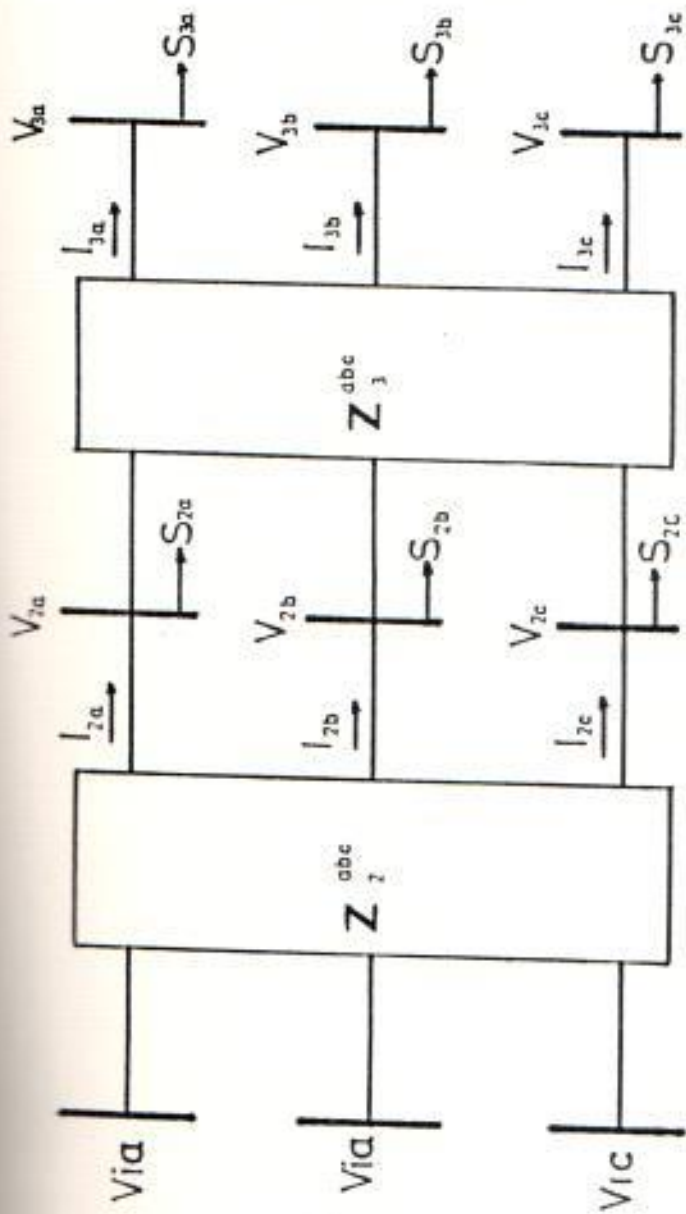


FIGURA 3.14. CIRCUITO TRIFASICO

$$V3(abc) = \begin{bmatrix} V3a \\ V3b \\ V3c \end{bmatrix}$$

Luego la corriente I3 debe ser calculada mediante la ecuación :

$$I3(abc) = [ S3(abc) / V3(abc) ]^*$$

Con esta corriente el voltaje V2 será :

$$V2(abc) = V3(abc) + I3(abc) * Z3(abc)$$

A continuación calculamos la corriente I2 :

$$I2(abc) = I3(abc) + [ S2(abc)/V2(abc) ]^*$$

Y por último se determina el voltaje de la barra inicial :

$$V1(abc) = V2(abc) + I2(abc) * Z2(abc)$$

En la barra inicial es necesario chequear el que el error de las tres fases sea menor que la tolerancia permitida, en caso con-

trario se deberá hacer el ajuste correspondiente :

$$E_a = V_{1a}(\text{especificado}) - V_{1a}(\text{calculado})$$

$$E_b = V_{1b}(\text{especificado}) - V_{1b}(\text{calculado})$$

$$E_c = V_{1c}(\text{especificado}) - V_{1c}(\text{calculado})$$

Expresado en forma matricial :

$$E(\text{abc}) = V_1(\text{abc})(\text{especificado}) \\ - V_1(\text{abc})(\text{calculado})$$

El ajuste deberá ser calculado aplicando la la expresión :

$$V_3(\text{abc})(\text{nuevo}) = V_3(\text{abc})(\text{anterior}) + E(\text{abc})$$

Esto es :

$$V_{3a}(\text{nuevo}) = V_{3a}(\text{anterior}) + E_a$$

$$V_{3b}(\text{nuevo}) = V_{3b}(\text{anterior}) + E_b$$

$$V_{3c}(\text{nuevo}) = V_{3c}(\text{anterior}) + E_c$$

Al corregir el voltaje de la barra final, se estará en capacidad de calcular una nueva iteración, este proceso continuará hasta que el error sea menor que la toleran

cia permitida en las tres fases.

Como vemos la solución de circuitos trifásicos es idéntico al utilizado para circuitos monofásicos.

Se pueden resolver los sistemas Trifásicos con ramales laterales aplicando la misma técnica utilizada para resolver los circuitos monofásicos con ramificaciones laterales.

### 3.2. FORMULACION DE 'Y' BARRA UTILIZANDO ORDENAMIENTO Y ALMACENAMIENTO OPTIMO.

Para utilizar de una manera óptima las matrices, se debe hacer uso de las leyes de Ohm's y Kirchhoff para encontrar la formulación matricial de tal forma que resuelvan cantidades eléctricas.

Esta aproximación admite dos matrices cuando la ley de corrientes de Kirchhoff es examinado; esas son llamadas matrices de barras y ella resulta del

hecho que la suma de las corrientes que llegan o salen de una barra es cero.

La matriz de barra escrita en términos de las admitancias vienen directamente de la aplicación de las ley de corrientes de Kirchhoff aplicada a cada barra del circuito .

Sea la barra  $j$  una barra escogida del circuito y además de una barra de referencia llamada barra 0.

Luego :

$$\sum_{i=1}^n I(ji) = I(j) \quad ( 60 )$$

Donde  $I(j)$  es la corriente inyectada desde una fuente externa al sistema en la barra  $j$  e  $I(j.i)$  es la corriente saliente de la barra  $j$  hacia la barra  $i$  por medio de una línea de transmisión de energía.

$$I(ji) = Y(ji) * [Vj - Vi] \quad ( 61 )$$

Donde  $Y(ji)$  es la admitancia de la línea de  $j$  hacia  $i$ . La notación de  $I(ji)$  indica que esta admitancia corresponde a la de la línea. Ciertos

elementos tienen valor cero, esto es por ejemplo  $I(jj)$  en la cual indica que no hay una línea que una la barra  $j$  consigo misma. También será cero si la impedancia de la línea es infinita. Es de notar que en la última ecuación  $V_j$  y  $V_i$  son los voltajes de barra con respecto a la barra de referencia. La ecuación (61) es reemplazada en la ecuación (60) y obtenemos :

$$\sum_{i=1}^n Y(ji) * [V_j - V_i] = I_j$$

Note que  $V_j$  y  $V_i$  son los voltajes de barra con respecto a la barra 0 (referencia). Esta ecuación está escrita para  $i = 1, 2, \dots, n$  y el coeficiente de voltaje de  $V_i$  en la ecuación de Kirchhoff en la barra  $j$  es :

$$\sum_{i=1}^n Y(ji)$$

Mientras el coeficiente de  $V_i$  en la ecuación  $j$  es igual a  $-Y_{ji}$ .

De manera general tenemos :

$$I_n = (-Y_{n1}) * V_1 + (-Y_{n2}) * V_2 + \dots + \left( \sum_{i=1}^n Y_{ni} \right) * V_n \quad ( 62 )$$

Observando ésta ecuación podemos expresar que :

$$I(\text{barra}) = Y(\text{barra}) * V(\text{barra})$$

Donde  $I(\text{barra})$  es el vector en la barra de inyección y representa el enésimo fasor de las corrientes de inyección;  $Y(\text{barra})$  es la matriz  $n \times n$  de los coeficientes indicados anteriormente y  $V(\text{barra})$  es el vector de voltaje de la barra  $n$  referida a la barra 0.

Una de las características de la matriz admitancia es el hecho de que es compleja y simétrica.

En una matriz grande quizá existan el 95% de sus elementos iguales a cero, obviamente esto resulta ineficiente para la memoria del computador, ya que estamos ocupando espacios en memoria correspondientes a los ceros y elementos repetidos. Por lo que necesitamos un método eficiente para comprimir la matriz de tal forma que:

- 1.- Ningún elemento cero sea tomado en cuenta.
- 2.- Se identifique plenamente las posiciones.

Consideremos la siguiente matriz esparcida:

$$YBUS = \begin{bmatrix} 15 & -10 & -5 & 0 & 0 & 0 \\ -10 & 10 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -5 & 0 & 25 & -12 & -8 & 0 \\ 0 & 0 & -12 & 12 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -8 & 0 & 23 & -15 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & -15 & 15 \end{bmatrix}$$

De los 36 elementos de la matriz, 20 son iguales a cero, luego:

$$S = \frac{Z}{n^2} = \frac{20}{36} = 0.556 \text{ p.u.}$$

Definamos dos vectores de posicionamiento.-

$$ZDIAG = [ 15, 10, 25, 12, 23, 15 ]$$

$$ZOFFD = [ -10, -5, -10, -5, -12, -8, -12, -8, -15, -15 ]$$

El primer vector contiene los elementos situados en la diagonal de la matriz, y el segundo contiene el resto de los elementos considerados por fila.

Para posicionar exactamente los elementos del vector que nos servirá para desarrollar la matriz Zbarra, utilizaremos dos vectores mas, esto es :



$$\text{IFILA} = [ 1, 3, 4, 7, 8, 10 ]$$

$$\text{ICOL} = [ 2, 3, 1, 1, 4, 5, 3, 3, 6, 5 ]$$

El vector IFILA identifica donde cada fila empieza en el vector ZOFFD; por ejemplo, la fila 3 comienza con el elemento fuera de la diagonal, (-5), el cual es el cuarto elemento en ZOFFD.

El vector ICOL identifica la posición por columna para cada elemento en ZOFFD; por ejemplo el cuarto elemento, esto es (-5), está posicionado en la columna 1.

A continuación determinaremos la memoria ahorrada utilizando este método.

Los vectores ZDIAG e IFILA contienen  $n$  elementos y los vectores ZOFFD e Icol, tienen  $n^2 - n - Z$  elementos, luego el número total de elementos viene dada por la siguiente fórmula :

$$\text{ETOT} = 2n + 2*(n^2 - n - Z) = 2*(n^2 - Z)$$

$$\text{ETOT} = 2n^2*(1-S)$$

## CAPITULO IV

ELABORACION DEL PROGRAMA PARA RESOLVER EL FLUJO DE CARGA TRIFASICO EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCION, APLICADO A UN COMPUTADOR PERSONAL.

### 4.1. GENERALIDADES.

Tomando como base un programa de flujo de carga el cual considera la carga como constante, se desarrollará un programa que considere la carga como variable en función de la variación de voltaje, además se aplicará el método de la escalera para la solución del problema.

Este sistema está diseñado para:

- 1.- Máximo número de barras : 50
- 2.- Máximo número de líneas : 50

- 3.- Capacitores : El sistema soporta hasta un máximo de un banco para cada barra de la alimentadora. La capacidad de los capacitores debe estar expresada en MVAR.
- 4.- Regulador de voltaje : El programa acepta un regulador colocado en el inicio de la alimentadora o en algún punto intermedio de ella. Se asume que los reguladores son del tipo de treinta y dos pasos, esto es con un  $\pm 10\%$  de regulación. El ancho banda debe de ser expresada en valores en por unidad.
- 5.- Cargas : Las cargas deben estar expresadas en MW y MVAR y permitidas para cada barra de la alimentadora.
- 6.- Opciones : Hay tres alternativas bajo las cuales se debe ejecutar el programa y estas son :  
Opción 1.- no existe regulador de voltaje.  
Opción 2.- El regulador está colocado en un punto intermedio de la alimentadora  
Opción 3.- El regulador esta colocado en el inicio de la alimentadora.
- 7.- Voltajes : Se deben especificar los voltajes de barra iniciales asumidos para cada barra. Y

si la opción escogida es con regulador se deberá expresar los voltajes deseados en la barra regulada.

- 8.- El programa de flujo de carga deberá estar cargado en la memoria fija de su computador. Se necesitan 750 Kbytes disponibles para poder instalar el programa, y el procedimiento para ejecutarlo es el siguiente :

Posiciónese en el directorio raíz, a continuación digite la palabra RUN y luego presione la tecla ENTER.

Se mostrará una pantalla en la que se indica cuales son los programas a disposición de los usuarios. Si usted desea utilizar alguno de ellos, deberá digitar el número de la opción requerida y oprima la tecla ENTER para su ejecución.

La pantalla se muestra en la figura 4.1.1.

LN1  
CALCULO DE FLUJO DE CARGA POR EL METODO DE LA ESCALERA

\*\*\*\*\*

- 1 =====> INGRESO DE DATOS A UN ARCHIVO.
- 2 =====> FLUJO/CARGA CON CARGA CTE Y LOS RESULTADOS  
POR PANTALLA.
- 3 =====> FLUJO/CARGA CON VARIACION DE VOLTAJE Y LOS  
RESULTADOS POR PANTALLA.
- 4 =====> FLUJO/CARGA CON CARGA CTE Y LOS  
RESULTADOS GRABADOS A UN ARCHIVO.
- 5 =====> FLUJO/CARGA CON CARGA VARIABLE Y LOS  
RESULTADOS GRABADOS A UN ARCHIVO.

