

ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA ELECTRICA

"CAPACIDAD Y UBICACION OPTIMAS DE SUBESTACIONES  
MINIMIZANDO EL PRODUCTO CARGA-DISTANCIA"

TESIS DE GRADO

PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO

DE

I N G E N I E R O E L E C T R I C O

PRESENTADA POR:

G A L O N I N A S U Q U I L A N D A

GUAYAQUIL-ECUADOR

FEBRERO, 1.979

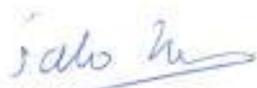
"CAPACIDAD Y UBICACION OPTIMAS DE SUBESTACIONES  
MINIMIZANDO EL PRODUCTO CARGA-DISTANCIA"

DIRECTOR DE TESIS



Ing. Leo Salomon

A U T O R



Galo Nina Suquilanda

DECLARACION EXPRESA:

DECLARO QUE: Hechos, ideas y doctrinas expuestos en esta tesis son de mi exclusiva responsabilidad y que el patrimonio intelectual de la misma corresponde a la ESCUELA SUPERIOR POLITECNICA DEL LITORAL.

(Artículos 6 y 21 del REGLAMENTO de Exámenes y Títulos profesionales de la ESPOL).

# INDICE

	Pág.
CAPITULO 1	
INTRODUCCION	1
CAPITULO 2	
DEFINICION DEL PROBLEMA	7
2.1. Modelos de planes de expansión para subestaciones de distribución	8
2.2. Planificación en un sistema con <u>den</u> sidad de carga constante	9
2.2.1. Cambio de nivel de voltaje	10
2.2.2. Voltaje constante	15
2.3. Planificación de un sistema con <u>den</u> sidad de carga variable	17
2.3.1. Planificación de capacidad constante	19
2.3.2. Area de servicio constante de la subestación	22
CAPITULO 3	
METODOS EMPLEADOS EN LA SOLUCION	27
3.1. Método de las curvas aplicadas a la planificación de subestaciones	28
3.2. Métodos de optimización	31
3.2.1. Procedimiento iterativo para equipar subestaciones usando técnicas de optimización	31

	Pág.
3.2.2. Técnicas de optimización matemática para localizar y determinar la capacidad de subestaciones de distribución	33
3.3. Métodos Utilizados	35
3.3.1. Datos	35
3.3.2. Algoritmo matricial para distancia de valor óptimo	35
3.3.3. Radialidad	35
3.3.4. Producto carga-distancia mínimo	36
3.3.5. Post-optimización	36
3.3.6. Localización óptima de una nueva subestación	37
 CAPITULO 4	
DISTANCIAS MINIMAS	39
4.1. Conceptos Generales	39
4.1.1. Gráfica de orden n	39
4.1.2. Gráfica simétrica	41
4.1.3. Camino mínimo	41
4.1.4. Matriz V de valores asociados a una gráfica	42
4.2. Algoritmo matricial para caminos de valor óptimo	43
4.2.1. Definición de las operaciones matriciales	43

	Pág.
4.2.2. Matriz de caminos de valor óptimo	44
4.2.3. Ejemplo	44
4.3. Algoritmo matricial modificado para ser usado en computadoras	46
4.4. Matriz de arcos no modificados S	48
4.4.1. Definición	48
4.4.2. Ejemplo	48
 CAPITULO 5	
DIRECCION OPTIMA	50
5.1. Vector dirección. Definición	51
5.2. Ejemplo	52
5.3. Algoritmo para hallar el vector dirección	53
 CAPITULO 6	
OPTIMIZACION DEL PRODUCTO CARGA-DISTANCIA	55
6.1. Problema del transporte	56
6.2. Algoritmo de la columna mínima	58
6.3. Modelo matemático para la minimización del producto carga-distancia	59
6.4. Algoritmo que minimiza el producto carga-distancia	61
6.5. Post-optimización	64
6.5.1. Inspección de la radialidad de la solución	64

	Pág.
6.5.2. Pérdidas en las alimentadoras y límite térmico	65
6.6. Posición óptima para una nueva subes- tación	67
6.6.1. Definición	67
6.6.2. Algoritmo	68
 CAPITULO 7	
DESCRIPCION DEL PROGRAMA	69
7.1. Generalidades	69
7.1.1. Procedimiento	69
7.1.2. Limitaciones	71
7.1.3. Glosario de variables usadas en el programa	71
7.2. Programa principal LODS	74
7.2.1. Propósito	74
7.2.2. Formato de lectura de datos	75
7.2.3. Diagrama de flujo	76
7.3. Subrutina LODS1	79
7.3.1. Propósito	79
7.3.2. Formatos de lectura de datos	79
7.3.3. Diagrama de flujo	81
7.4. Subrutina LODS2	85
7.4.1. Propósito	85
7.4.2. Diagrama de flujo	85

	Pág.
7.5. Subrutina LODS3	87
7.5.1. Propósito	87
7.5.2. Diagrama de flujo	87
7.6. Subrutina LODS4	92
7.6.1. Propósito	92
7.6.2. Diagrama de flujo	92
7.7. Subrutina LODS5	95
7.7.1. Propósito	95
7.7.2. Diagrama de flujo	95
7.8. Subrutina LODS6	98
7.8.1. Propósito	98
7.8.2. Diagrama de flujo	98
 CAPITULO 8	
EJEMPLOS DE APLICACION	102
8.1. Sistema teórico	102
8.2. Sistema Guayaquil	108
8.2.1. Descripción del Sistema	109
8.2.1.1. Niveles nominales de tensión	109
8.2.1.2. Generación	109
8.2.1.3. Subtransmisión	110
8.2.1.4. Subestaciones de dis- tribución y alimenta- doras	110

	Pág.
8.2.2. Configuración geográfica de la ciudad	110
8.2.3. Consideraciones sobre la demanda del sistema	116
8.2.4. Aplicación del programa y resultados	118
8.2.4.1. Procedimiento	118
8.2.4.2. Resultados	126
CAPITULO 9	
CONCLUSIONES	139
Apéndice 1	142
Apéndice 2	160
Apéndice 3	188
Bibliografía	208

# CAPITULO 1

## INTRODUCCION

Un Sistema Eléctrico de Potencia está constituido por los sistemas de generación, transmisión y distribución. La inversión en el sistema de distribución en la mayoría de sistemas a través del país y del mundo es aproximadamente igual a la inversión que se hace en el sistema de generación. La suma de estas dos inversiones por lo general constituye un 80 por ciento en la inversión total del sistema. Por lo tanto la importancia económica que representa la inversión en distribución hace que la planificación, el diseño, la construcción y operación de esta deban hacerse lo más cuidadosamente posible.

A su vez un Sistema de Distribución puede considerarse dividido en los siguientes componentes:

1. Subestaciones de Potencia. Estas subestaciones reciben la potencia desde el sistema de transmisión y la transforman al voltaje de subtransmisión.
2. Sistema de Subtransmisión. Son los circuitos que se derivan de las subestaciones de potencia y sirven a las subestaciones de distribución.
3. Subestaciones de Distribución. En estas subestaciones se recibe potencia desde los circuitos de subtrans

misión y se transforman al voltaje de alimentación primaria.

4. Alimentación Primaria. Son los circuitos que salen de las subestaciones de distribución y suministran potencia a los transformadores de distribución.
5. Transformadores de Distribución. Realizan el paso de bajada desde el voltaje de alimentación primaria al voltaje de utilización de los consumidores.
6. Alimentación Secundaria. Distribuye la potencia desde los transformadores de distribución a los consumidores.

El problema cuya solución se plantea en esta Tesis es el de la selección de la capacidad, definición de las áreas de servicio y ubicación de las subestaciones de distribución, que es una parte integrante en la planificación total de un sistema de distribución.

Para este problema existen soluciones, que se pueden considerar, representan conceptos extremos en la planificación de las subestaciones y alimentadoras primarias.

Así, en una de ellas el área servida por las subestaciones permanece fija, en tanto que la capacidad de la subestación aumenta con el aumento de la demanda del sistema (Planificación de Area Constante).

En otra, la capacidad de las subestaciones permanece fija y la capacidad requerida por el aumento de la demanda se localiza en nuevas subestaciones (Planificación de Capacidad Constante).

Ninguna de estas soluciones es satisfactoria para la totalidad de los componentes de un sistema de distribución. Por lo que un plan óptimo a largo plazo será generalmente el que comparta los beneficios de los dos tipos de planificación.

En esta Tesis se plantea una solución a este problema mediante el desarrollo del método del LODS (Localización - Optima de Subestaciones).

Este método idealiza el Sistema considerando:

- Una distribución uniforme de carga
- Disponibilidad de acceso a líneas de subtransmisión
- Capacidad suficiente del sistema en generación y subtransmisión

El método establece un compromiso entre la planificación de área constante y la de capacidad constante; pues permite aumentar la capacidad de las subestaciones de distribución hasta que la capacidad termal de las alimentadoras primarias lo permita, para sólo entonces ubicar nue-

vas subestaciones.

El método empleado por el LODS en primer lugar divide el sistema en sectores de área uniforme, (cuadrados), que se consideran como vértices de un gráfico equivalente que describe el sistema de distribución primaria, cada vértice se considera tiene una cierta demanda, la cual es obtenida mediante un estudio de carga del sistema.

Luego se encuentran las distancias mínimas desde cada vértice del gráfico, a todos los demás, mediante un algoritmo matricial (algoritmo de Shimbil). Este algoritmo nos da como resultado dos matrices  $V^n$  y  $S$ . En la primera constan los valores de las distancias mínimas y en la segunda los arcos que conforman los caminos de distancias mínimas.

Inmediatamente se escogen los arcos del gráfico de manera de obtener una configuración radial a partir de cada uno de los vértices en donde está ubicada una subestación. Esta configuración radial está descrita en un vector que se ha denominado vector dirección.

Luego, se escoge los sectores para que sean servidos por la subestación que se encuentra más cercana y tenga mayor capacidad, esto es; se define las áreas de servicio de la subestación, para esto se minimiza el producto carga-distancia mediante el algoritmo de la columna mínima.

Por último, se define la configuración de las alimentadoras, se encuentra las pérdidas de las mismas y se inspecciona su capacidad de transporte. Si esta capacidad sobrepasa el límite térmico de los conductores de la alimentadora, se ubica una nueva subestación mediante un algoritmo matricial.

Los algoritmos usados emplean operaciones matriciales simples, pero utilizan un gran volumen de memoria de computadora cuando son codificados; ya que las gráficas necesarias para la descripción de los sistemas de distribución son de gran tamaño; lo que trae consigo que además empleen mucho tiempo en su desarrollo.

El método de LODS ha sido aplicado al Sistema Guayaquil. Las razones por las cuales se escogió este Sistema para la aplicación del método han sido:

- Existe facilidad de acceso a información
- Es un sistema que presenta alimentadoras primarias de gran longitud, lo que permite definir las áreas de servicio de las subestaciones con gran facilidad
- Existen zonas de carga concentrada, lo cual hace posible una fácil división de la demanda del sistema
- Existen accidentes geográficos que imposibilitan el cruce de alimentadoras primarias como son: esteros y ce-

ros, característica que permite dividir el sistema, logrando con esto, gráficas de menor tamaño. Este estudio pretende ser un inicio en una área de investigación que es muy vasta y que podría comprender entre otras cosas:

- Implementación de nuevos códigos para utilizar el método para gráficas de mayor tamaño que las empleadas en este estudio; que utilicen la propiedad de la esparcidad de las matrices empleadas
- Estudios que abarquen la planificación de la totalidad del sistema de distribución, tomando en cuenta el sistema de subtransmisión
- Estudios que unifiquen este trabajo con el sistema de distribución secundaria
- Métodos computarizados para la obtención de la demanda del sistema, esto es, codificación del consumo KW-hora de acuerdo al transformador de distribución primario y obtención de factores de demanda y diversificación de acuerdo a la clase de consumo

En los siguientes Capítulos de este trabajo se estudiarán los conceptos teóricos que han sido empleados, la implementación del método por medio de un programa y su aplicación al Sistema Guayaquil

## CAPITULO II

### DEFINICION DEL PROBLEMA

Una de las principales preocupaciones en la planificación de un sistema de distribución es la selección de la capacidad y ubicación de las subestaciones de distribución.

Una área urbana de gran superficie es servida generalmente por varias subestaciones. El número y la ubicación de éstas depende de varios factores, tales como:

- a) Densidad de carga del área que debe servir
- b) Consideraciones geográficas para la posible construcción de una subestación, como serían: existencia de obstáculos naturales como ríos, esteros, cerros o lugares de uso determinado como aeropuertos, zonas militares, etc
- c) Disponibilidad de acceso a líneas de transmisión

Junto con estos factores se debe anotar las características económicas como serían costos de: transformadores, equipo auxiliar, obra civil, terreno, alimentadoras y pérdidas eléctricas.

Por todo lo anotado anteriormente es necesario esbozar lineamientos básicos para la planificación de un sistema de distribución que sirva como una guía para definir

el problema que se ha planteado en esta tesis.

En este capítulo se describirá los posibles planes de expansión para las subestaciones de distribución únicamente en función de las relaciones entre la carga y la capacidad de las subestaciones.

## 2.1. MODELOS DE PLANES DE EXPANSION PARA SUBESTACIONES DE DISTRIBUCION

Los planes para el aumento de la capacidad de las subestaciones de distribución en un sistema pueden ser; aumentar la capacidad de las subestaciones existentes o la construcción de nuevas subestaciones entre otros.

En el primer plán el área servida por la subestación permanece fija y la capacidad de la subestación aumenta con el aumento de la carga. En el otro plan en cambio se instala subestaciones con una capacidad fija y la capacidad adicional se localiza en nuevos sitios a medida que la carga aumenta.

Estos dos extremos en la planificación de las subestaciones de distribución se denominan:

- a) De área constante
- b) De capacidad constante

Un número infinito de planes es posible entre estos

conceptos extremos de planificación. Para un sistema la densidad de carga puede ser constante o puede aumentar de forma no uniforme variando de una área a otra. De tal manera que estas condiciones se puede considerar afectan el aumento de la capacidad de las subestaciones de distribución.

Debido a esto la planificación de las subestaciones puede ser también:

- a) Una planificación que considera que la densidad de carga es constante
- b) Una planificación en la cual se asume que la densidad de carga se está incrementando

Para una planificación a corto plazo se asume que la densidad de carga permanece constante, y para una planificación a largo plazo se debe, en cambio, considerar que la densidad de carga está aumentando.

## 2.2. PLANIFICACION EN UN SISTEMA CON DENSIDAD DE CARGA CONSTANTE

En los Sistemas de Distribución si existe insuficiente capacidad de las subestaciones y de las alimentadoras primarias continuamente se orienta la planificación en adoptar medidas de corrección.

Usualmente, cuando las subestaciones y las alimenta-

doras no tienen suficiente capacidad de transporte de carga, la caída de voltaje y las pérdidas son excesivas así como también las fallas pueden ser más frecuentes y de larga duración.

Inmediatamente se entra a considerar estas medidas de corrección.

Si se establece que la densidad de carga permanece constante son posibles dos tipos de cambios básicos:

- a) Cambios que elevan el nivel del voltaje de Distribución Primaria
- b) Cambios en los cuales el nivel del voltaje permanece constante

#### 2.2.1. Cambio de Nivel de Voltaje

Cuando en un sistema se realiza un cambio de nivel de voltaje la inversión inicial de tal proyecto es alto; La Fig. 2.1. nos da una idea de los costos de inversión inicial de diferentes niveles de voltaje.

Además, hay ciertos factores que deben ser considerados, uno de éstos muy conocido es el que en una alimentadora el porcentaje de caída de voltaje disminuye inversamente con el cuadrado del voltaje para una misma carga lo



Fig. 2.1 Comparación económica de voltajes de distribución

que se desprende del análisis de la siguiente relación

$$\text{o/o Caída de Voltaje} = \frac{\text{KVA}_n (R \cos\theta + X \sin\theta)}{10 \text{ KV}^2} \quad (2-1)$$

Donde:

$\text{KVA}_n$  = Carga en la alimentadora

KV = Kilovoltios de la alimentadora

R, X = Resistencia y Reactancia

Inmediatamente se pasa a describir los posibles pla-

nes que se pueden realizar dentro de este esquema.

Se deberá decidir en primer lugar si se mantiene la capacidad de la subestación constante o se la aumenta.

Si se adopta la primera alternativa entonces se pueden obtener máximos beneficios reduciendo el número de alimentadoras, ya que el porcentaje de caída de voltaje no varía, en tanto que el área servida por las alimentadoras aumenta. Se puede entender mejor estas afirmaciones mediante un ejemplo.

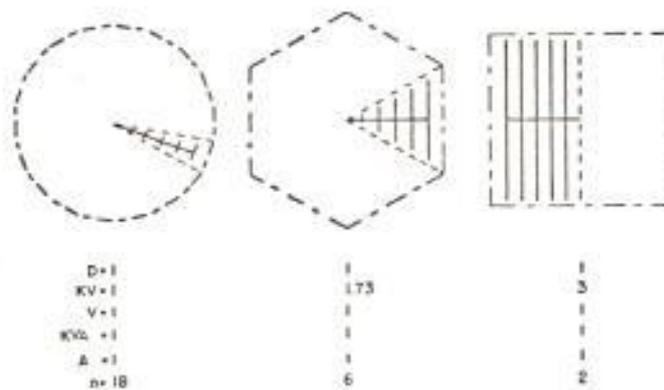


Fig. 2.2 Ejemplo de planificación cuando hay un cambio de nivel de voltaje

En la Fig. 2.2. se muestra una subestación en la cual se ha elevado el nivel de voltaje en 1.73 y 3 veces respectivamente su valor nominal, manteniendo la capacidad de la subestación inalterable y se ha reducido el nú-

mero de alimentadoras de 18 a 6 y 2 respectivamente.

Para establecer las relaciones entre estas variaciones y el o/o caída de voltaje partamos del análisis de la siguiente ecuación deducida suponiéndose una distribución de carga uniforme.

$$\text{o/o V} = \frac{\text{KVA}^{3/2}}{n^{3/2} D^{1/2}} \frac{2/3 K}{\tan\theta^{1/2}} \quad (2-2)$$

Donde:

o/o V = Porcentaje de caída de voltaje en una alimentadora

K = o/o caída de voltaje por KVA milla

KVA = Capacidad total de la subestación

n = Número de alimentadoras

$\theta = \frac{180}{n}$

D = Densidad de carga

Entonces si se considera que la capacidad y la densidad de carga permanecen constantes la ecuación (2) queda:

$$\begin{aligned} \text{o/o V} &= C \frac{K}{n^{3/2} \tan\theta^{1/2}} \\ &= C \frac{1/KV^2}{n^{3/2} \tan \frac{\pi^{1/2}}{n}} = \end{aligned}$$

$$= \frac{C}{KV^2 n^{3/2} \frac{\tan \theta}{n}^{1/2}} \quad (2-3)$$

Donde:

C = Constante

Reemplazando los valores del voltaje y el número de alimentadoras en esta relación, vemos que el porcentaje de caída de voltaje no varía.

Por otro lado si se aumenta la capacidad de la subestación consecuentemente se aumenta el área de servicio de la subestación. Para mantener el porcentaje de caída de voltaje sin variaciones el número de alimentadoras puede mantenerse o disminuirse. La Fig. 2.3. ilustra este tipo de planificación.

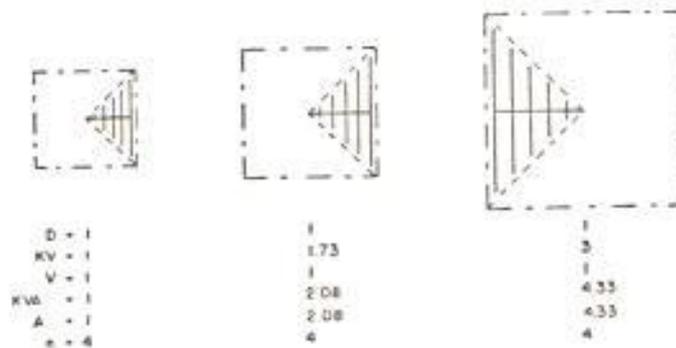


Fig. 2.3. Ejemplo de planificación cuando hay cambio de nivel de voltaje. Capacidad de la subestación variable

En este ejemplo al aumentar el voltaje a valores 1.73 y 3 veces el valor inicial la capacidad debe aumentarse a 2.08 y 4.33 veces la inicial para mantener el o/o de caída de voltaje invariable; lo cual puede deducirse de la ecuación (2-2) si consideramos  $D$ ,  $n$ , o/o  $V$  constantes, quedando la relación de la siguiente forma

$$\begin{aligned} KVA &= C/K^{2/3} \\ &= C KV^{4/3} \quad (2-4) \end{aligned}$$

#### 2.2.2. Voltaje Constante

Cuando no existen cambios en el nivel de voltaje las variaciones que deben realizarse para efectuar conexiones en el sistema no son tan extensas como aquellas en las cuales se cambia de nivel de voltaje.

En este tipo de plan se deberá aumentar la capacidad de la subestación decidiendo si se mantiene el número de alimentadoras o se aumentan las mismas.

La primera alternativa incrementa la capacidad de las alimentadoras y, por lo tanto, el área de servicio de la subestación; pero tiene la desventaja que el o/o de caída aumenta debiendo requerirse regulación suplementaria para mantener el voltaje dentro de los límites impuestos. Tomemos como ejemplo la subestación de la Fig. 2.4.

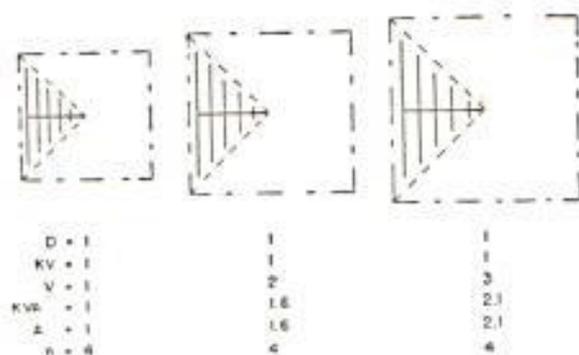


Fig. 2.4 Ejemplo de planificación sin cambio de voltaje, aumentando la capacidad de la subestación.

En donde se ha mantenido constante el número de alimentadoras y la capacidad se ha incrementado en 1.6 y 2.1 el valor inicial. El porcentaje de caída de voltaje aumentará de acuerdo a la relación siguiente obtenida de la ecuación (2-2)

$$\text{o/o } V = C \text{ KVA}^{3/2} \quad (2-5)$$

Se debe indicar además que la longitud de las alimentadoras debe ser aumentada.

Si por el contrario se desea mantener el o/o de caída inalterable se deberá aumentar el número de alimentado

ras. Se ilustra esta alternativa en el ejemplo de la Fig. 2.5. La ecuación que nos ha permitido deducir estas relaciones es la siguiente:

$$KVA = C n \left( \tan \frac{180}{n} \right)^{1/3} \quad (2-6)$$

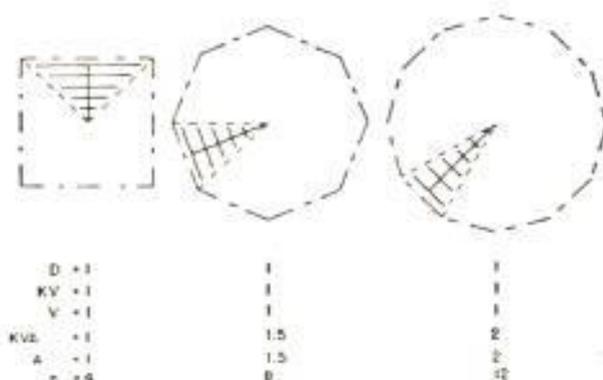


Fig. 2.5 Ejemplo de planificación sin cambio de voltaje

Sin embargo la decisión final deberá ser tomada después de un análisis económico de alternativas.