SI DESEA EJECUTAR LOS PROGRAMAS DE FLUJO DE CARGA  
DIGITE EL NUMERO DE LA OPCION :

FIGURA 4.1.1.

#### 4.2. INGRESO DE DATOS.

Para ingresar los datos a su computador se debe ejecutar la opción 1 en el menú principal.

A continuación se podrá ingresar los datos de acuerdo a las instrucciones que se dan.

En primer lugar se ingresarán comentarios, los cuales aparecerán en cada hoja de los resultados.

Luego se ingresarán los datos generales, esto es : la opción del tipo del sistema el número de barras, el número de líneas de transmisión, la base de potencia en MVA, la tolerancia y el número de máximo de iteraciones.

A continuación se ingresarán los datos de barra, esto es número y nombre de la barra, el código de que tipo de barra y los voltajes iniciales tanto en magnitud así como en ángulo de cada fase. La magnitud debe ser en valores en por unidad y el ángulo se lo debe expresar en grados.

Aparecerá luego las instrucciones para ingresar los datos de carga para cada fase y barra.

Luego se deberá ingresar los datos de impedancias propias y mutuas de las líneas para cada fase. Deben estar expresadas en valores en por unidad.

Se pide los datos de voltaje deseados en la barra inicial para cada fase del sistema y en caso que la opción escogida sea con regulador se preguntará también sus voltajes deseados.

Una vez realizado este procedimiento se pregunta si desea grabar los datos a un archivo. Si la respuesta es SI entonces le pedirá digitar el nombre del archivo en que se va a grabar la información.

En caso contrario se volverá al principio del programa en el que pide digite los comentarios.

#### 4.3. PROCESO INTERACTIVO.

Como se dijo anteriormente el método de la escalera presupone el voltaje en la barra final y a partir de aquí se calculan las corrientes y las caídas de voltaje en los diferentes ramales del sistema, hasta llegar a la barra de generación.

Para iniciar lo que primero se hace es buscar la barra final de acuerdo a código de clase 2-0-0 ; se calcula en ese momento la corriente de la barra y se guarda el número de la barra para una posterior modificación.

Luego se busca la barra que está conectada a la barra final, y se calcula la caída de voltaje entre estas dos barras. Luego se calcula el voltaje de la nueva barra, de aquí en adelante existe un módulo repetitivo cuyo diagrama de flujo se muestra en la figura 4.3.1.

Ahora tomando como base la última barra se busca a su vez la barra siguiente conectada a ella. En la cual se pueden presentar cinco casos, que son los que siguen :

- a.- Cuando la nueva barra es la inicial.
- b.- Cuando la nueva barra es pasante.
- c.- Cuando la nueva barra es una barra con ramificaciones laterales.
- d.- Cuando la nueva barra es una barra regulada.
- e.- Cuando la nueva barra es la barra final de un de un regulador.



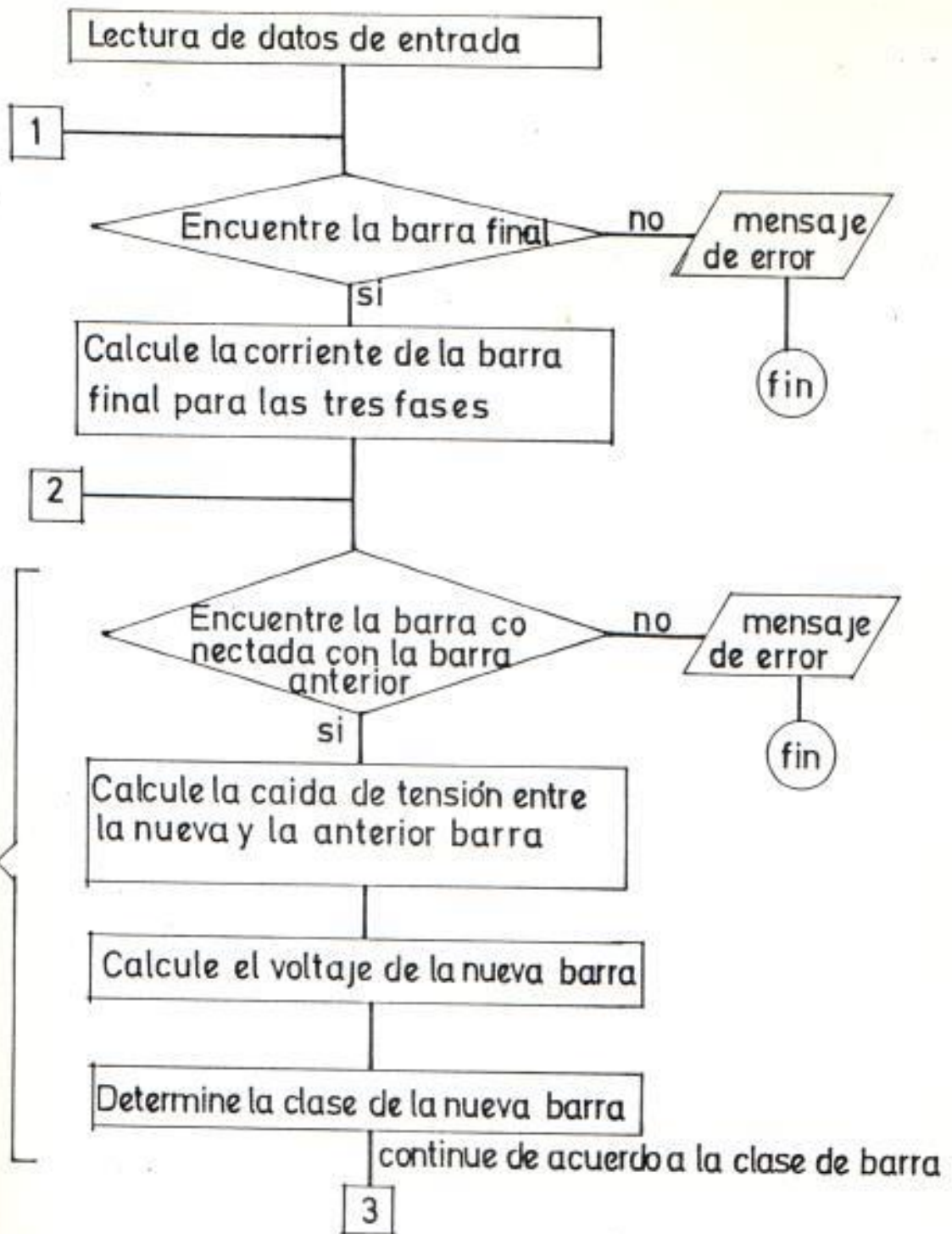


FIGURA Nº 4.3.1.

DIAGRAMA DEL FLUJO PARA ENCONTRAR LA BARRA FINAL, E INICIAR EL PROCESO.

Veamos a continuación el detalle para cada una de ellas.

Caso a. - Si la nueva barra es la barra inicial (código 1-1-0) se tienen dos posibilidades opcionales :

- Si la opción correspondiente al sistema es la número 1 (ningún regulador de voltaje), el programa calculará el error existente entre los valores calculados en el proceso interactivo y los valores iniciales conocidos para cada fase; luego se compara este error con la tolerancia permitida; si es menor el proceso terminará y se procederá a la impresión de los resultados ya sea por pantalla o a un archivo. Y si es mayor entonces se revisa si el número de iteraciones es menor que el permitido, si es así el proceso iterativo continuará, en caso contrario terminará el proceso y dará un mensaje en el que se indica que se alcanzado el número máximo de iteraciones; y si para todas las fases se cumple que el error es menor que la tolerancia entonces habrá terminado el proceso y se procederá a la impresión de los resultados. Su diagrama de flujo se muestra en la figura 4.3.2.

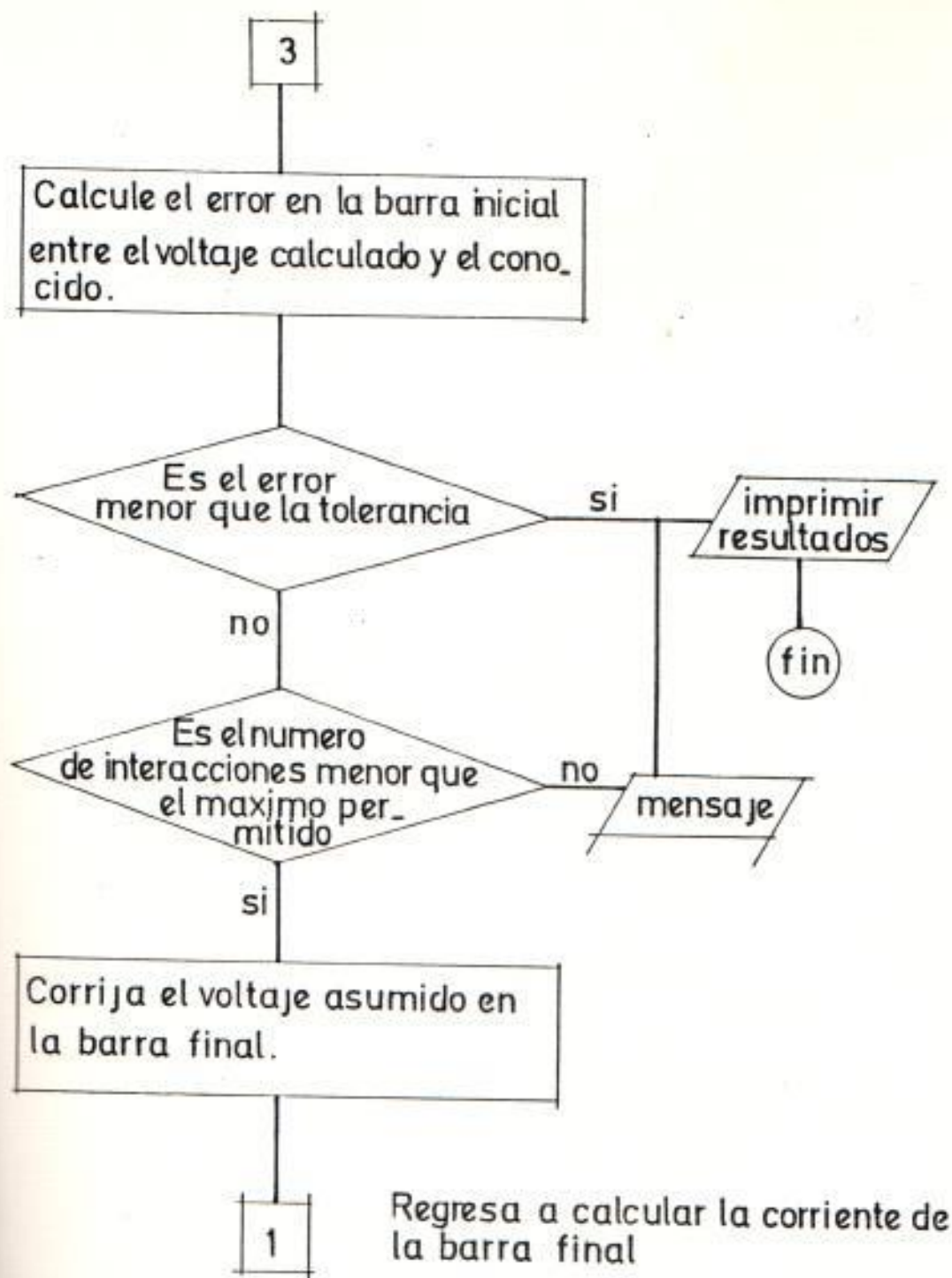


FIGURA Nº 4.3.2.

DIAGRAMA DE FLUJO PARA CALCULAR EL ERROR CUANDO SE ESCOJE LA OPCION 1.

- O si la opción del sistema es la número 3 : el programa así mismo calculará el error, si este es menor que el permitido entonces se terminará el proceso iterativo y se procederá a la impresión de los resultados ya sea a un archivo o por pantalla.

En caso contrario se moverá el tap del regulador de voltaje de tal forma que se consiga un mejor resultado para la barra inicial del mismo y se continúa el proceso iterativo, hasta llegar de nuevo a la barra inicial; y se vuelva a calcular el error. También se comprueba que el número de pasos del regulador no ha pasado del rango permitido, esto es de 16 pasos para aumentar y 16 pasos para reducir.

Cuando el error sea menor que la tolerancia se pasará a la impresión de los resultados, ya sea por pantalla o a un archivo, según la opción escogida.

El diagrama de flujo se muestra en la figura 4.3.3.

Caso b.- Cuando la nueva barra es una barra pasante (código 8-0-0), entonces se determina la corriente de la carga de la barra y se la suma a la

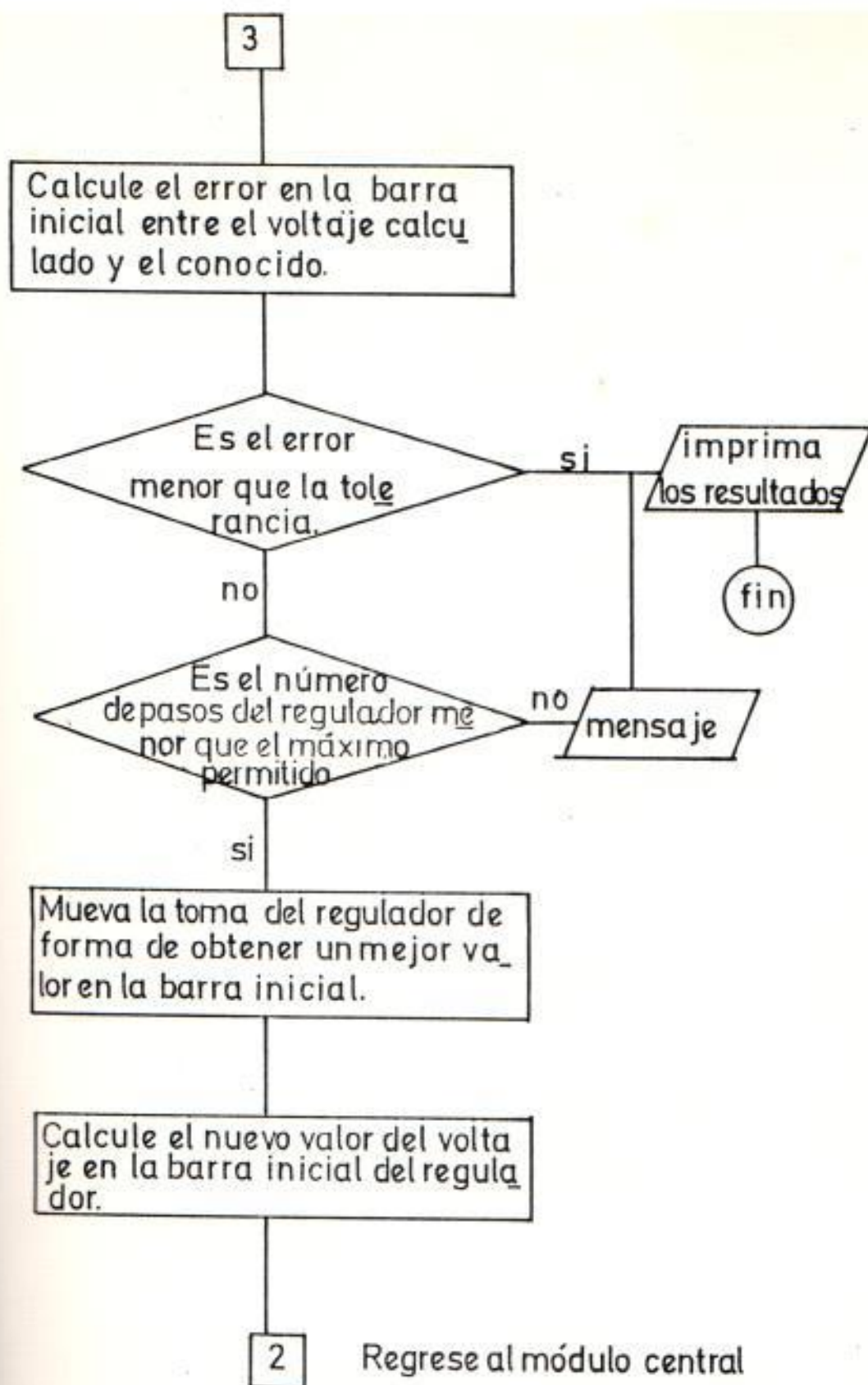


FIGURA 4.3.3.

PROGRAMA DE FLUJO PARA CALCULAR EL ERROR CUANDO SE

SELECCIONA LA OPCION 2

corriente de la línea existente. Luego se regresa al módulo central en el cual se busca la barra que está conectada a ella. Su diagrama de flujo se muestra en la figura 4.3.4.

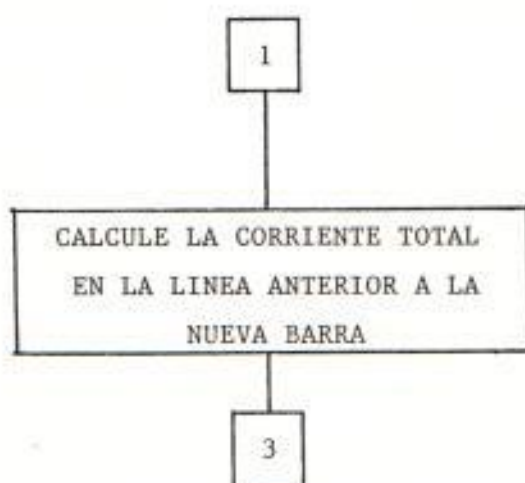


FIGURA 4.3.4.

Caso c.- Cuando la nueva barra es del tipo con ramificación lateral (códigos 3-A-0 y 1-B-1) se pueden presentar dos casos :

Si es la primera vez que encontramos ésta barra se guarda el valor de voltaje para posteriores comparaciones, y luego se busca la barra final de la ramificación.

Una vez encontrada la barra final se debe calcular la corriente en esta barra asumiendo un valor para el voltaje de acuerdo al de los datos de entrada, luego se pasa al módulo central del proceso para buscar la barra que está unida a la barra final de ramal.

Si la barra ya ha sido encontrada en el proceso iterativo entonces se procede a calcular el error entre el voltaje almacenado originalmente y el nuevo valor calculado. Luego se compara con la tolerancia permitida, si es menor se procede a revisar si se ha llegado al máximo de iteraciones; si se ha alcanzado el máximo entonces se mostrará un mensaje en el que indica que se ha llegado al máximo de iteraciones. En caso que no se haya alcanzado dicho valor entonces se procederá a corregir el voltaje de la barra final del ramal. De allí se regresa a calcular la corriente en la barra final del ramal.

Su diagrama de flujo se muestra en la figura 4.3.5

Caso d.- Cuando la barra es del tipo regulada el programa calcula el error existente entre el voltaje especificado para esta barra y el valor cal-

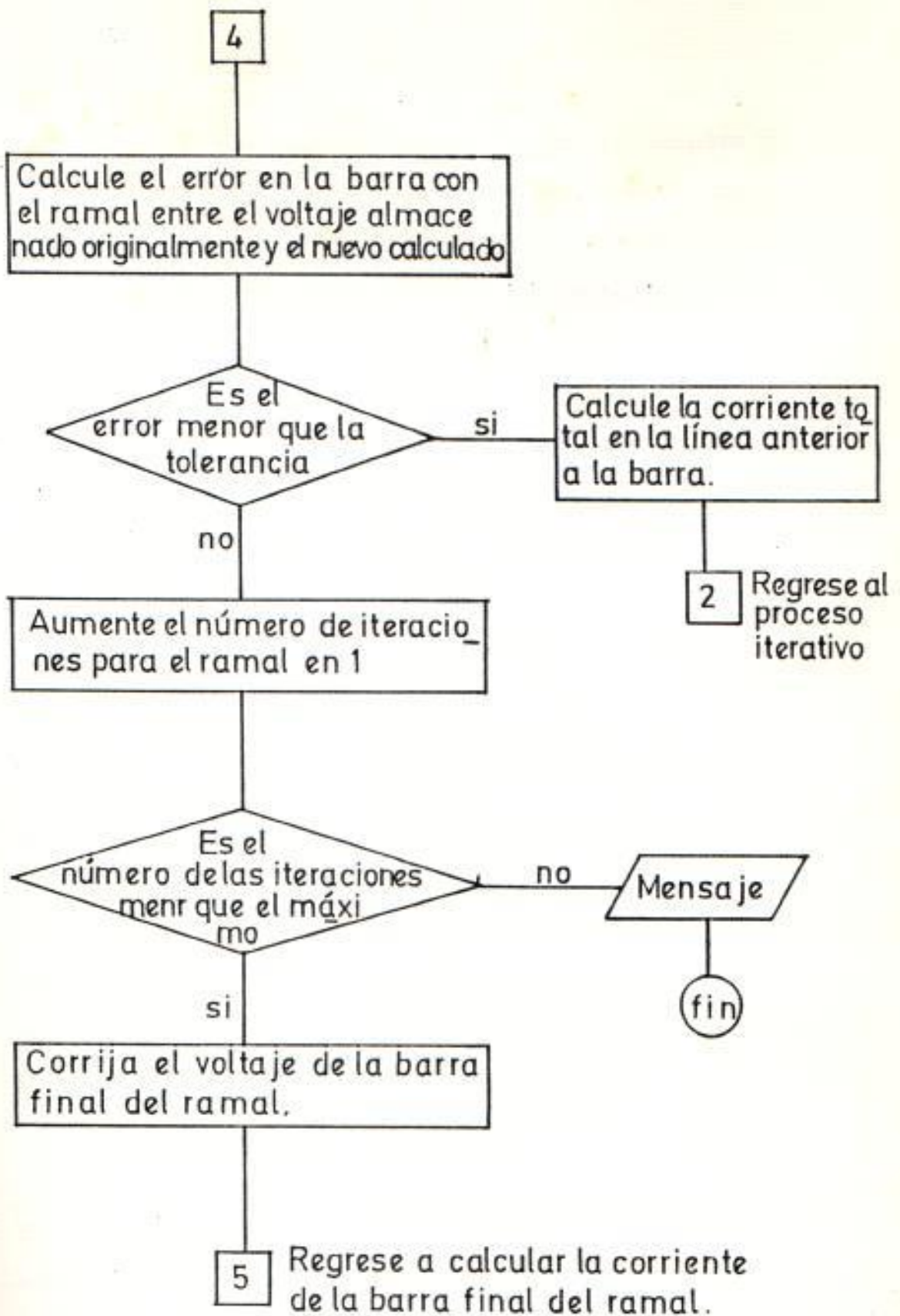


FIGURA 4.3.5.

DIAGRAMA DEL FLUJO DE VERIFICACION CUANDO LA BARRA ES DEL TIPO CON RAMIFICACIONES LATERALES.



culado en el proceso iterativo. Luego se compara con la tolerancia, si es menor se continuará con el proceso iterativo en el módulo central; en caso de que sea mayor se debe corregir el voltaje en un valor igual al error, a continuación se calcula la corriente de la barra final y se continúa con el proceso iterativo.

Su diagrama de flujo se muestra en la figura 4.3.6

Caso e. - Si la nueva barra es una barra final de regulador, se calcula primeramente la corriente de la carga de esta barra, luego se calcula la caída de tensión que hay en la impedancia del regulador, normalmente es este valor es despreciable, y se asume que el valor inicial del tap es 1.0, en consecuencia el voltaje de la barra inicial del regulador es el de la barra final menos la caída de tensión en la impedancia del regulador.

Existen dos posibilidades, si el regulador está al medio de la alimentadora (opción 2) o si el regulador está al inicio de la misma (opción 3).

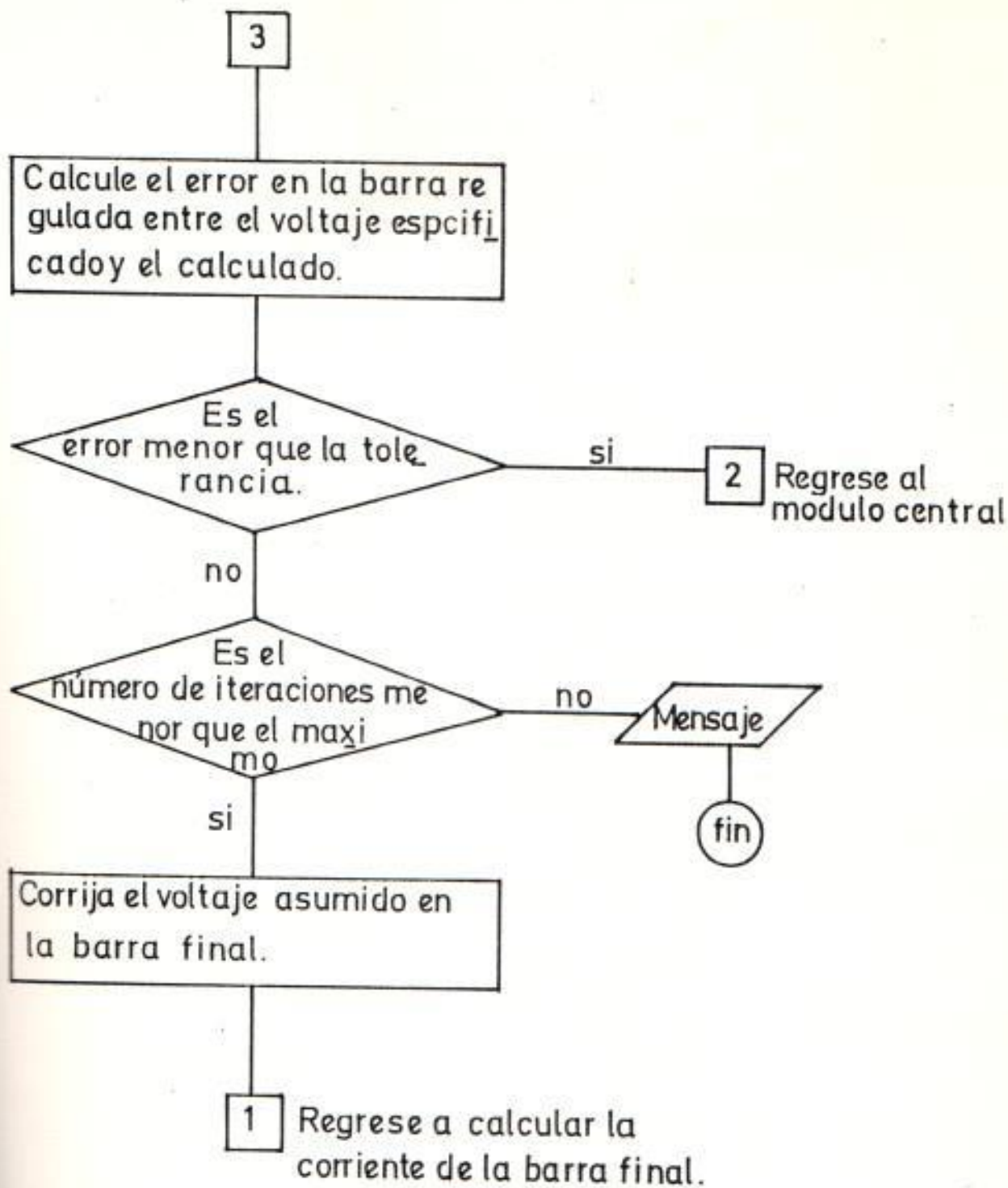


FIGURA 4.3.6.