Se muestra a continuación un esquema lógico de este tipo de planificación. Fig. 2.6.

### 2.3. PLANIFICACION DE UN SISTEMA CON DENSIDAD DE CARGA VARIABLE

En los sistemas de distribución con densidad de carga creciente, cuando se desea realizar cambios, se puede emplear tanto la planificación de área constante; como la planificación de capacidad constante de las subestaciones.

Se debe mencionar que los beneficios alcanzados con uno de estos planes no son satisfactorios para la totali

PLANIFICACION DE UN SISTEMA DE DENSIDAD CONSTANTE

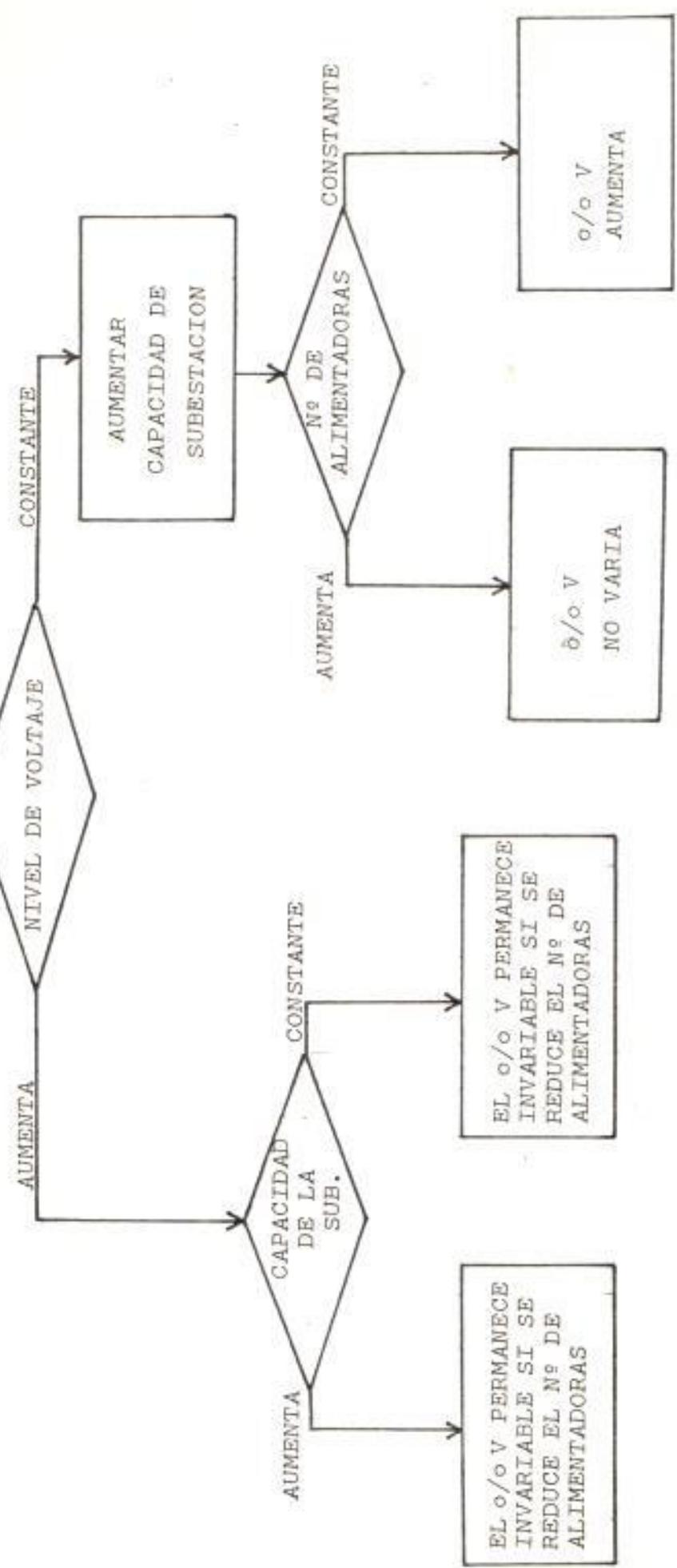


Fig. 2.6 Esquema lógico de la planificación de un sistema con densidad de carga constante

dad de los componentes de un sistema de distribución. Por lo tanto un plan óptimo a largo plazo será generalmente - el que comparta los beneficios de los dos tipos de planificación.

### 2.3.1. Planificación de Capacidad Constante

Si la capacidad de cada una de las subestaciones localizadas en determinados sitios en un sistema permanece constante a medida que aumenta la carga, entonces; la capacidad adicional para satisfacer la demanda del sistema debe ser colocada en nuevas subestaciones. Estas subestaciones deberán estar situadas en nuevos puntos geográficos localizados entre las subestaciones existentes; o en puntos situados a continuación de dichas subestaciones si el sistema ha tenido un crecimiento geográfico considerable.

Cuando se trata de mantener la capacidad de la subestación constante, a medida que la densidad de carga aumenta; el área de servicio de la subestación disminuye.

La mayor desventaja que ofrece este plan es que los sitios adecuados para localizar subestaciones pueden ser difíciles de obtener.

Se puede agrupar esta planificación en dos esquemas básicos:

- a) En el primer esquema, a medida que aumenta la densidad el número de alimentadoras permanece constante. Esto tiene como consecuencia que el área de influencia y las alimentadoras se vayan a cortando.

En la Fig. 2.7. se muestra un ejemplo de este tipo de planificación.

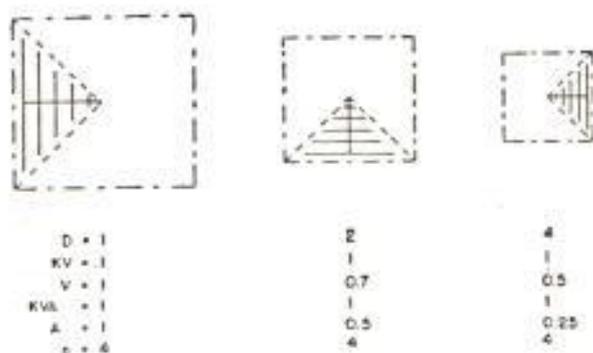


Fig. 2.7 Planificación de capacidad constante, con N° de alimentadoras constante

Para establecer las relaciones indicadas en la Fig. 2.7. se utilizó la ecuación (2-7) deducida de la relación (2-2).

$$o/o V = \frac{C}{D^{1/2}} \quad (2-7)$$

De esta manera se puede ver que la mayor ventaja que tiene esta planificación es que el o/o de caída de voltaje y las pérdidas disminuyen a medida que aumenta la densidad de carga.

- b) En el segundo esquema a medida que aumenta la densidad el número de las alimentadoras es disminuído. Esto tiene como consecuencia que el área de influencia y las alimentadoras se vayan acortando.

En la Fig. 2.8. se indica un ejemplo de este tipo de planificación.

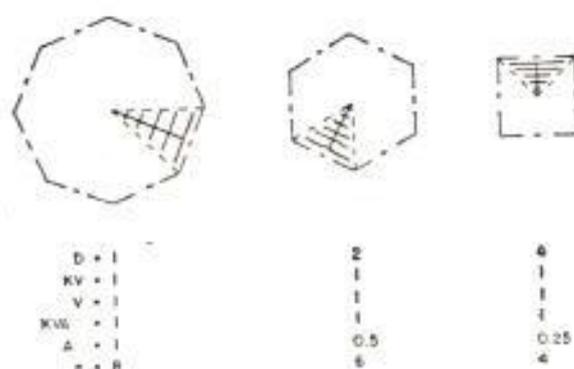


Fig. 2.8 Planificación de capacidad constante, disminuyendo el N° de alimentadoras

Las relaciones indicadas en la Fig. 2-8 han sido deducidas de la relación (2-8) derivada a su vez de la ecuación (2-2)

$$D = \frac{C}{n^3 \tan \pi/n} \quad (2-8)$$

Por lo que para mantener un  $c/v$  constante las alimentadoras deben disminuirse, manteniendo las relaciones mostradas con el aumento de la densidad de carga.

Teniendo en cuenta este efecto la construcción de nuevas alimentadoras deberá realizarse más lentamente que la construcción de nuevas subestaciones, ya que estas pueden servir parte de su carga por medio de las alimentadoras ya existentes.

Esto podría realizarse ya sea transfiriendo una alimentadora por completo a una nueva subestación o dividiendo las alimentadoras de tal forma que parte de ellas sean utilizadas por la nueva subestación. De estas alternativas la última dará mejor resultado.

### 2.3.2. Area de Servicio Constante de la Subestación

Si permanece constante el área servida por una subestación la capacidad requerida por el aumento de la densidad de carga debe colocarse en la misma subestación, además debe proveerse capacidad adicional a las alimen-

tadoras. Esta condición representa otro extremo en la planificación de las subestaciones de distribución.

La ventaja de no tener que situar las subestaciones de distribución en nuevos sitios a medida que la carga aumenta es contrabalanceada por la necesidad de crear nuevas alimentadoras para las subestaciones existentes.

Esta planificación se puede dividir en dos esquemas:

- a) A medida que crece la densidad de carga del sistema el número de alimentadoras aumenta.

La Fig. 2.9 muestra este tipo de planificación.

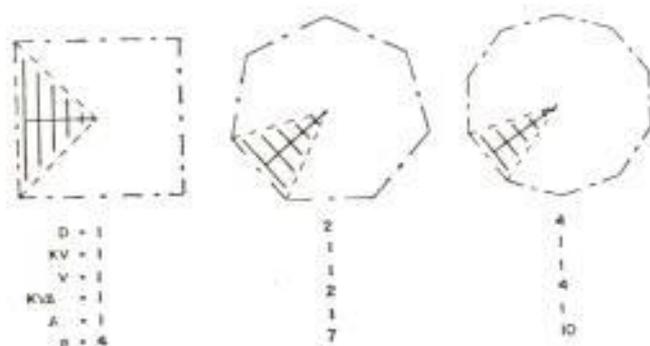


Fig. 2.9 Planificación de área constante, aumentando el N° de alimentadoras

Las relaciones establecidas en la Fig. 2.9 se dedujeron de la siguiente ecuación:

$$KVA = C n \left( \tan \frac{\pi}{n} \right)^{1/3} D^{1/3} \quad (2-9)$$

De lo que se puede concluir que para mantener el o/oV debe aumentarse el número de alimentadoras, pero a pesar de esto las pérdidas por KVA transmitido aumentarían.

- b) En el segundo esquema a medida que crece la densidad de carga del sistema no se varía el número de alimentadoras

La Fig. 2-10 ilustra este tipo de planificación.

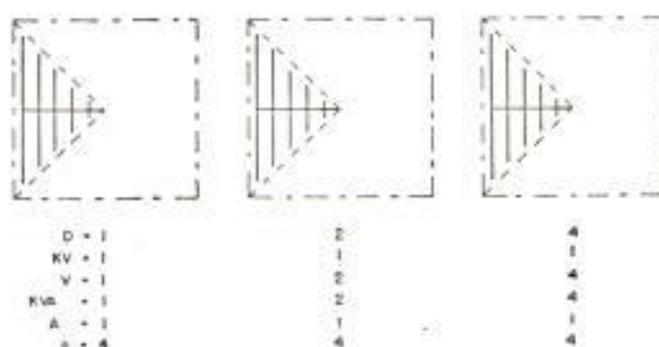


Fig. 2.10 Planificación de área constante, con N° de alimentadoras constante

La relación (2-10) nos indica que el o/o de caída de voltaje aumenta en proporción al aumento de carga.

$$\text{o/o V} = C \frac{KVA^{3/2}}{D^{1/2}} \quad (2-10)$$

De esta manera si se desea mantener el  $\pm 0.0V$  invariable se debe aumentar la capacidad de las alimentadoras.