FORMA DE FLUJO DE VERIFICACION CUANDO LA BARRA ES REGULADA.

Si el regulador se encuentra en el medio de la alimentadora se continúa con el módulo central.

Si el regulador se encuentra en el inicio de la alimentadora se calcula el error existente entre el voltaje especificado y el calculado.

Si este error es menor que el ancho de banda en todas las fases, se termina el proceso iterativo y se procede a sacar los resultados ya sea por pantalla o a un archivo, según la opción escogida al inicio del programa de flujo de carga.

Si el error para cada una de las fases es mayor que la tolerancia se debe cambiar el tap del regulador de tal manera que al variarlo se consiga un mejor resultado de voltaje en la barra inicial y así se continúa hasta que sea necesario.

Es necesario chequear que no se ha llegado al máximo número de pasos (16) . En caso contrario nos dará un mensaje que indica que se ha alcanzado el máximo número de pasos del regulador.

Si el error es menor que la tolerancia entonces se procederá a la impresión de los resultados. Por o

tro lado si se llega al máximo número de iteraciones se imprimirán los resultados alcanzados y se muestra un mensaje.

Su diagrama de flujo se muestra la figura 4.3.7. Para determinar y aplicar la variación de voltaje a las cargas se aplica el diagrama de flujo, que se muestra en la figura 4.3.8. En este notamos que se aplica normalmente el proceso iterativo del programa de flujo de carga, calculándose todas las variables, esto es voltajes y corrientes. Luego se calcula el valor de la potencia tanto activa como reactiva para cada barra del sistema considerando el error existente y se almacena estos valores.

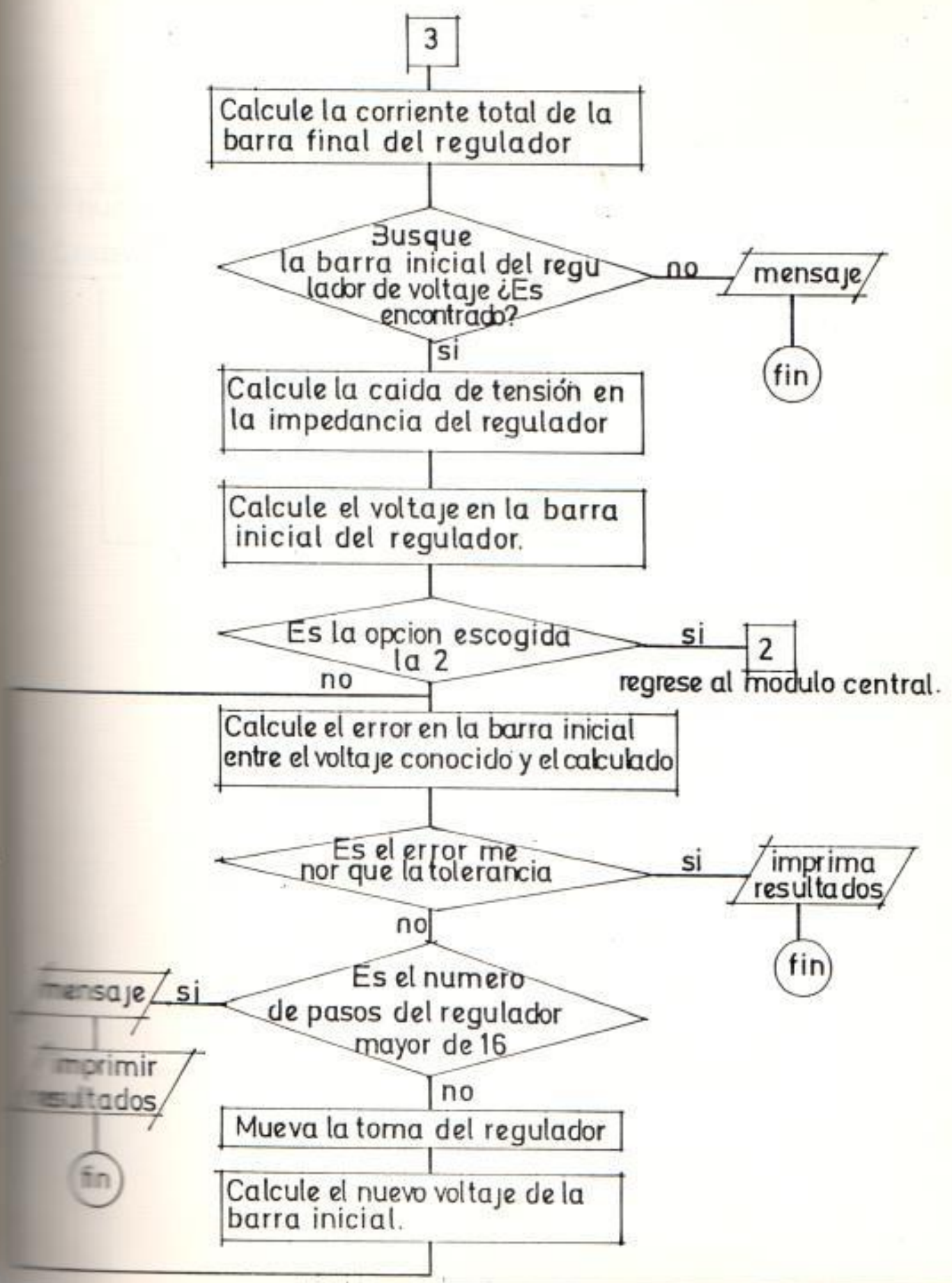
Luego se pregunta si la diferencia de potencias anterior y nueva son menores que la tolerancia. Si la respuesta es SI entonces terminará el proceso y se continuará con la impresión de los resultados.

En caso contrario se procede a cambiar el valor anterior de las potencias por el valor nuevo calculado y se retorna al módulo central del proceso.

Este método se denomina de lazo externo, y tiene como características :

FIGURA N° 4.3.7.

DIAGRAMA DE FLUJO PARA CUANDO EL SISTEMA TIENE REGULADOR



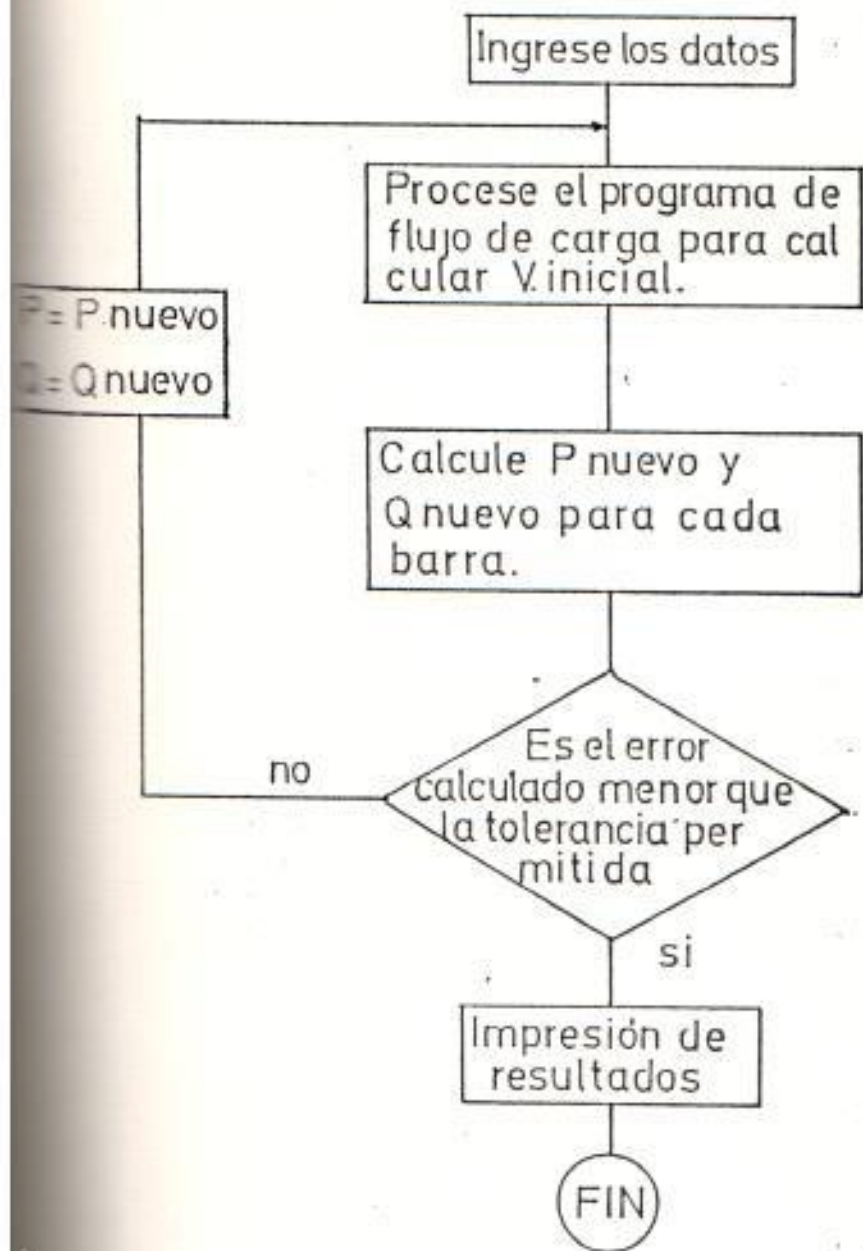


FIGURA 4.3.8.

DIAGRAMA DE FLUJO DEL METODO DE LAZO EXTERNO

- 1.- Fácil de utilizar para cualquier programa de flujo de carga.
- 2.- Solo son necesarias unas pequeñas modificaciones en el programa de flujo de carga original.
- 3.- Toma más tiempo antes de que consiga que la solución llegue a la convergencia.

Existe también otro método de cálculo, de lazo interior, pero éste no ha sido tomado en cuenta para el programa y sus características son las siguientes :

- 1.- La velocidad de convergencia es mucho más rápida que la del método anterior.
- 2.- Necesita mucho más modificaciones en el programa del usuario.

#### 4.4. SALIDA DE RESULTADOS.

Los reportes del programa de flujo de carga trifásico constan de las siguientes características :

- a.- Listado de los datos generales del sistema y la alternativa escogida.

programa de calculo.



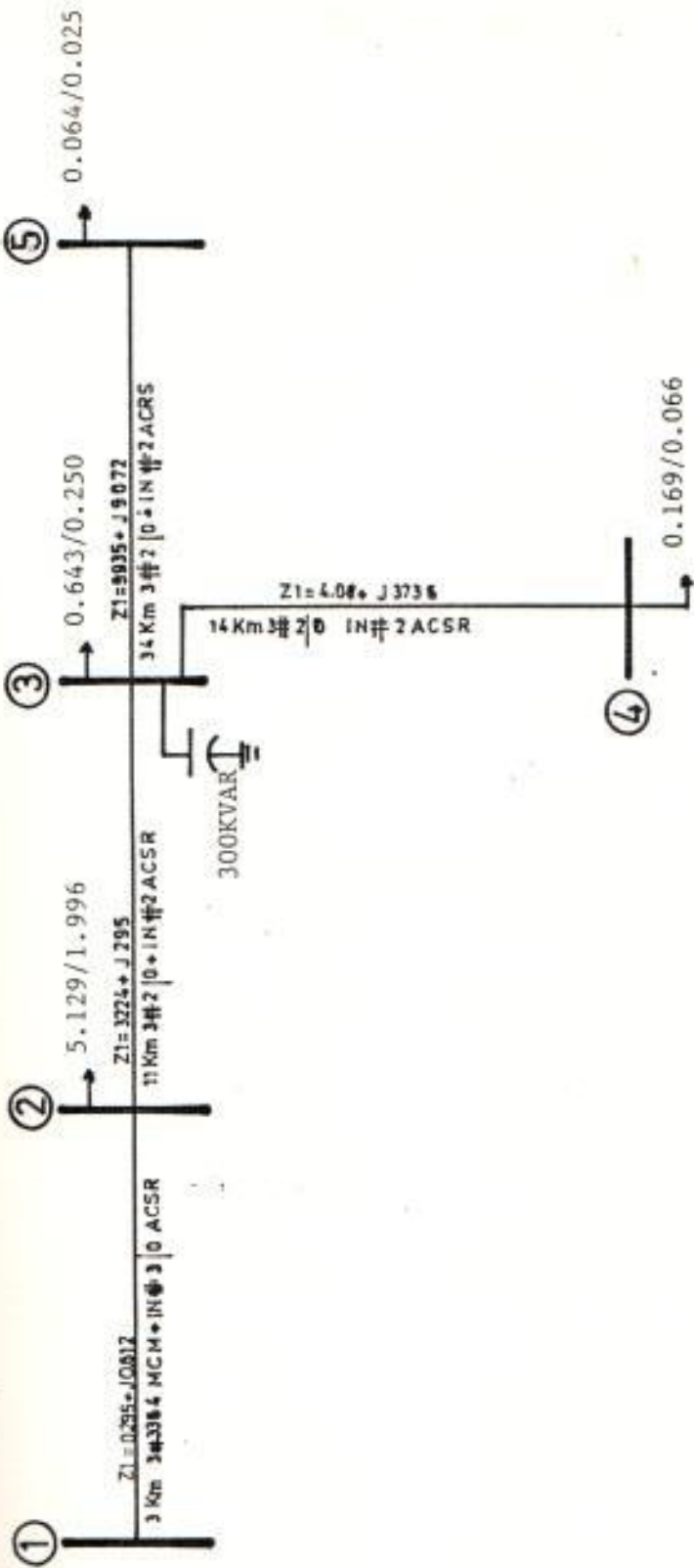
## CAPITULO V

ANALISIS COMPARATIVO DE RESULTADOS Y EJEMPLOS DE APLICACION.

5.1. COMPARACION CON LOS RESULTADOS DE UN FLUJO DE CARGA POR FASE Y MODELO DE CARGA CONSTANTE.

Ejemplo N° 1

Para poder realizar un análisis comparativo entre los resultados de los flujos de carga por fase y uno trifásico, tendremos que referirnos a un sistema de distribución totalmente balanceado; tal como el sistema mostrado a continuación en la figura 5.1.1.



UNIDADES: potencia: MW/MVAR

impedancias: P.U. (bases: 100 MVA y 13.8 Kv)

|   |                    |
|---|--------------------|
| ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL            |                    |
| DIAGRAMA UNIFILAR DE LA ALIMENTACION DEL EJEMPLO #1 |                    |
| FIGURA:<br>5.1.1.                                   | FECHA:<br>ENERO 89 |

- FLUJO DE CARGA POR FASE.

Consideremos el diagrama unifilar de una alimentadora cualquiera, como el que apreciamos en la figura 5.1.1. Como vemos el sistema mostrado está perfectamente balanceado, por lo que considerará únicamente una de sus fases.

En el anexo B se muestran los resultados del análisis utilizando el programa de flujo de carga por fase.

- FLUJO DE CARGA TRIFASICO (CARGA CONSTANTE).

Tomemos el mismo sistema mostrado en la figura 5.1.1. para analizarlo con el programa de flujo de carga trifásico que considera la carga constante.

Los resultados se muestran en el anexo C.

- FLUJO DE CARGA TRIFASICO CON MODELO DE CARGA VARIABLE EN FUNCION DEL VOLTAJE.

Para el mismo sistema mostrado en la figura 5.1.1. se lo analizará con el programa que considera la carga variable.

Los resultados se muestran en el apéndice D.

COMPARACION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS.

De los resultados obtenidos para las técnicas aplicadas podemos observar que los valores son bastante aproximados. Esto quiere decir que todos los procedimientos son correctos, pero se obtiene una mejor aproximación con el método trifásico que modela la carga en función de la variación de voltaje de las barras.

Siendo éste ejemplo el de una alimentadora ideal con líneas trifásicas no transpuestas y cargas totalmente balanceadas, los resultados son más precisos con el análisis del flujo de carga trifásico que por el método por fases.

Los resultados del flujo de carga trifásico muestran los flujos de potencia y niveles de voltaje, de las tres fases de cada barra de la alimentadora que para poder comparar los resultados de estos tres métodos no se han considerado los desbalances en las cargas para poder hacer la comparación con el flujo de carga por fase.

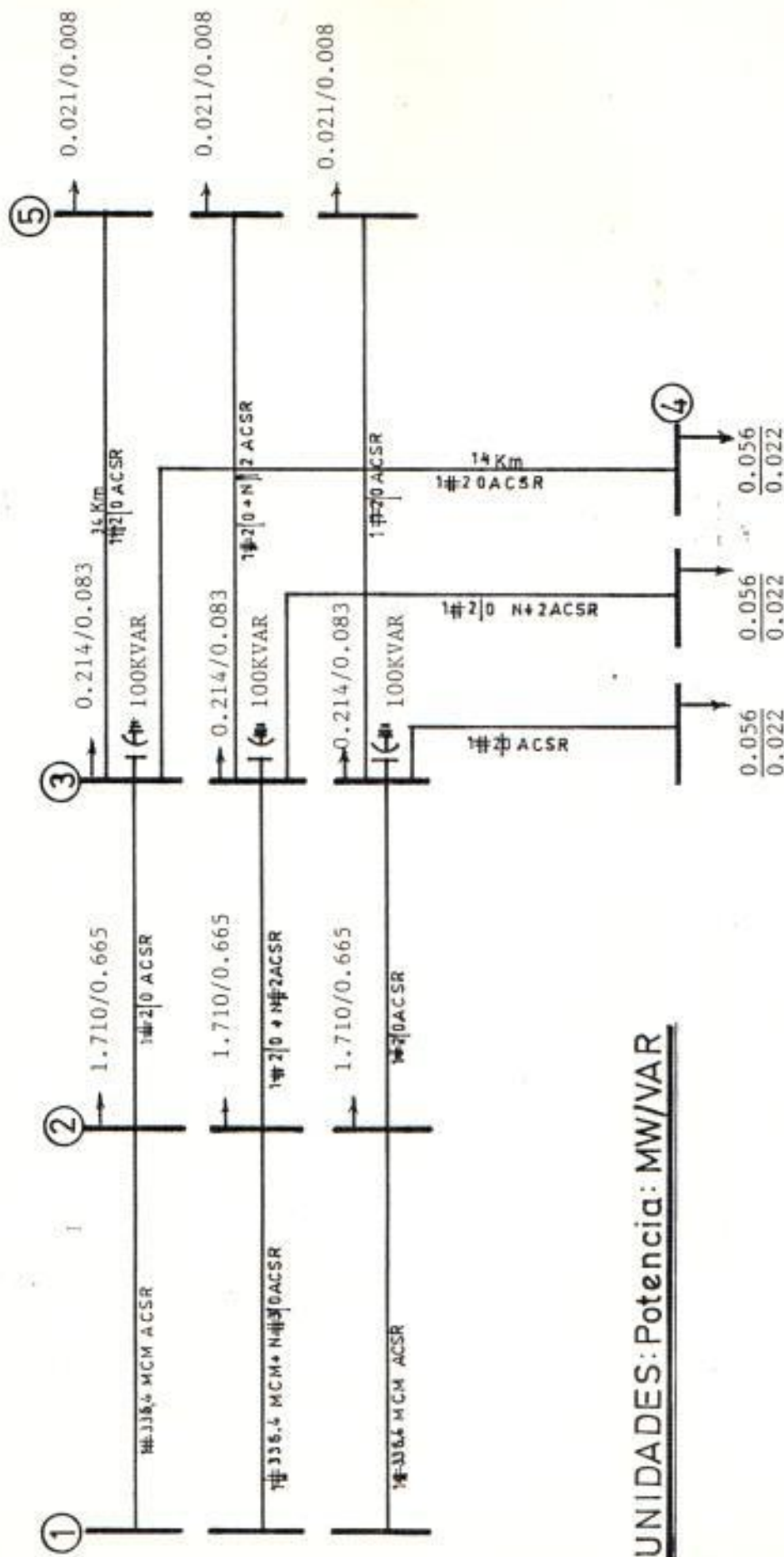
La figura 5.1.2 muestra la magnitud y el sentido de los flujos de potencia por fase para cada barra del sistema analizado.

En la figura 5.1.3. se muestra la magnitud y el sentido del flujo de potencia calculado con el método trifásico con modelo de carga constante.

En la figura 5.1.4. muestra la magnitud y el sentido del flujo de potencia calculado con el método trifásico con modelo de carga en función de la variación del voltaje de barras.

En la tabla 5.1.1. se muestra los niveles de voltaje para cada fase y para cada método aplicado.

En la tabla 5.1.2. comparamos los resultados de potencia obtenidos para cada método.



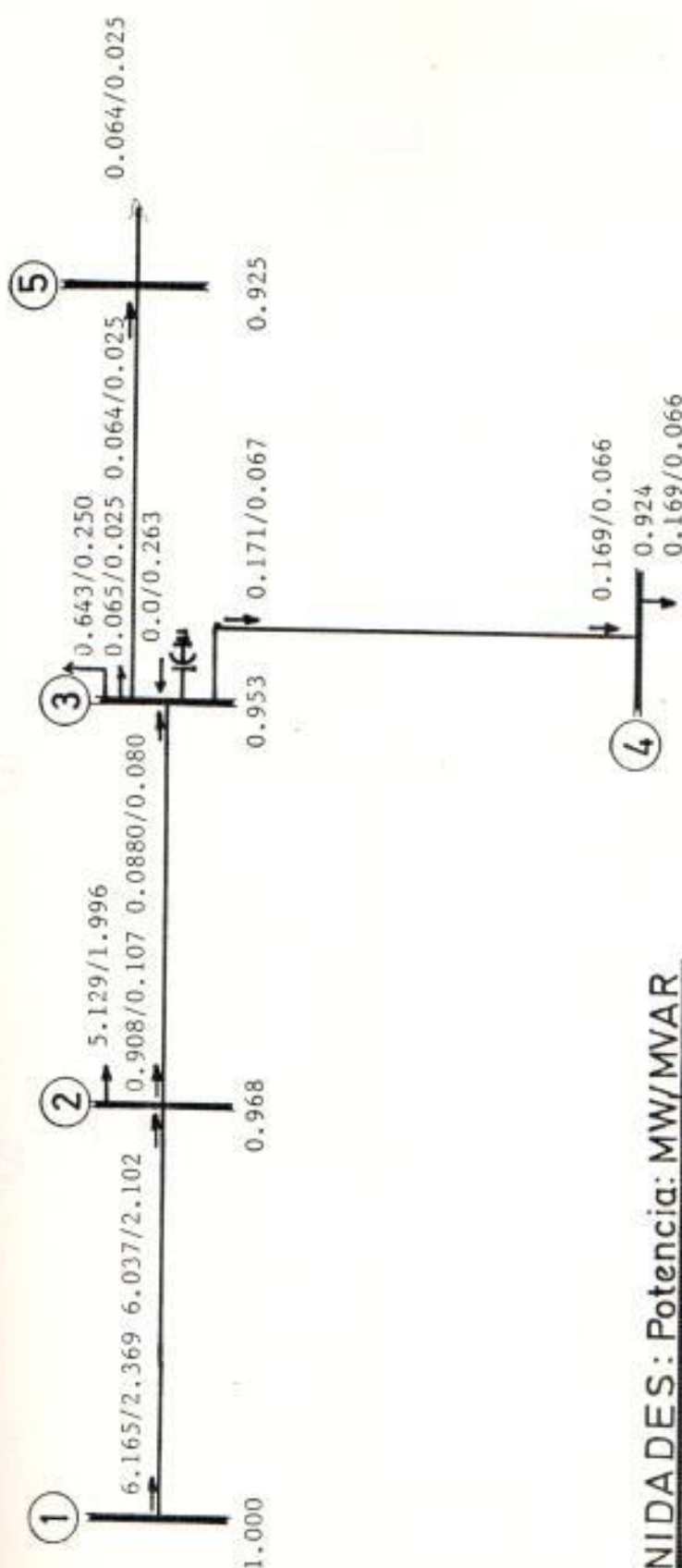
UNIDADES: Potencia: MW/VAR

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

DIAGRAMA TRIFÁSICO DE LA ALIMENTADORA DEL EJEMPLO #1.