Sin embargo la capacidad de una alimentadora para servir una misma área a medida que aumenta la carga está limitada de dos maneras. Un límite es la capacidad térmica de los conductores y el segundo límite es el máximo porcentaje de caída permitido entre puntos de voltaje regulado en los alimentadores.

El esquema lógico para esta planificación se muestra en la Fig. 2.11.

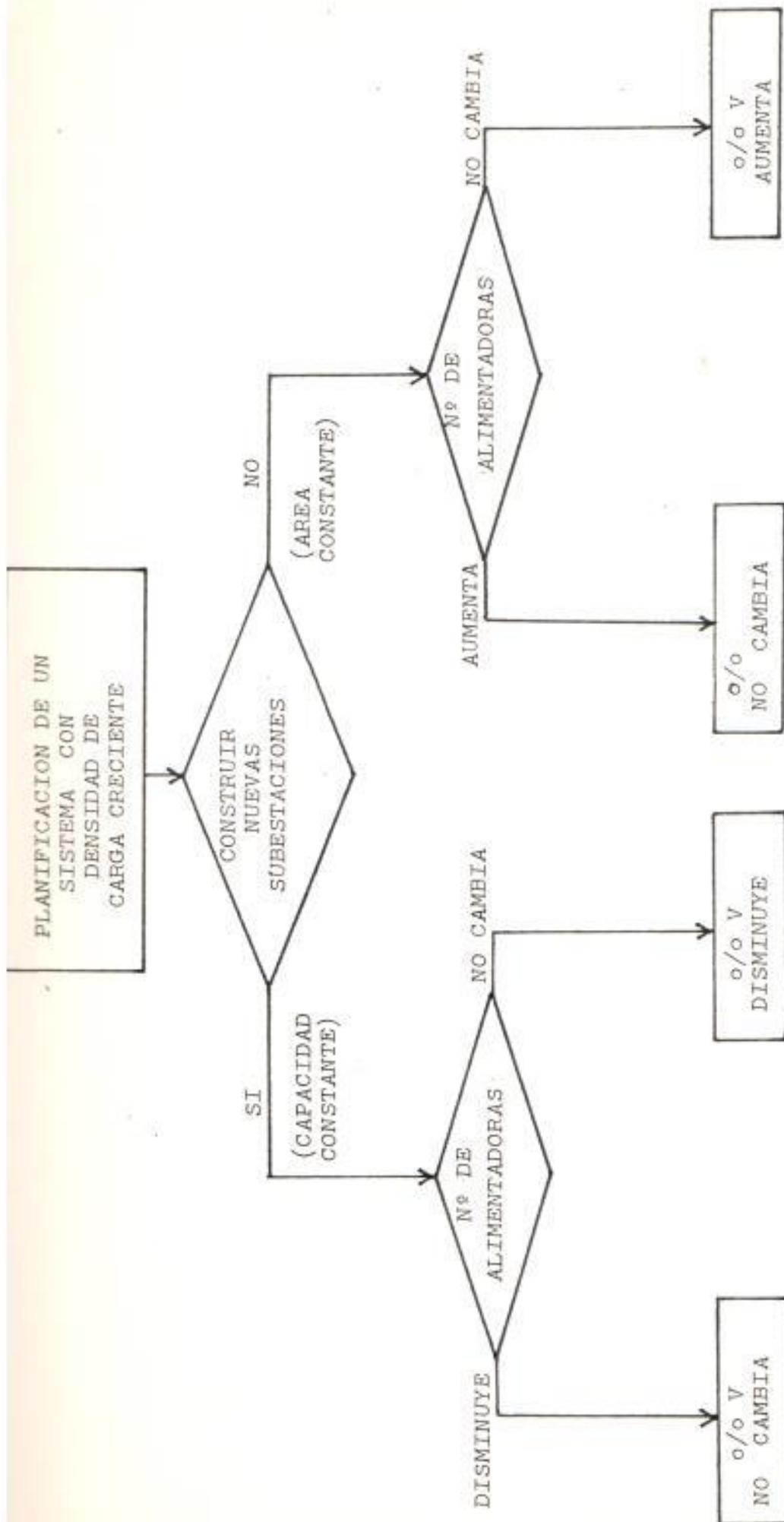


Fig. 2.11 Esquema lógico de la planificación de un sistema con densidad de carga creciente

## CAPITULO 3

### METODOS EMPLEADOS EN LA SOLUCION

La planificación de los sistemas de distribución puede considerarse como un problema que presenta aspectos diferentes. Por un lado, se debe seleccionar los posibles sitios de construcción de subestaciones, el tamaño de los transformadores, las rutas de las alimentadoras y su tamaño, de tal manera que satisfagan las limitaciones de capacidad térmica y de caída de voltaje. Además, a medida que el sistema se expande se debe añadir la capacidad necesaria para satisfacer la demanda en incrementos que sean prácticos y económicos.

Sin embargo, es improbable que todas las subestaciones de distribución lleguen a estar sobrecargada a la vez, entonces se debe decidir cuáles deben ser las subestaciones que deben expandirse; la expansión de estas subestaciones tendrá como consecuencia además que exista un exceso de capacidad en determinadas áreas. Entonces una nueva decisión debe hacerse y es cómo esta capacidad adicional puede ser utilizada.

Para resolver el problema de la planificación se ha realizado mucha investigación, sobre todo para tener valores cuantitativos de los parámetros que intervienen en ella.

Sin embargo, muy poco se ha hecho para encontrar cómo estos parámetros se relacionan entre sí y cómo los mismos pueden ser utilizados en un plan de expansión de un sistema real.

Los trabajos que tienen un enfoque unificado del problema son además, por lo general, información privada y de difícil acceso.

En este capítulo revisaremos la información que hemos utilizado en este trabajo y se describirá los métodos que hemos empleado para la solución del problema.

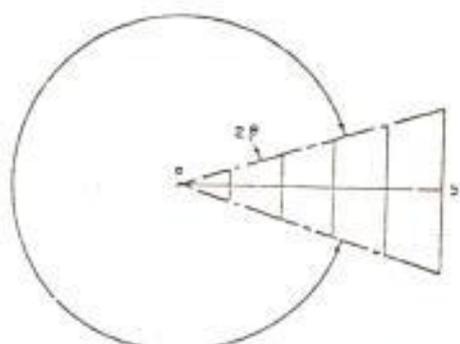
### 3.1. METODO DE LAS CURVAS APLICADAS A LA PLANIFICACION DE SUBESTACIONES

O. N. Reys y W. J. Denton emplean un modelo geométrico para representar las alimentadoras primarias y las áreas de influencia de las subestaciones. De esta forma se obtiene una familia de curvas que puede ser utilizada para la planificación de un sistema real. Estas curvas se deducen de la siguiente manera:

Supongamos que el área servida por una alimentadora es de forma triangular. De esta manera una alimentadora servirá un sector de ángulo  $2\theta^\circ$  y  $n(2\theta)^\circ = 360^\circ$  siendo  $n$  el número total de alimentadoras. Fig. 3.1.

Supongamos, además, que la carga contenida en esta

área es uniformemente distribuida.



*Fig. 3.1. Área de influencia de una subestación servida por n alimentadoras primarias*

Así una sección de la alimentadora primaria de longitud  $dx$ , situada a una distancia  $x$  del punto de alimentación, servirá una área igual a: (Fig. 3.2.).

$$2 x \tan\theta dx$$

Para obtener la caída de voltaje total en la alimentadora principal, desde el punto a al punto b, las caídas de voltaje de los elementos diferenciales se deben sumar.

La contribución a la caída de voltaje  $V_{ab}$  de cada uno de los elementos diferenciales, es igual al producto de la carga contenida en dicho elemento por su distancia  $x$  al punto a. Por lo tanto la sumatoria total será igual a:

$$\begin{aligned} V_{ab} &= K D \int_0^{S_n} x \cdot 2x \tan\theta \cdot dx \\ &= \frac{2}{3} K D S_n^3 \tan\theta \end{aligned}$$

Siendo:

$K$  = Porcentaje de caída de voltaje por KVA-milla

$D$  = Densidad de carga en KVA por milla cuadrada

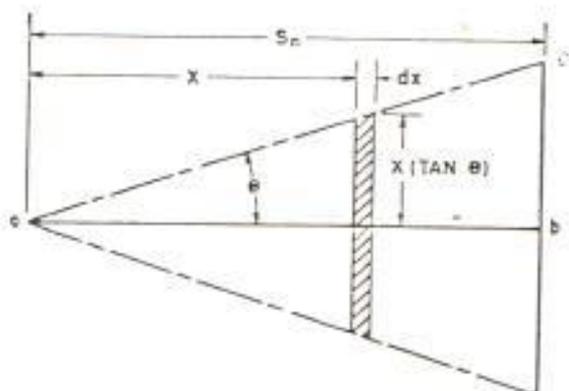


Fig. 3.2. Área de servicio de una alimentadora primaria

Esta ecuación puede arreglarse de tal forma que pueda ser utilizada en aplicaciones prácticas. De esta manera puede graficarse una familia de curvas que nos pueden servir para propósitos de planificación.



Fig. 3.3. Curvas aplicadas a subestaciones de distribución

Este método por lo tanto, nos permite una planificación satisfactoria; sin embargo la solución hallada no se puede considerar óptima.

Existen por otro lado métodos que emplean modelos matemáticos para obtener soluciones óptimas. Inmediatamente los analizaremos en la siguiente parte de este capítulo.

### 3.2. METODOS DE OPTIMIZACION

#### 3.2.1. Procedimiento iterativo para equipar subestaciones usando técnicas de optimización

E. Mazud, es el autor de este método que tiene por objetivo definir un modelo que simule el crecimiento de la carga y las áreas de servicio de las subestaciones de distribución.

Los datos obtenidos de este modelo pueden ser usados para determinar el tamaño y equipamiento de las subestaciones existentes o la construcción de nuevas subestaciones. Se utilizan técnicas de optimización para determinar el plan de costo más bajo.

El diagrama simplificado del procedimiento se muestra en la ( Fig. 3.4.).