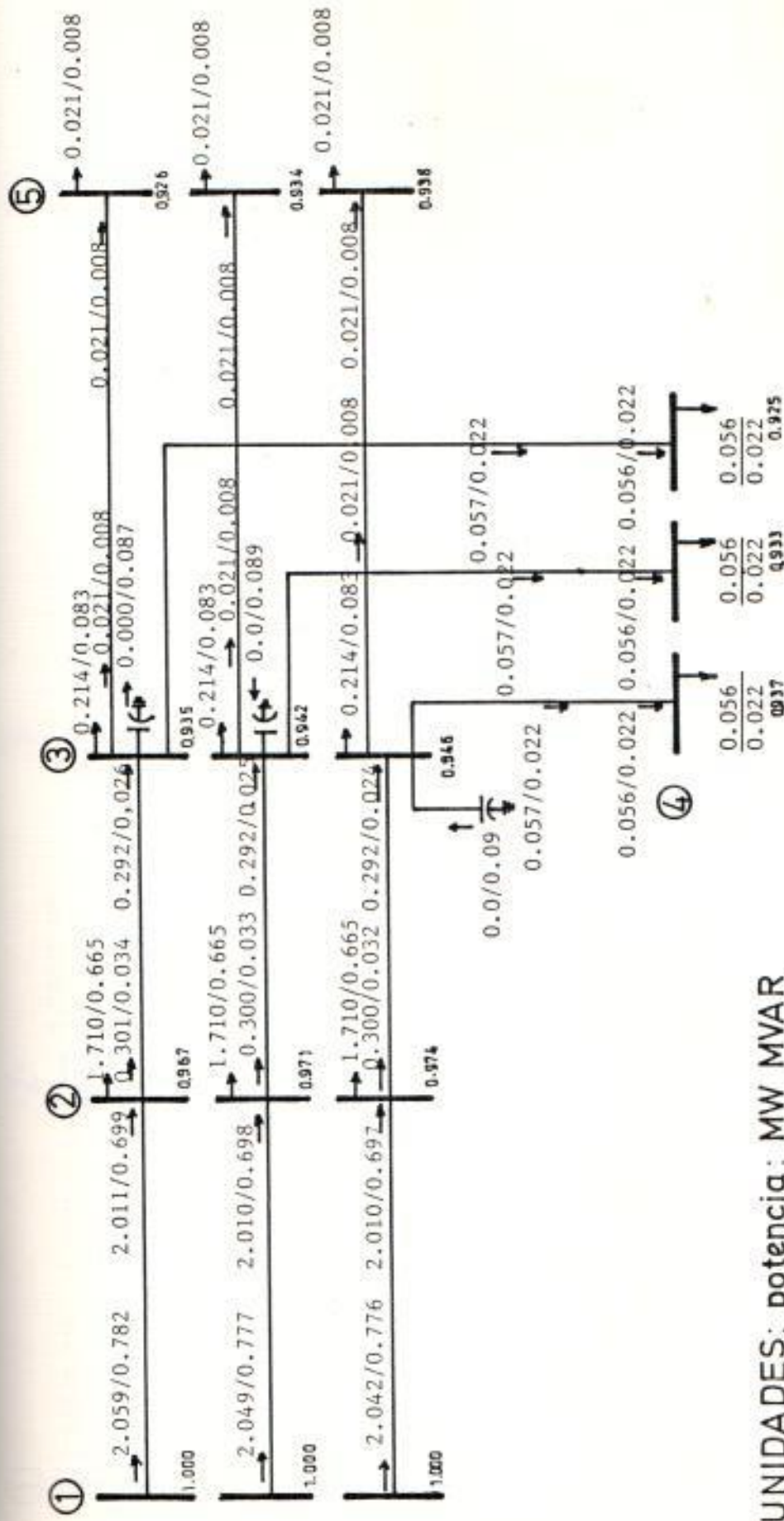
FIGURA:  
5.1.2.

FECHA:  
ENERO 89



UNIDADES: Potencia: MW/MVAR  
Voltios PU  
Base: 138 Kv.

|  |                  |
|--|------------------|
| ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL                   |                  |
| FLUJO DE CARGA POR FASE DE LA ALIMENTADORA DEL EJEMPLO # 1 |                  |
| FECHA<br>ENERO 89  | FIGURA<br>5.1.2. |



UNIDADES: potencia: MW MVAR

voltios : por unidad (138 kv base)

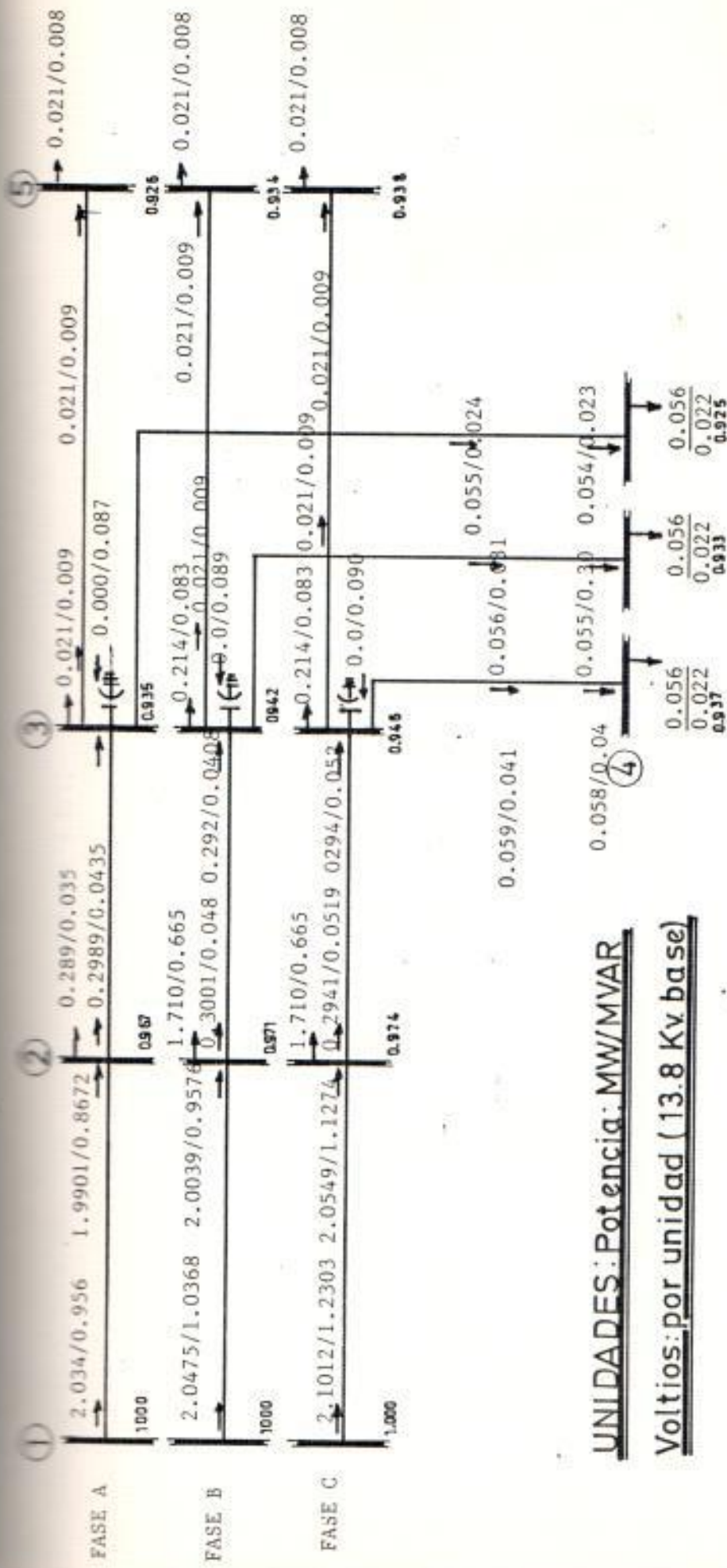
ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

FLUJO DE CARGA TRIFASICO DE CARGA  
CONSTANTE DE LA ALIMENTADORA DEL  
EJEMPLO #1

FECHA:  
ENERO 89

FIGURA:  
5.1.3.





UNIDADES: Potencia: MW/MVAR  
Voltios: por unidad ( 13.8 Kv base)

|   |                |
|---|----------------|
| ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL                            |                |
| FLUJO DE CARGA TRIFASICO VARIABLE DE LA ALIMENTADORA DEL EJEMPLO #1 |                |
| FECHA<br>ENERO 89   | FIGURA: 5.1.4. |

TABLA 5.1.1.1.

VOLTAJES DE LA ALIMENTADORA DEL EJEMPLO # 1 EN PU

| BARRA # | FLUJO POR FASE | FLUJO TRIFASICO CARGA CONSTANTE |        |        | FLUJO TRIFASICO CARGA= F ( $\Delta$ V) |        |        |
|---------|----------------|---------------------------------|--------|--------|--|--------|--------|
|         |                | FASE A                          | FASE B | FASE C | FASE A                                 | FASE B | FASE C |
| 1       | 1.0            | 1.0                             | 1.0    | 1.0    | 0.998                                  | 1.001  | 1.003  |
| 2       | 0.968          | 0.967                           | 0.971  | 0.974  | 0.964                                  | 0.969  | 0.966  |
| 3       | 0.935          | 0.935                           | 0.942  | 0.946  | 0.932                                  | 0.939  | 0.934  |
| 4       | 0.924          | 0.925                           | 0.933  | 0.937  | 0.923                                  | 0.929  | 0.922  |
| 5       | 0.925          | 0.926                           | 0.934  | 0.938  | 0.923                                  | 0.930  | 0.926  |

TABLA 5.1.1.2.  
RESUMEN DE LA ALIMENTADORA DEL EJEMPLO 1

|                              | FLUJO POR FASES |       | FLUJO TRIFASICO TOTAL<br>CARGA CONSTANTE |       | FLUJO TRIFASICO TOTAL<br>CARGA = $F(\Delta V)$ |       |
|------------------------------|-----------------|-------|--|-------|--|-------|
|                              | MW              | MVAR  | MW                                       | MVAR  | MW   | MVAR  |
| POTENCIA TOTAL               | 6.165           | 2.369 | 6.149                                    | 2.335 | 6.183  | 3.223 |
| CARGA TOTAL                  | 6.005           | 2.336 | 6.003                                    | 2.334 | 6.003  | 2.50  |
| MVAR DE CAPACITORES EXTERNOS | -----           | 0.262 | -----                                    | ----- | -----  | 0.262 |
| PERDIDAS                     | 0.16            | 0.295 | 0.146                                    | 0.267 | 0.179  | 0.986 |

## 5.2. COMPARACION CON LOS RESULTADOS DE UN FLUJO DE CARGA TRIFASICO Y MODELO DE CARGA CONSTANTE.

Para observar las diferencias entre los dos métodos nos referiremos a un sistema, como el mostrado en la figura N° 5.2.1.

Como vemos el sistema a estudiarse es un sistema desbalanceado y consta de 20 barras.

### - FLUJO DE CARGA TRIFASICO CON MODELO DE CARGA CONSTANTE.

Para analizar un sistema trifásico desbalanceado nos referiremos a la figura N° 5.2.1.

En el anexo D son mostrados los resultados de esta aplicación.

### - FLUJO DE CARGA TRIFASICO CON MODELO DE CARGA EN FUNCION DE LA VARIACION DE VOLTAJE DE BARRAS.

Para el ejemplo que se está estudiando se compararán los resultados obtenidos de la aplicación del



programa de flujo de carga trifásico con el modelo de carga en función de la variación del voltaje de barras.

Estos resultados se muestran en el apéndice E

#### COMPARACION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS.

Al analizar este sistema por los dos métodos observamos que la diferencia entre ambos resultados es despreciable.

De los resultados obtenidos para las técnicas aplicadas podemos observar que los valores son bastante cercanos. Esto nos indica que todos los procedimientos son correctos, pero se obtiene una mejor aproximación con el método trifásico que modela la carga en función de la variación de voltaje de las barras.

Los resultados del flujo de carga trifásico muestran los flujos de potencia y niveles de voltaje, de las tres fases de cada barra de la alimentadora

En la figura 5.2.2. se muestra la magnitud y el sentido del flujo de potencia calculado con el mé-



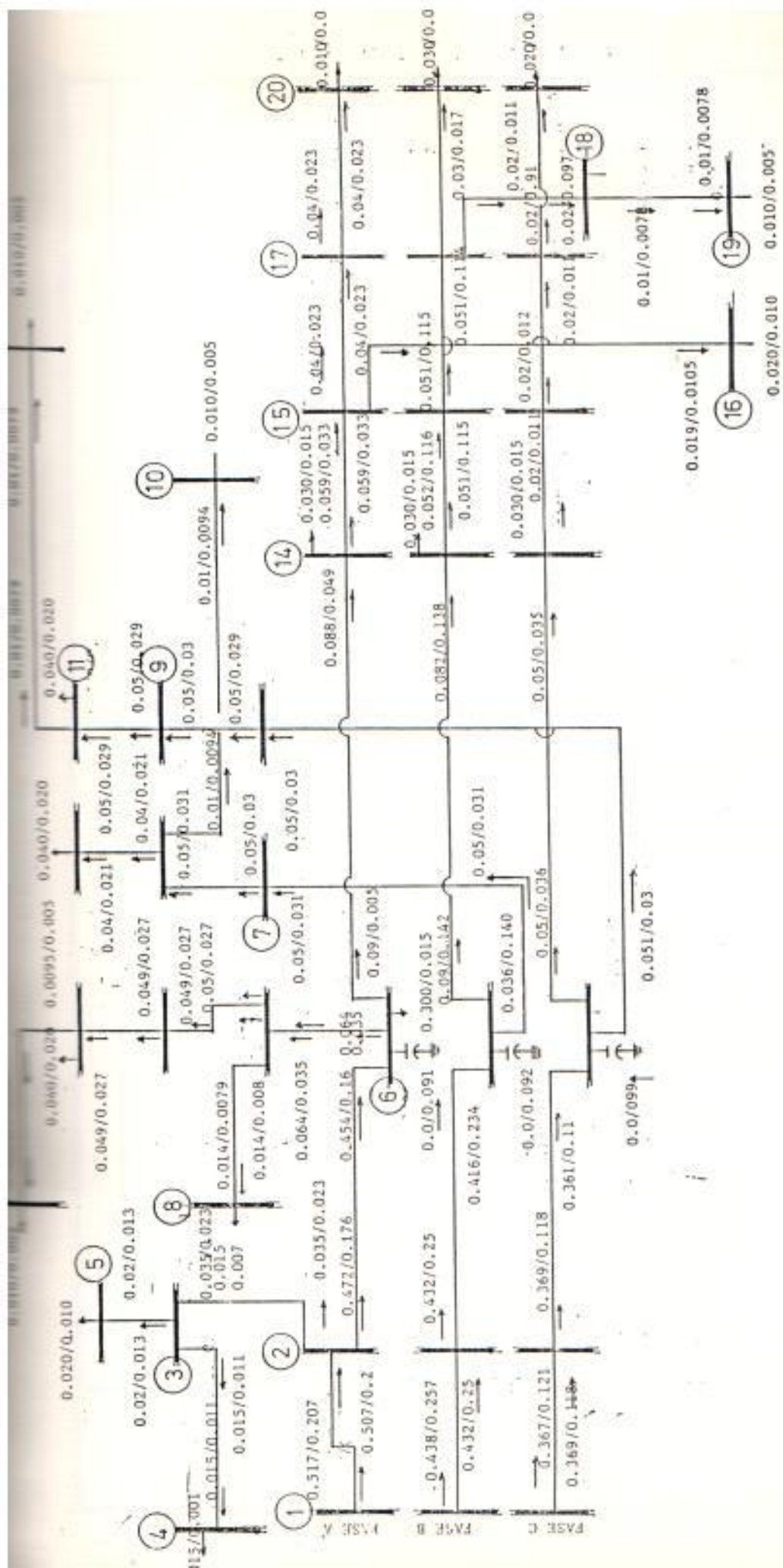
todo trifásico con modelo de carga constante.