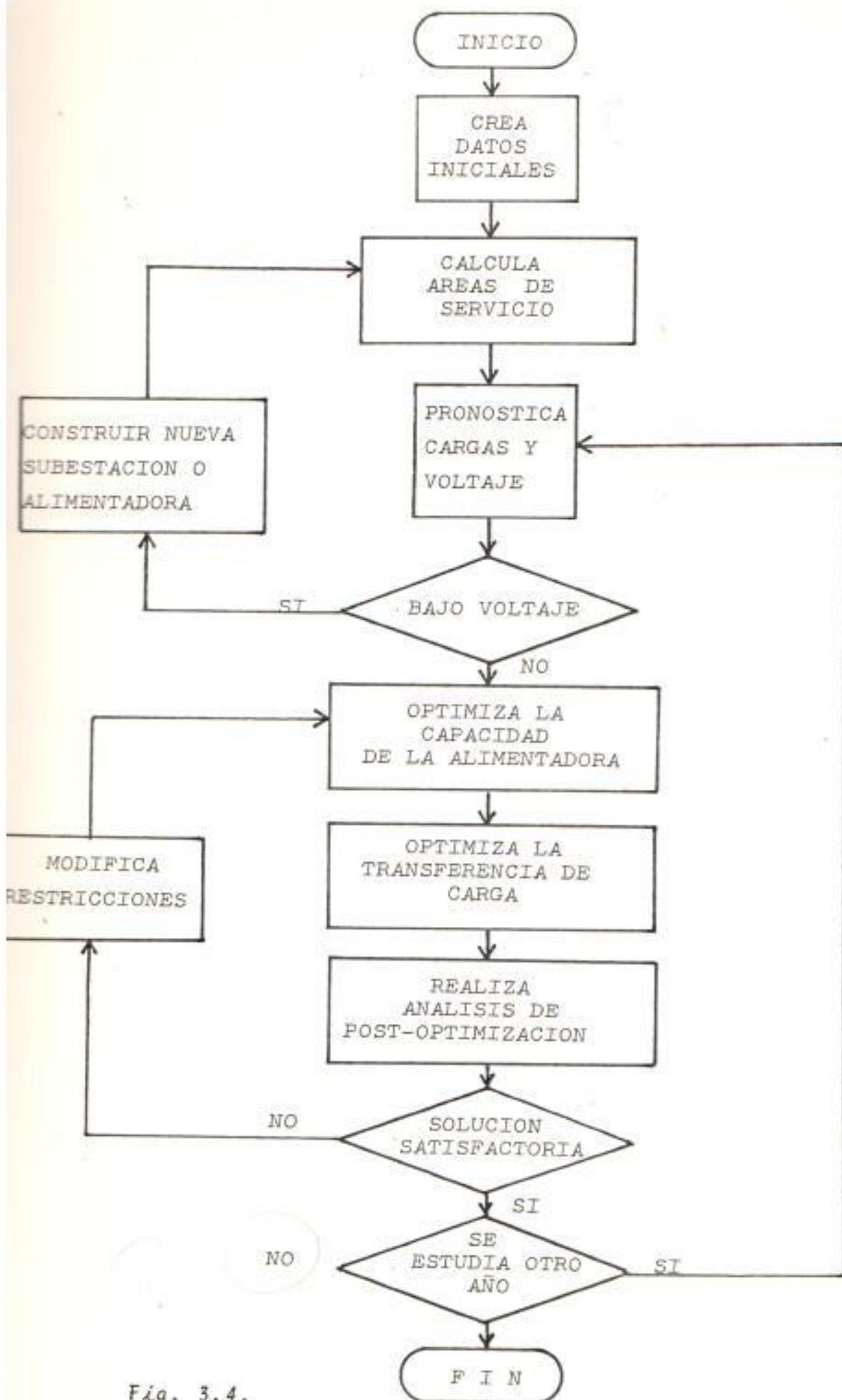


Fig. 3.4.

Los métodos de optimización usados en este trabajo son programación entera para la optimización de la capacidad de la subestación y programación lineal para obtener la transferencia óptima de la carga.

Sin embargo, a pesar de su valor este trabajo no resuelve adecuadamente el problema de la localización de las subestaciones así como de la definición de las áreas óptimas de servicio de dichas subestaciones.

### 3.2.2. Técnica de Optimización Matemática para localizar y determinar la capacidad de Subestaciones de Distribución

Dale M. Crawford y Steward B. Holt Jr., tienen como objetivo en este trabajo la planificación de la localización, el tamaño y las áreas de servicio de las subestaciones de distribución.

Las técnicas empleadas usan métodos de investigación de operaciones para optimizar simultáneamente la capaacidad de la subestación y las áreas de servicio. Los resultados de estas técnicas conducen a una configuración de subestaciones que tiende a minimizar las pérdidas de las alimentadoras primarias y los costos de congstrucción de las subestaciones.

Las técnicas utilizadas son: el algoritmo del caminino mínimo de Dijkstra y el algoritmo de Ford y Fulkerson

para resolver el problema del transporte.

Para implementar los datos para este procedimiento el sistema a estudiarse debe dividirse en una red de sectores de una misma área. Sabiendo además la localización de las subestaciones existentes el algoritmo de Dijkstra es usado para encontrar la distancia desde cada subestación a cada sector.

Este procedimiento provee los datos de distancias necesarias para ser utilizados en el algoritmo del transporte.

La carga de cada sector y la capacidad de cada subestación son empleados como entrada para el algoritmo del transporte además de las distancias previamente calculadas.

Los resultados de esta técnica son la capacidad necesaria y las áreas de servicio de la subestación, que produce una suma mínima de los productos de la carga de cada sector por la distancia de este a la subestación que lo sirve.

Para la realización de este trabajo se ha tomado como base el método de Crawford y Holt.

Los detalles del método utilizado se describen en seguida.

### 3.3. METODOS UTILIZADOS

#### 3.3.1. Datos

Para disponer de datos para la solución del problema, el Sistema a estudiarse se ha dividido en una red de cuadrados, cada uno de ellos de una área determinada, y conteniendo todos ellos carga. Cada uno de estos cuadrados serán considerados como vértices del gráfico equivalente del sistema.

#### 3.3.2. Algoritmo matricial para distancias de valor óptimo

Mediante este algoritmo obtenemos una matriz  $V$ , denominada matriz de distancias de valor mínimo, que tiene las distancias mínimas para todos los vértices del gráfico del sistema, así como también otra matriz  $S$  denominada matriz de arcos no modificados, en la cual se definen cuales son los arcos que forman los caminos de valor óptimo. ( Ver Capítulo IV ). Este algoritmo es atribuido a Shimbel.

#### 3.3.3 Radialidad

La restricción de la radialidad del sistema ha sido tomada en cuenta en el modelo matemático que se ha desarrollado. Para esto se utiliza un algoritmo que encuentra una dirección radial desde cada uno de los vértices

en donde esta ubicada una subestación a todos los demás vértices del gráfico del sistema. Esta dirección radial está definida en un vector  $K$  denominado vector dirección ( Ver Capítulo V ).

#### 3.3.4. Producto carga-distancia mínimo

Luego de encontrar los caminos óptimos desde cada vértice en el cual está situada una subestación a todos los otros se debe entonces establecer los límites de servicio de cada subestación. Para esto se requiere que se conozcan la carga de cada uno de los vértices, así como la capacidad de las subestaciones existentes.

Para esto el modelo del transporte se ha escogido utilizando para su solución el algoritmo de la columna mínima con la restricción que la capacidad de las subestaciones debe ser mayor que la demanda del sistema. De tal manera que este algoritmo minimiza la suma de los productos de las cargas servidas por las distancias a través de las cuales son servidas. ( Ver Capítulo VI ).

#### 3.3.5. Post-Optimización

Realizados los pasos anteriores se hace una inspección de la radialidad de la solución obtenida en la minimización del producto carga-distancia, obteniéndose como resultado otro vector de las mismas características del

del vector dirección pero esta vez para la solución del problema que se ha encontrado. Este vector consta de tantos árboles como subestaciones existen. Para servir como un dato de evaluación adicional se encuentran las pérdidas de las alimentadoras definidas en la solución y se inspecciona si estas están bajo el límite térmico determinado por las características de los conductores de las alimentadoras.

### 3.3.6. Localización óptima de una nueva subestación

Si el límite térmico de las alimentadoras se ha sobrepasado se determina el nodo en el cual debería colocarse una nueva subestación de tal manera de aliviar las subestaciones que pueden estar sobrecargadas. Para este fin se utiliza un algoritmo que utiliza las distancias mínimas del gráfico; es decir, los elementos de la matriz de distancias de valor mínimo  $V$ .

El diagrama del método utilizado se ilustra en la Fig. 3.5.

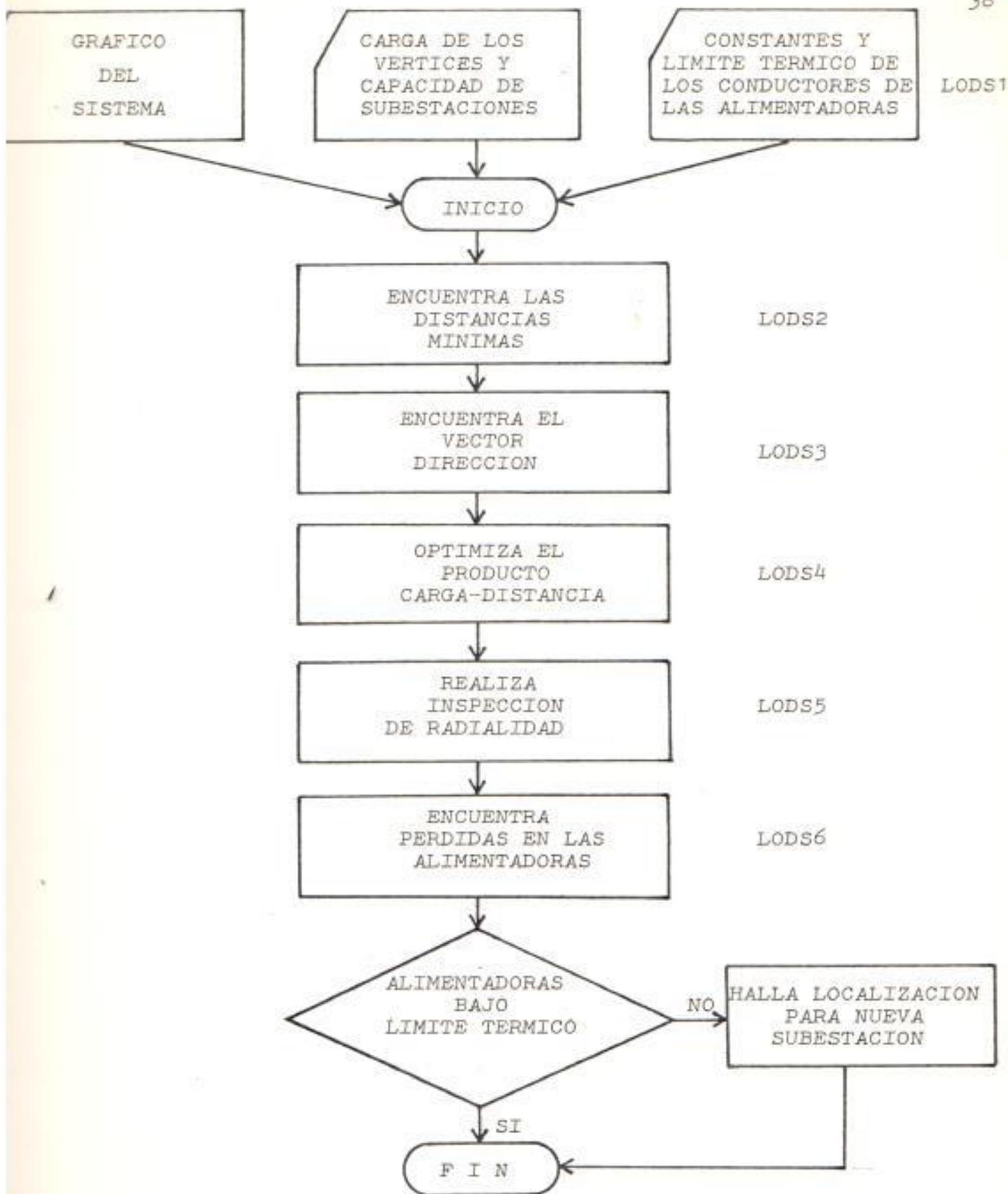


Fig. 3.5. Diagrama de flujo del Procedimiento Utilizado

## CAPITULO 4

### DISTANCIAS MINIMAS

El problema de las distancias mínimas es fundamental en la teoría de las gráficas y muchas veces, como en este caso, constituye un subproblema en otros problemas de optimización.

En este capítulo, en primer lugar, definiremos algunos conceptos generales de las gráficas que nos servirán para introducir luego la descripción del algoritmo matricial, su aplicación y su adaptación para hacer factible su utilización en computación cuando las gráficas son de gran tamaño, como las empleadas en este trabajo.

#### 4.1. CONCEPTOS GENERALES

##### 4.1.1. Gráfica de Orden $n$

Sea un conjunto finito:

$$X = \{x_i\} \quad i = 1, 2, \dots, n$$

Y el conjunto  $A$  de elementos  $(x_i, x_j)$  tales que  $x_i, x_j \in X$ . La pareja  $G = (X, A)$  constituye una gráfica de orden  $n$ . A cada elemento de  $X$  se hace corresponder un punto del plano que se llama vértice de la gráfica y que representa al elemento de  $X$  al cual corresponde.

A cada elemento  $(x_i, x_j) \in A$  se hace corresponder

una flecha que va de  $x_i$  a  $x_j$ , que se llama arco de la gráfica y que representa al elemento de  $A$  a cual corresponde. Es posible que existan varios arcos distintos que vayan de un vértice  $x_i$  a otro  $x_j$ , en este caso los arcos se representarán con  $(x_i, x_j)_1, (x_i, x_j)_2$ .

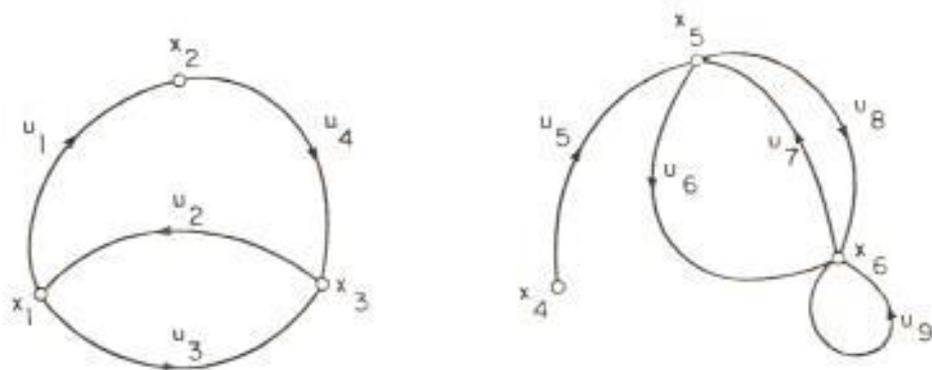


Fig. 4.1. Gráfica de orden 6

La Fig. 4.1 da un ejemplo de representación de una gráfica con ayuda de vértices y arcos. En este caso se tiene:

$$X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6\}$$

$$A = \{(x_1, x_2), (x_1, x_3), (x_2, x_3), (x_3, x_1), (x_1, x_5), \\ (x_5, x_6)_1, (x_5, x_6)_2, (x_6, x_5), (x_6, x_6)\}$$

$$|X| = 6, |A| = 9$$

Siendo:

$|X|$  = número de elementos contenidos en  $X$

#### 4.1.2. Gráfica Simétrica

Se dice que una gráfica  $G = (X, A)$  es simétrica si se tiene que:

$$\forall x_i, x_j: (x_i, x_j) \in A \rightarrow (x_j, x_i) \in A$$

En una gráfica simétrica toda pareja de vértices adyacentes están siempre unidos por dos arcos de orientaciones opuestas.

#### 4.1.3. Camino mínimo

Dados los vértices  $x_i$  y  $x_j$  de una gráfica  $G = (X, A)$  se llama Camino mínimo de  $x_i$  a  $x_j$ , y se representa con  $d(x_i, x_j)$ , al número de arcos de longitud mínima que va de  $x_i$  a  $x_j$ .

Es fácil ver, partiendo de la definición que:

$$d(x_i, x_j) + d(x_j, x_k) \geq d(x_i, x_k)$$

$$x_i, x_j, x_k \in X$$

y que si la gráfica  $G$  es simétrica entonces:

$$d(x_i, x_j) = d(x_j, x_i) = \lambda(x_i, x_j)$$

A  $\lambda(x_i, x_j)$  se le llama distancia entre los vértices  $x_i$  y  $x_j$ .

#### 4.1.4. Matriz $V$ de valores asociados a una gráfica

Esta matriz se representa con:

$$V = (v_{ij})$$

y, es una matriz cuadrada de orden igual al número de vértices de la gráfica cuyos elementos  $v_{ij}$  se definen de la siguiente manera:

$$v_{ij} = \begin{cases} \text{Valor del arco } (x_i, x_j) & \text{si } (x_i, x_j) \in A \\ M & \text{si } (x_i, x_j) \notin A \quad M + \infty \\ 0 & \text{si } x_i = x_j \end{cases}$$

Supongamos la gráfica que se muestra en la Fig. 4.2.

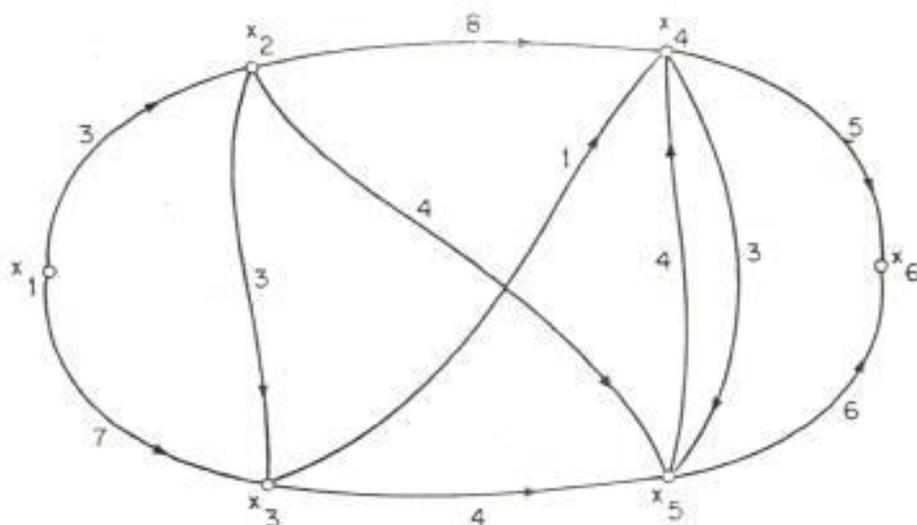


Fig. 4.2. Gráfica del ejemplo

La matriz de valores asociados a la gráfica será:

$$V = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 \end{array} \\ \begin{array}{l} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{array} \end{array} \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline \begin{array}{c} 0 \\ M \\ M \\ M \\ M \\ M \end{array} & \begin{array}{c} 3 \\ 0 \\ M \\ M \\ M \\ M \end{array} & \begin{array}{c} 7 \\ 3 \\ 0 \\ M \\ M \\ M \end{array} & \begin{array}{c} M \\ 8 \\ 1 \\ 0 \\ 4 \\ M \end{array} & \begin{array}{c} M \\ 4 \\ 4 \\ 3 \\ 0 \\ M \end{array} & \begin{array}{c} M \\ M \\ M \\ 5 \\ 6 \\ 0 \end{array} \\ \hline \end{array}$$

#### 4.2. ALGORITMO MATRICIAL PARA CAMINOS DE VALOR OPTIMO

A continuación se describe un algoritmo matricial para definir los caminos de valor óptimo.

##### 4.2.1. Definición de las operaciones matriciales

Sean las siguientes matrices:

$$A = (A_{ij})_{n \times n} \text{ y } B = (B_{ij})_{n \times n}$$

La operación matricial  $A \cdot B = C$  se define de la siguiente manera:

$$C_{ij} = \min_k \{a_{ik} + b_{kj}\}$$

$$= \min \{ a_{i1} + b_{1j}, a_{i2} + b_{2j}, a_{i3} + b_{3j}, \dots, a_{in} + b_{jn} \}$$

#### 4.2.2. Matriz de caminos de valor óptimo

Si  $V = (v_{ij})$  es la matriz de valores asociados a una gráfica, la matriz de caminos de valor óptimo es  $V^{n-1}$ , en donde  $n$  es el número de vértices de una gráfica. Lo anterior fue establecido por Shimbél, pero sólo para caminos de valor mínimo y además no definió cuáles eran esos caminos.

Si, en un momento dado, se obtiene  $V^m = V^{m-1}$  siendo  $m < n-1$ , la matriz  $V^m$  es la matriz de caminos de valor óptimo.

Para llegar rápidamente a la matriz de caminos de valor óptimo es conveniente ir calculando las siguientes potencias:

$$V, V^2, V^4, V^8, V^{16} \dots$$

El algoritmo puede ilustrarse mejor mediante un ejemplo.

#### 4.2.3. Ejemplo

Se encontrará la matriz de caminos de valor óptimo para la gráfica de la Fig. 2. Esta matriz será la  $V^5$ , puesto que el número de vértices ( $n$ ) de la gráfica es 6.

La matriz  $V^2$  será:

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$
$x_1$	0	3	6	8	7	M
$x_2$	M	0	3	4	4	10
$x_3$	M	M	0	1	4	6
$x_4$	M	M	M	0	3	5
$x_5$	M	M	M	4	0	6
$x_6$	M	M	M	M	M	0

$$V V = V^2 =$$

La matriz anterior se calculó con base en las operaciones que se establecieron antes. A continuación se demuestra como fue construido el primer renglón de la matriz:

$$v_{11} = \min \{ 0+0, 3+M, 7+M, M+M, M+M, M+M \} = 0$$

$$v_{12} = \min \{ 0+3, 3+0, 7+M, M+M, M+M, M+M \} = 3$$

$$v_{13} = \min \{ 0+7, 3+3, 7+0, M+M, M+M, M+M \} = 6$$

$$v_{14} = \min \{ 0+M, 3+8, 7+1, M+0, M+4, M+M \} = 8$$

$$v_{15} = \min \{ 0+M, 3+4, 7+4, M+3, M+0, M+M \} = 7$$

$$v_{16} = \min \{ 0+M, 3+M, 7+M, M+5, M+6, M+0 \} = M$$

La matriz  $V^5$  se obtuvo de igual manera y esta es la matriz de caminos de valor mínimo:

$$V^5 = V^6 = V^3$$

	$x_1$	$x_2$	$x_3$	$x_4$	$x_5$	$x_6$
$x_1$	0	3	6	7	7	12
$x_2$	M	0	3	4	4	9
$x_3$	M	M	0	1	4	6
$x_4$	M	M	M	0	3	5
$x_5$	M	M	M	4	0	6
$x_6$	M	M	M	M	M	0

Las gráficas que se han usado en esta investigación son de un gran número de vértices, por lo que su implementación en la computadora puede resultar un proceso que requiera gran cantidad de memoria y tiempo de computación. De esta manera ha sido necesario adaptar el algoritmo para evitar esta circunstancia.

#### 4.3. ALGORITMO MATRICIAL MODIFICADO PARA SER USADO EN COMPUTADORAS

El proceso usual para hallar la matriz de caminos de valor óptimo fue definido de la siguiente manera:

$$c_{ij} = \min \{ \text{fila } i \text{ de } V + \text{columna } j \text{ de } V \}$$

En donde:  $V$  es la matriz de valores asociados a la gráfica.

El proceso termina cuando  $V^{n-1} = V^n$ ; si  $V^{n-1} \neq V^n$  se reemplaza  $V^n$  por  $V^{n-1}$  y se repite.

En la computadora la matriz se guarda usualmente por columnas, esto tiene como consecuencia que el proceso sea muy largo a no ser que la transpuesta de la matriz este disponible.

Supongamos que es posible tener la transpuesta de la matriz en la memoria, entonces el proceso de minimización puede ser representado por la ecuación:

$$R = V^t V$$

Donde para todas las filas  $j, j = 1, \dots, n$ , el  $n$ ésimo término en la fila está dado por la ecuación:

$$R_{ij} = \min \{ \text{columna } i \text{ de } V^t + \text{columna } j \text{ de } V \}$$

Una vez que todos los términos en una determinada fila han sido calculados, no se requiere la columna  $i$  de  $V^t$  y el espacio ocupado por ella en la computadora puede ser usado para almacenar la fila  $i$  de  $R$  o la columna  $i$  de  $R^t$ .