En la figura 5.2.3. muestra la magnitud y el sentido del flujo de potencia calculado con el método trifásico con modelo de carga en función de la variación del voltaje de barras.

En la tabla 5.2.1. se muestra los niveles de voltaje para cada fase y para cada método aplicado.

En la tabla 5.2.2. comparamos los resultados de potencia obtenidos en cada método.





|   |         |
|---|---------|
| ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL      |         |
| FLUJO DE CARGA TRIFÁSICO PARA EL EJEMPLO # 2. |         |
| FECHA :                                       | FIGURA: |
| ENERO 89                                      | 5.2.3.  |

| BARRA | VOLTAJES EN P.U.                |        |        |                                 |        |        |
|-------|---------------------------------|--------|--------|---------------------------------|--------|--------|
|       | FLUJO TRIFASICO CARGA CONSTANTE |        |        | FLUJO TRIFASICO CARGA = F (A V) |        |        |
|       | FASE A                          | FASE B | FASE C | FASE A                          | FASE B | FASE C |
| 1     | 1.000                           | 1.000  | 1.000  | 1.000                           | 1.000  | 0.999  |
| 2     | 0.979                           | 0.988  | 1.000  | 0.970                           | 0.982  | 0.999  |
| 3     | 0.976                           | .....  | .....  | 0.968                           | .....  | .....  |
| 4     | 0.971                           | .....  | .....  | 0.966                           | .....  | .....  |
| 5     | 0.974                           | .....  | .....  | 0.965                           | .....  | .....  |
| 6     | 0.933                           | 0.958  | 0.976  | 0.927                           | 0.940  | 0.974  |
| 7     | 0.929                           | 0.956  | 0.974  | 0.922                           | 0.937  | 0.971  |
| 8     | 0.927                           | .....  | .....  | 0.921                           | .....  | .....  |
| 9     | 0.925                           | 0.953  | 0.971  | 0.919                           | 0.934  | 0.968  |
| 10    | .....                           | 0.951  | .....  | .....                           | 0.934  | .....  |
| 11    | 0.922                           | 0.951  | 0.968  | 0.916                           | 0.932  | 0.965  |
| 12    | 0.921                           | .....  | .....  | 0.914                           | .....  | .....  |
| 13    | .....                           | .....  | 0.966  | .....                           | .....  | 0.965  |
| 14    | 0.916                           | 0.948  | 0.971  | 0.914                           | 0.913  | 0.969  |
| 15    | 0.912                           | 0.946  | 0.971  | 0.912                           | 0.906  | 0.970  |
| 16    | 0.909                           | .....  | .....  | 0.909                           | .....  | .....  |
| 17    | 0.909                           | 0.944  | 0.971  | 0.919                           | 0.899  | 0.970  |
| 18    | .....                           | 0.942  | .....  | .....                           | 0.894  | .....  |
| 19    | .....                           | 0.942  | .....  | .....                           | 0.894  | .....  |
| 20    | 0.907                           | 0.943  | 0.970  | 0.917                           | 0.897  | 0.969  |

TABLA N° 5.2.2.2.

SUMARIO DE LA ALIMENTADORA DEL EJEMPLO # 2

|                              | FLUJO TRIFASICO CARGA CONSTANTE |       |        |       |        |       | FLUJO TRIFASICO CARGA VARIABLE |       |        |       |        |       |              |       |       |       |
|------------------------------|---------------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------------|-------|-------|-------|
|                              | FASE A                          |       | FASE B |       | FASE C |       | FASE A                         |       | FASE B |       | FASE C |       | T. TRIFASICO |       |       |       |
|                              | MW                              | MVAR  | MW     | MVAR  | MW     | MVAR  | MW                             | MVAR  | MW     | MVAR  | MW     | MVAR  | MW           | MVAR  |       |       |
| POTENCIA TOTAL               | 0.522                           | 0.184 | 0.425  | 0.132 | 0.368  | 0.094 | 1.315                          | 0.410 | 0.517  | 0.207 | 0.438  | 0.257 | 0.367        | 0.121 | 1.322 | 0.585 |
| CARGA TOTAL                  | 0.490                           | 0.244 | 0.410  | 0.205 | 0.360  | 0.180 | 1.260                          | 0.629 | 0.490  | 0.261 | 0.410  | 0.267 | 0.360        | 0.193 | 1.260 | 0.722 |
| MVAR DE CAPACITORES EXTERNOS | .....                           | 0.087 | .....  | 0.092 | .....  | 0.095 | .....                          | 0.274 | .....  | 0.086 | .....  | 0.088 | .....        | 0.095 | ..... | 0.269 |
| PERDIDAS                     | 0.032                           | 0.027 | 0.015  | 0.019 | 0.008  | 0.009 | 0.055                          | 0.055 | 0.027  | 0.032 | 0.028  | 0.078 | 0.007        | 0.023 | 0.062 | 0.133 |

### 5.3. EJEMPLOS DE APLICACION.

Para ver la aplicación que le podemos dar al programa de flujo de carga desarrollado en esta tesis, nos referiremos al ejemplo anterior, esto es la figura 5.2.1.

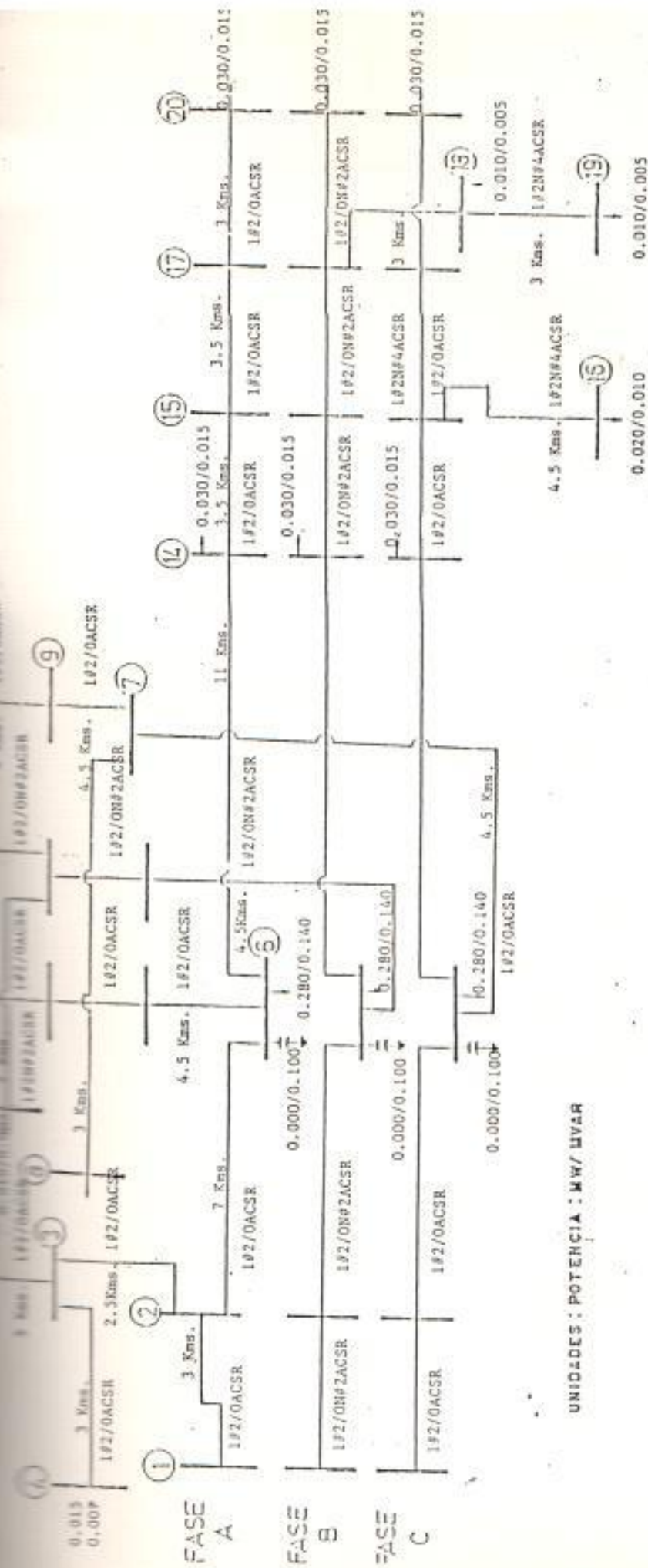
En este sistema se realizarán algunas modificaciones, referentes a la ubicación y conexión de las barras en las diferentes fases, de tal forma de observar el comportamiento para un mejor balance del Sistema de Distribución.

En la figura 5.3.1 se muestra el sistema de distribución con dichos cambios.

#### - FLUJO DE CARGA TRIFASICO CON MODELO DE CARGA CONSTANTE.

En el apéndice F se muestran los resultados del análisis de flujo de carga del sistema modificado que considera la carga como constante.

Debido al elevado número de barras del sistema, no se observará en detalle la figura correspondiente



UNIDADES : POTENCIA : MW/ MVAR

|  |                   |
|--|-------------------|
| ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL                   |                   |
| DIAGRAMA TRIFASICO DE LA ALIMEN-<br>TADORA DEL EJEMPLO # 3 |                   |
| FECHA:<br>ENERO 89   | FIGURA:<br>5.3.1. |

al flujo de potencias para este caso modificado.

Observe la figura 5.3.2.

- FLUJO DE CARGA TRIFASICO CON MODELO DE CARGA EN  
FUNCION DE LA VARIACION DEL VOLTAJE DE BARRAS.

Los resultados de éste análisis los observamos en el apéndice G.

Todo esto considerando la carga en función de la variación de voltaje de barras.

El flujo de potencias lo observamos en la figura 5.3.3.

COMPARACION Y ANALISIS DE LOS RESULTADOS.

Al analizar éste sistema por los dos métodos observamos que la diferencia entre ambos resultados es mínima.

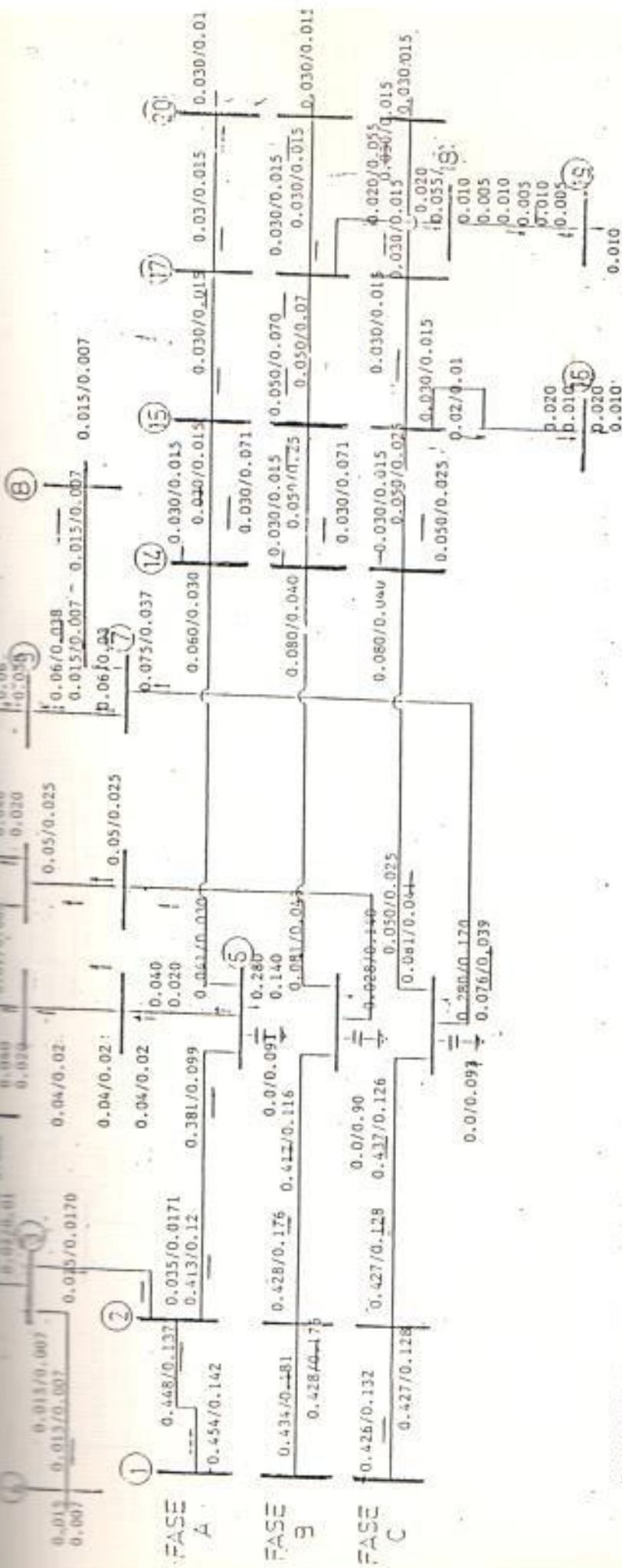
Esto quiere decir que ambos métodos son correctos, pero se obtiene una mejor aproximación con el

método trifásico que modela la carga en función de la variación de voltaje de barras ya que considera que la potencia varía con los niveles de voltaje.