Modificado el algoritmo de la manera descrita ante-

riormente su uso es posible para gráficos de gran tamaño.

Consecuentemente, de esta manera la matriz obtenida como solución será la matriz de caminos de valor mínimo, pero habrá que investigar la integración de estos caminos, y para esto será necesario utilizar la matriz de arcos no modificados  $S$ , cuya definición la damos inmediatamente.

#### 4.4. MATRIZ DE ARCOS NO MODIFICADOS $S$

##### 4.4.1. Definición

Esta matriz se representa con:

$$S = (s_{ij})$$

y es una matriz cuadrada de orden igual al número de vértices de la gráfica cuyos elementos  $S_{ij}$  se definen de la siguiente manera :

$$s_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{Si el valor del arco } (x_i, x_j) \text{ no fue modifi} \\ & \text{ficado entre la matriz } V \text{ y la matriz -} \\ & \text{que define los valores de los caminos de} \\ & \text{valor óptimo.} \\ 0 & \text{Cualquier otro caso.} \end{cases}$$

##### 4.4.2. Ejemplo

Para el ejemplo anterior la matriz de arcos no modifi

ficados se obtuvo comparando los valores de la matriz  $V$  y la matriz  $V^5$  resultando:

$$S = \begin{array}{c} \begin{array}{cccccc} x_1 & x_2 & x_3 & x_4 & x_5 & x_6 \end{array} \\ \begin{array}{c} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \\ x_6 \end{array} \end{array} \begin{array}{|c|c|c|c|c|c|} \hline \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{c} 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \\ 1 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ 1 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \\ 0 \end{array} & \begin{array}{c} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 1 \\ 0 \end{array} \\ \hline \end{array}$$

El siguiente paso será obtener los arcos que forman los caminos de valor mínimo que parten de los vértices - en donde están ubicadas las subestaciones a todos los demás. De esto se tratará en el siguiente capítulo.

## CAPITULO 5

### DIRECCION OPTIMA

Las redes de distribución son generalmente circuitos de bajo voltaje, donde la potencia fluye en una dirección, únicamente, desde la subestación a los terminales del consumidor.

La unidireccionalidad del flujo de potencia sumado a la baja estadística de fallas del equipo a bajos niveles de voltaje, ha determinado que se adopte configuraciones radiales para las redes de distribución.

El algoritmo de Shimbél, ya expuesto en el capítulo anterior, nos da 2 matrices resultantes:  $V^n$  y  $S$ . En la primera constan los valores de las distancias mínimas, y en la segunda los arcos que conforman los caminos de distancia mínima.

Por lo tanto, estos arcos deben ser escogidos de tal manera que se tenga una configuración radial a partir de las subestaciones; esto es, cada vértice de la gráfica debe ser conectado a un solo vértice que contenga subestaciones.

El problema puede plantearse entonces de la siguiente manera: cómo encontrar una ruta definida en la matriz desde cada uno de los vértices en donde se halla situada

una subestación hasta los demás vértices, de tal manera que la suma de las distancias asociadas a cada uno de los arcos sea un mínimo.

Queremos, por lo tanto, obtener un árbol que contenga todos los vértices y los arcos asociados con ellos - desde aquellos vértices que sean subestaciones.

Para este fin se ha desarrollado un algoritmo que utiliza las matrices  $V^n$  y  $S$  para encontrar un vector que define un árbol para el gráfico desde cada vértice con subestaciones. Este algoritmo se debe a E. Crompton.

Este vector se ha denominado  $K$  y está definido de la siguiente manera:

#### 5.1. VECTOR DIRECCION DEFINICION

Este vector se representa con:

$$K = (k_i)$$

Este vector tiene las siguientes características:

- a) El número de elementos es igual al número de vértices de la gráfica  $i = 1, \dots, n$ .
- b) Si  $k_s = s$ , éste es el vértice desde donde comienza la ruta.
- c) Sea un elemento  $k_k$  cualquiera, entonces su valor indica el número del último vértice en la ruta.

desde  $k_s$  a  $k_k$ .

- d) Ninguno de los términos  $k_i$ ;  $i = 1, \dots, n$ , puede ser cero.

Para ilustrar mejor esta definición consideremos el siguiente ejemplo.

### 5.2. EJEMPLO

Sea el árbol demostrado en la Fig. 5.1.

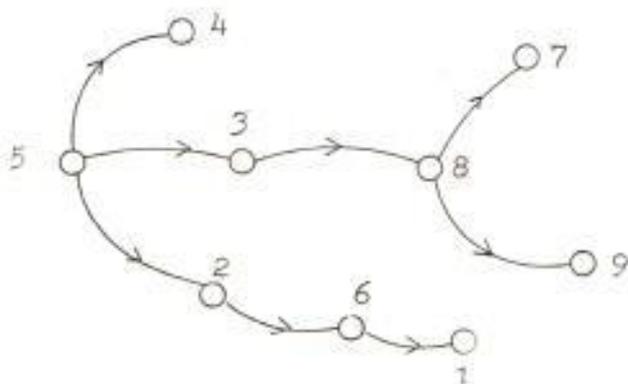


Fig. 5.1. Árbol del Ejemplo

El vector dirección será entonces:

$k_1$     $k_2$     $k_3$     $k_4$     $k_5$     $k_6$     $k_7$     $k_8$     $k_9$

6	5	5	5	5	2	8	3	8
---	---	---	---	---	---	---	---	---

Para encontrar la ruta del vértice 9 a  $s$ , siendo  $s$

el vértice desde donde se inicia la ruta, entonces:

a) El término  $k_9$  es 8, vamos a  $k_8$

b) El término  $k_8$  es 3, vamos a  $k_3$

c) El término  $k_3$  es 5, vamos a  $k_5$

d) El término  $k_5$  es 5, este es el principio de la ruta, es decir el término  $k_s$ .

La ruta será entonces: 5 - 3 - 8 - 9

Enseguida se describe el algoritmo usado para encontrar el vector dirección  $K$ .

### 5.1. ALGORITMO PARA HALLAR EL VECTOR DIRECCION

Paso 1: De  $i = 1, \dots, n$

$$k_i = \begin{cases} s \text{ y } k_{sj} = 1, j = 1, \dots, s+1 & \text{si } S_{si} = 1 \\ 0 & \text{si } S_{si} = 0 \end{cases}$$

Donde:

$s$  es el número del vértice desde el cual se inicia la ruta y  $KS$  es un vector auxiliar.

Paso 2:  $k_s = s$

Paso 3: De  $ij = 1, \dots, n-1$

$$ILP = k_{ij}^s$$

Paso 4: De  $i = 1, \dots, n$

Si  $i = \text{ILP}$  y  $k_i = \text{ILP}$

Se va al paso 5.

Paso 5: De  $k = 1, \dots, n$

Si a)  $S_{ik} \neq 0$  y

$$b) v_{sk}^n = v_{si}^n + v_{ik}^n$$

Se hace

$$k_k = i \quad y$$

$$k_{s_{j+1}} = k$$

De no cumplirse las condiciones a) y/o b) se va al paso 4.

El algoritmo termina cuando:  $j = n-1$ .

Este algoritmo puede ser ampliado y de esta forma se ha utilizado en este trabajo para incluir todas las rutas posibles para el gráfico en estudio cuando éstas existen.

## CAPITULO 6

### OPTIMIZACION DEL PRODUCTO CARGA - DISTANCIA

El objetivo del empleo de la optimización del producto carga-distancia es el de establecer los límites de las áreas de servicio de las subestaciones, de tal forma que cada sector sea servido lo más económicamente posible.

Para este fin utilizamos las distancias mínimas halladas en los pasos anteriores del proceso, ya que se considera que si las distancias de las alimentadoras son minimizadas se minimiza el costo del conductor y de cierto modo las pérdidas, factores éstos que varían directamente con la distancia.

Además, con esta técnica podemos determinar la capacidad óptima de la subestación.

Para la comprensión del tema enfocaremos un tópico de programación lineal llamado problema del transporte, que tiene un planteamiento similar al que nosotros hemos dado a la minimización del producto carga-distancia.

Describiremos luego un algoritmo que nos da una solución inicial al Problema del Transporte y el algoritmo que hemos utilizado para nuestra solución, así como también describiremos el proceso de post-optimización.

## 6.1. PROBLEMA DEL TRANSPORTE

El problema del transporte clásico consiste en llevar cantidades de un cierto producto de  $m$  orígenes a  $n$  destinos, de manera que conocida la cantidad de que se dispone en cada origen, la cantidad demandada en cada destino y el costo de transportar una unidad de producto de cada origen a cada destino, se satisfaga la demanda con el costo total mínimo.

Se puede formular matemáticamente el problema como:

$$\min z = \sum_{ij} c_{ij} x_{ij}$$

Sujeto a:

$$1) \quad \sum_{j=1}^n x_{ij} = a_i \quad a_i > 0, i = 1, \dots, m$$

$$2) \quad \sum_{i=1}^m x_{ij} = b_j \quad b_j > 0, j = 1, \dots, n$$

En Donde:

$c_{ij}$  = Costo de transportar una unidad del origen  $i$  al destino  $j$ .

$x_{ij}$  = Cantidad de producto transportada del origen  $i$  al destino  $j$ .

$a_i$  = Disponibilidad en el origen  $i$

$b_j$  = Requerimiento del destino  $j$

La disponibilidad y la demanda totales deben ser iguales; esto puede verse sumando 1) desde  $i = 1$  hasta  $m$  y 2) desde  $j = 1$  a  $n$ .

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} = \sum_{i=1}^m a_i$$

$$\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij} = \sum_{j=1}^n b_j$$

Ya que dos cantidades iguales a una tercera son iguales entre sí, se obtiene:

$$\sum_{i=1}^m a_i = \sum_{j=1}^n b_j$$

que es lo que se deseaba demostrar.

Es conveniente colocar todos los datos como se demuestra en la Fig. 6.1. Esta matriz es conocida como la matriz de costos.

Existen varios métodos para encontrar soluciones a este problema y que por tratarse de uno de programación

lineal necesita de una solución factible básica inicial.

	$D_1$	$D_2$	$D_3$	$\dots$	$D_j$	$\dots$	$\dots$	$D_n$	$a_i$
$D_1$	$c_{11}$	$c_{12}$	$c_{13}$	$\dots$	$c_{1j}$	$\dots$	$\dots$	$c_{1n}$	$a_1$
$D_2$	$c_{21}$	$c_{22}$	$c_{23}$	$\dots$	$c_{2j}$	$\dots$	$\dots$	$c_{2n}$	$a_2$
$\vdots$	$\vdots$								
$\vdots$	$\vdots$								
$\vdots$	$\vdots$								
$D_i$	$c_{i1}$	$c_{i2}$	$c_{i3}$	$\dots$	$c_{ij}$	$\dots$	$\dots$	$c_{in}$	$a_i$
$\vdots$	$\vdots$								
$D_m$	$c_{m1}$	$c_{m2}$	$c_{m3}$	$\dots$	$c_{mj}$	$\dots$	$\dots$	$c_{mn}$	$a_m$
$b_j$	$b_1$	$b_2$	$b_3$	$\dots$	$b_j$	$\dots$	$\dots$	$b_n$	

Uno de los algoritmos utilizados es el de la columna mínima que enseguida lo describiremos.

## 6.2. ALGORITMO DE LA COLUMNA MINIMA

Paso 1: Se principia buscando el elemento de la matriz de costos que tiene el costo mínimo en la columna

$i; i = 1, \dots, n$

Supóngase que es el  $(r, i)_s$  luego:

$$x_{ri} = \min (a_r, b_i)$$

Paso 2: Si  $b_i > a_r$ , se va al paso 1 haciendo  
 $a_r = a_r - b_i$

Si no es así se va al paso 3

Paso 3: Se elimina la fila  $r$ , esto es, no podrá seleccionarse posteriormente ningún elemento de esta fila.