Los resultados del flujo de carga trifásico muestran los flujos de potencia y niveles de voltaje, de las tres fases de cada barra de la alimentadora estudiada.

En la tabla 5.3.1. se muestra los niveles de voltaje para cada fase y para cada método aplicado, para su comparación.

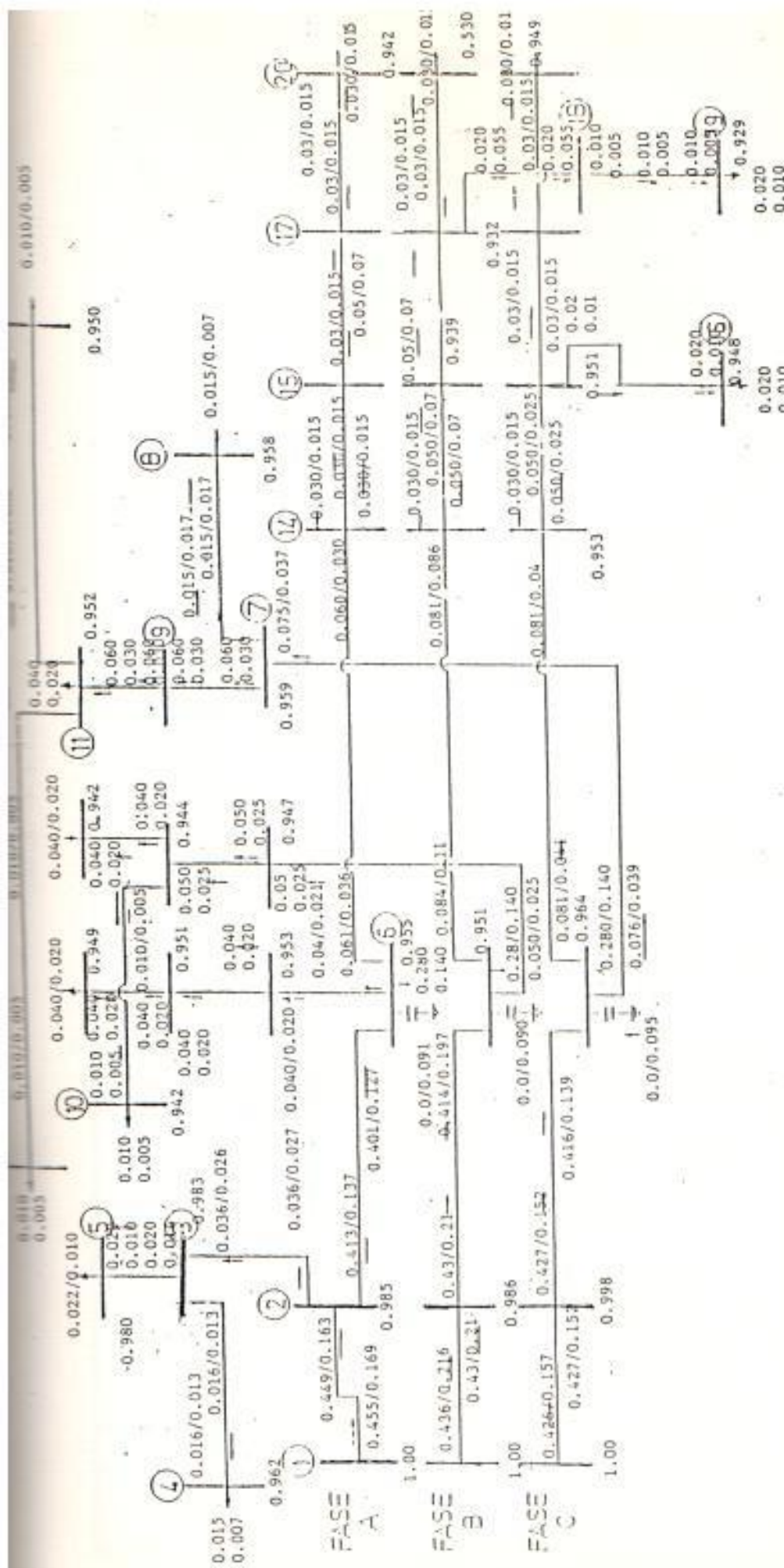
En la tabla 5.3.2. comparamos los resultados de potencia obtenidos en cada método de flujo de carga.



UNIDADES: POTENCIA: MW/MVAR.  
 VOLTIOS: POR UNIDAD (13,8 Kv. BASE)

|  |         |
|--|---------|
| ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL |         |
| FLUJO DE CARGA TRIFÁSICO DE LA           |         |
| ALIMENTADORA DEL EJEMPLO # 3             |         |
| FECHA:                                   | FIGURA: |
| ENERO 89                                 | 5.3.2.  |





UNIDADES: POTENCIA: MW/MVAR.  
 VOLTIOS: POR UNIDAD (13,8 Kv. BASE)

|  |                   |
|--|-------------------|
| ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL |                   |
| FLUJO DE CARGA TRIFASICA DE LA           |                   |
| ALIMENTADORA DEL EJEMPLO #3              |                   |
| FECHA:<br>ENERO 89                       | FIGURA:<br>5.3.3. |

TABLA 5.3.1.

VOLTAJES RESULTANTE EN LOS DOS METODOS

| BARRA # | VOLTAJES EN P.U.          |        |        |                          |        |        |
|---------|---------------------------|--------|--------|--------------------------|--------|--------|
|         | MODELO DE CARGA CONSTANTE |        |        | MODELO DE CARGA VARIABLE |        |        |
|         | FASE A                    | FASE B | FASE C | FASE A                   | FASE B | FASE C |
| 1       | 1.0                       | 1.0    | 1.0    | 1.0                      | 1.0    | 1.0    |
| 2       | 0.984                     | 0.984  | 1.0    | 0.987                    | 0.994  | 0.997  |
| 3       | 0.982                     | -----  | -----  | 0.985                    | -----  | -----  |
| 4       | 0.981                     | -----  | -----  | 0.983                    | -----  | -----  |
| 5       | 0.979                     | -----  | -----  | 0.981                    | -----  | -----  |
| 6       | 0.952                     | 0.945  | 0.968  | 0.954                    | 0.953  | 0.964  |
| 7       | 0.095                     | 0.941  | 0.963  | 0.952                    | 0.95   | 0.959  |
| 8       | -----                     | -----  | 0.963  | -----                    | -----  | 0.959  |
| 9       | 0.948                     | 0.938  | 0.959  | 0.95                     | 0.947  | 0.955  |
| 10      | -----                     | 0.936  | -----  | -----                    | 0.945  | -----  |
| 11      | 0.946                     | 0.936  | 0.956  | 0.949                    | 0.944  | 0.951  |
| 12      | -----                     | -----  | 0.956  | -----                    | -----  | 0.951  |
| 13      | -----                     | -----  | 0.954  | -----                    | -----  | 0.949  |
| 14      | 0.946                     | 0.924  | 0.958  | 0.948                    | 0.928  | 0.952  |
| 15      | 0.946                     | 0.919  | 0.956  | 0.948                    | 0.922  | 0.95   |
| 16      | -----                     | -----  | 0.956  | -----                    | -----  | 0.95   |
| 17      | 0.945                     | 0.913  | 0.955  | 0.948                    | 0.916  | 0.949  |
| 18      | -----                     | 0.911  | -----  | -----                    | 0.913  | -----  |
| 19      | -----                     | 0.91   | -----  | -----                    | 0.912  | -----  |
| 20      | 0.943                     | 0.912  | 0.954  | 0.946                    | 0.914  | 0.949  |

TABLA N° 5.3.2.

RESUMEN DE POTENCIAS DE LA ALIMENTADORA PARA AMBOS METODOS

|                     | MODELO DE CARGA CONSTANTE |       |        |       |        |       | MODELO DE CARGA VARIABLE |       |        |       |        |       |        |       |              |       |
|---------------------|---------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------------------------|-------|--------|-------|--------|-------|--------|-------|--------------|-------|
|                     | FASE A                    |       | FASE B |       | FASE C |       | T. TRIFASICO             |       | FASE A |       | FASE B |       | FASE C |       | T. TRIFASICO |       |
|                     | MW                        | MVAR  | MW     | MVAR  | MW     | MVAR  | MW                       | MVAR  | MW     | MVAR  | MW     | MVAR  | MW     | MVAR  | MW           | MVAR  |
| POTENCIA TOTAL      | 0.454                     | 0.142 | 0.434  | 0.181 | 0.426  | 0.132 | 1.31                     | 0.456 | 0.455  | 0.169 | 0.436  | 0.216 | 0.426  | 0.157 | 1.318        | 0.542 |
| CARGA TOTAL         | 0.435                     | 0.217 | 0.41   | 0.25  | 0.415  | 0.207 | 1.26                     | 0.674 | 0.435  | 0.232 | 0.41   | 0.268 | 0.415  | 0.222 | 1.26         | 0.722 |
| MVAR DE CAPACITORES | -----0.0906               | ----- | 0.0894 | ----- | 0.0937 | ----- | 0.274                    | ----- | -----  | 0.091 | -----  | 0.091 | -----  | 0.093 | -----        | 0.275 |
| PERDIDAS            | 0.019                     | 0.016 | 0.024  | 0.02  | 0.011  | 0.019 | 0.054                    | 0.055 | 0.02   | 0.027 | 0.026  | 0.039 | 0.011  | 0.028 | 0.058        | 0.095 |

## CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El programa que calcula el flujo de carga considerando las tres fases nos permite hacer un análisis mucho más preciso que el aplicar los programas de flujo de carga por fase, ya que los sistemas de distribución son eminentemente desbalanceados, y los errores que se cometen al utilizar un equivalente por fase son elevados.

Es posible con éste procedimiento estudiar las alimentadoras de sistemas de distribución de una manera real, considerando los desbalances tanto de orden interno así como los externos.

Es notorio el reducido número de iteraciones requeridas para que el proceso converja con una tolerancia menor a  $1 \times 10^{-6}$ .

Comparándolo con la técnica que usa la solución de Gauss-Seidel notamos que el procedimiento de solución no presenta los problemas que presenta éste último, y además siempre converge.

Al aplicar los resultados del proceso de flujo de carga trifásico podemos :

1.- Analizar las características de operación de las alimentadoras de sistemas de distribución.

2.- Reubicar puntos de conexión de las líneas monofásicas para obtener mejores resultados de operación de una alimentadora.

3.- Ubicar de una manera óptima los bancos de capacitores en el sistema para obtener un adecuado nivel de voltaje en las líneas de distribución.

4.- Ubicar reguladores de voltaje para controlar que las variaciones de voltaje en la salida de subestaciones y corregir también la caída de voltaje, para alimentadoras muy largas.

Para conocer la planificación y operación de sistemas de potencia es necesario saber aplicar éstos conocimientos sobre la aplicación del flujo de carga.

Se recomienda ésta aplicación a los profesores del Area de Potencia de la Escuela Superior Politécnica del Litoral, para enseñar a los estudiantes el comportamiento

de sistemas de distribución.

También se recomienda profundizar el estudio de las cargas en función de la variación de voltaje, en otras tesis de grado, como un complemento del estudio actual.

## B I B L I O G R A F I A

- 1.- DR. WEN-CHEN CHU, Load Model of Power System.
- 2.- STAGG AND EL-ABIAD. Computer methods in Power System analysis.
- 3.- RAFAEL ENDERICA C. Flujo de carga trifásico en Sistemas de Distribución. Tesis de Grado.
- 4.- STEVENSON, W. Sistemas Eléctricos de Potencia.
- 5.- NEVENSWANDER. J. Modern Power Systems.
- 6.- ELGERD, O. Electric Energy Systems Theory.