Paso 4: En la misma columna  $i$  se pasa al elemento con el siguiente costo más bajo haciendo  $b_i = b_i - a_r$ . Supóngase que  $(s, i)$  es ese elemento, entonces,

$$x_{si} = \min (a_s, b_i)$$

Se continúa hasta que  $x$  satisface el requerimiento del destino  $i$ .

Paso 5: Va al paso 1.

### 6.3. MODELO MATEMATICO PARA LA MINIMIZACION DEL PRODUCTO CARGA-DISTANCIA

La función que se va a minimizar es el producto carga-distancia.

A semejanza del modelo de transporte tenemos una matríz de costos unitarios. En este caso la matriz está-formada por las distancias mínimas, es decir por las fi-las de la matriz  $V^n$  en donde existen subestaciones. Matemáticamente el problema se puede plantear de la siguiente manera:

$$\min z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n b_i c_{ij}$$

Sujeto a:

$$\sum_{i=1}^{m'} b_i \leq a_j$$

Donde:

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

$$m' < n$$

Y,

$m$  = Número de subestaciones

$n$  = Número de sectores o vértices de la gráfica

$m'$  = Número de sectores servidos por la subestación

$j$

Dos restricciones adicionales tiene el modelo, la -

primera es que cada sector debe ser servido por una s3la subestaci3n y la segunda que si un sector tiene la misma distancia m3nima a varias subestaciones el sector ser3 a signado a aquella con mayor capacidad.

Para encontrar soluci3n a este problema se ha utiliz3do un algoritmo semejante al de la columna m3nima pero tomando en cuenta las restricciones citadas anteriormente.

#### 6.4. ALGORITMO QUE MINIMIZA EL PRODUCTO CARGA-DISTANCIA

Antes de describir el algoritmo definiremos algunos vectores y matrices utilizados por 3ste.

Sea:

$$A = (a_j) \quad j = 1, \dots, m$$

Un vector de dimensi3n  $m$  donde cada t3rmino es la capacidad de determinada subestaci3n.

Sea:

$$B = (b_i); \quad i = 1, \dots, n$$

Un vector de dimensi3n  $n$  donde cada t3rmino es la demanda de los v3rtices de la gr3fica considerada:

Sea:

$$C = (c_{ij}) \quad i = 1, \dots, n; \quad j = 1, \dots, m$$

Una matriz de orden  $n \times m$  formada de la matriz  $V^n$  para los vértices que tienen subestaciones.

Sean además:

$$RD = (rd_i) , \quad i = 1, \dots, n$$

Vector que contiene las distancias mínimas del sistema resultante y

Sea:

$$KC = (kc_i) , \quad i = 1, \dots, n$$

Vector de dimensión  $n$  que contiene el número del vértice de la subestación asignada a cada sector.

El algoritmo consta de los siguientes pasos:

Paso 1: Se principia buscando los elementos de la matriz  $C$  que tienen el valor mínimo en la columna  $i$ ,  $i = 1, \dots, n$

Supóngase que son:

$$(r_1, i), (r_2, i), (r_k, i)$$

$$k < m$$

Paso 2: Si los elementos de la columna son iguales al valor mínimo entonces:

$$d_j = \begin{cases} a_j - b_i & \text{Si } a_j > b_i \\ 0 & \text{Si } a_j \leq b_i \end{cases}$$

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

Paso 3: Se busca el elemento máximo del vector-D. Sea este  $d_s$ , entonces el vértice  $i$  se asigna a la subestación  $1$  con la capacidad  $a_s$ .

Se hace entonces:

$$rd_i = c_s \quad \text{y} \quad kc_i = 1$$

Paso 4: Se hace  $a_s = a_s - b_i$  y se continúa con el Paso 1. El proceso se detiene cuando todos los vértices de la gráfica tienen asignada una subestación.

El algoritmo de esta manera nos da las zonas de servicio óptimo y además la capacidad efectiva de cada subestación. El valor de la función objetivo en el punto de solución constituye una valiosa ayuda cuando tenemos varios planes que se deben evaluar comparativamente.

Además, la suma de los productos carga-distancia para cada subestación es útil para evaluar las áreas de servicio de las subestaciones individualmente.

## 6.5. POST-OPTIMIZACION

### 6.5.1. Inspección de la radialidad de la solución

Una inspección de la radialidad de la solución alcanzada con el algoritmo citado anteriormente se hace necesaria para obtener una solución satisfactoria.

Al final de esta se obtiene un nuevo vector que se ha denominado RDP, que es el vector dirección para el sistema total; este vector está formado por  $m$  árboles, uno para cada una de las subestaciones del sistema.

Para llevar a cabo esta inspección se utiliza el siguiente algoritmo:

Paso 1: Hacemos  $rdp_i = 0 \quad i = 1, \dots, n$

Paso 2: Buscamos el elemento máximo del vector RD para los sectores para los cuales  $rdp_i$  es cero

$$i = 1, \dots, n$$

Paso 3: Ubicamos en el vector KC el elemento  $kc_k$ , es decir el número del sector de la subestación asignada a dicho sector.

Paso 4: Ubicamos el vector dirección para esa subestación.

Paso 5: Chequeamos en el vector dirección la ru

ta mínima para la subestación de que se trate utilizando el vector KC; al final de este proceso encontramos un árbol para dicha subestación que consta en el vector RDP.

Paso 6: Vamos al paso 2.

El algoritmo termina cuando los elementos del vector RDP son diferentes de cero.

### 6.5.2. Pérdidas en las alimentadoras y Límite Térmico

Los árboles definidos en el proceso anterior consti-  
tuyen una configuración de alimentadoras en donde cada-  
vértice tiene una carga. De esta manera podemos conocer  
las pérdidas y la capacidad de transporte. Si suponemos  
un calibre de conductor para los arcos uniendo dichos -  
vértices.

La limitación que supone definir el calibre del con-  
ductor puede justificarse si consideramos que, por lo ge-  
neral, en casi todos los sistemas de distribución exis-  
tentes este no es un parámetro susceptible de cambio. Y  
en lugares donde sea necesario construir nuevas alimenta-  
doras la decisión para elegir el calibre del conductor -  
podrá realizarse integrándola a la solución final.

Las pérdidas de potencia activa están definidas co-  
mo:

$$I^2R$$

Un grán número de tablas están disponibles para evaluar dichas pérdidas, éstas emplean constantes que se derivan de la siguiente ecuación:

$$L = \frac{3KV_{rn}^2}{R}$$

Donde:

L = Constante de pérdidas

$KV_{rn}$  = Kilovoltios fase a neutro de la carga

R = Resistencia por mil piés de un conductor

De tal manera que para hallar las pérdidas de una alimentadora de determinada longitud y con determinada carga se empleará la siguiente fórmula:

$$\text{Pérdidas} = \frac{\text{KVA}^2 \cdot \text{miles de piés de la alimentadora}}{L}$$

El objetivo de obtener las pérdidas en las alimentadoras no es otro sino el de contar con un elemento más para la evaluación de la solución final hallada anteriormente.

Además, la configuración final nos permite una evaluación adicional y es la del límite térmico de las alimentadoras.

Llámase límite térmico la temperatura máxima que pue

de alcanzar el conductor en condiciones permanentes de servicio. Teniendo presente que para cada tipo de conductor existe una temperatura límite a partir de la cual se empieza a producir una disminución de su resistencia-mecánica.

Esto nos lleva a determinar si el límite térmico ha sido sobrepasado una nueva condición en el proceso de optimización: la localización de una nueva subestación.

## 6.6. POSICION OPTIMA PARA UNA NUEVA SUBESTACION

### 6.6.1. Definición

Definamos la operación vectorial

$$rd_j * v_{ij}^n$$

Como el cálculo del vector  $S^*$ , cuyos elementos tienen la siguiente característica:

$$s_j^* = \min (rd_j, v_{ij}^n)$$

Donde:

$rd_j$  = Elemento  $j$  del vector  $RD$  que contiene las distancias mínimas del sistema resultante.

$v_{ij}^n$  = Elemento  $j$  de la fila  $i$  de la matriz  $V^n$  no usada como subestación.

## 6.6.2. Algoritmo

Para hallar la mejor posición para una nueva subestación procedemos de la siguiente manera:

Paso 1: Hallamos los elementos del vector  $S^*$  de acuerdo a la definición dada anteriormente.

Paso 2: Para cada una de las filas no usadas como subestación evaluamos:

$$\Delta s_i = rd_i - s_i^*$$

Paso 3: Hallamos la suma de los  $\Delta s_i$ ,  $i = 1, \dots, n$

Paso 4: Cuando la sumatoria es máxima para determinada fila tenemos el mayor cambio en el vector RD para cualquier vector adicional. Sea esta fila la  $y$ . Por lo tanto,  $S^*$  es el nuevo vector RD y  $y$  es el vértice donde se debe localizar la nueva subestación.

Este algoritmo puede ser modificado si en el paso 2 tomamos en cuenta la demanda de los sectores de la siguiente manera

$$\Delta_i = (rd_i - s_i^*) b_i$$

## CAPITULO 7

### DESCRIPCION DEL PROGRAMA

En el presente capítulo se describirá el programa de computador escrito en lenguaje Fortran que efectúa los cálculos que se han detallado en los capítulos anteriores. En primer lugar se citarán las características generales del programa y a continuación se tratarán los subprogramas utilizados

#### 7.1. GENERALIDADES

El programa LODS (siglas de Localización Óptima de Subestaciones), consta de un programa principal y 8 subprogramas de subrutina.

El mismo ha sido implementado en un computador IBM 1130 de 8K de memoria, pero puede ser fácilmente adaptado a cualquier otro modelo de computador.

##### 7.1.1. Procedimiento

En términos generales, el programa lee los datos - por medio del programa principal y de la subrutina LODS1. Estos datos son inspeccionados tanto por el programa principal como por la subrutina LODS1. Si alguna inconsistencia o algún error grave es detectado en los datos de entrada, el programa escribe un mensaje de error y se detiene la ejecución.

Si los datos son correctos y consistentes, el programa pasa a ejecutar la subrutina LODS2 después de imprimir los datos leídos en forma tabular. La subrutina LODS2 encuentra las distancias mínimas, es decir la matriz de distancias de valor mínimo  $V^n$  y además encuentra la matriz de arcos no modificados S.

Posteriormente, el programa utilizando las matrices anteriormente calculadas encuentra el vector dirección para los sectores en los cuales está ubicada una subestación por medio de la subrutina LODS3.

Luego por medio de la subrutina LODS4 el programa optimiza el producto carga-distancia obteniéndose las áreas de servicio de las subestaciones.

La subrutina LODS5 realiza una inspección de la radialidad de la solución hallada, obteniendo como resultado el vector dirección para el sistema. Estos resultados se imprimen también en forma tabular.

Inmediatamente, el programa mediante la subrutina LODS6 encuentra las pérdidas de las alimentadoras definidas en la solución y se inspecciona si estas están bajo el límite térmico; si no lo están, el programa determina el nodo en el cual deberá colocarse una nueva subestación e imprime en forma tabular las pérdidas y el nodo asignado para la nueva subestación, constituyendo la ter-

cera tabla entregada por el programa.

Si se desea, el programa puede efectuar los cálculos para más subestaciones y para diferentes demandas en los nodos. Esto hace posible estudiar varias alternativas de un solo sistema con mucha facilidad.

### 7.1.2. Limitaciones

El programa puede ser usado para estudios de sistemas de hasta 100 nodos y 15 subestaciones.

Estas limitaciones son producto de la pequeña capacidad de memoria del IBM 1130, pero el programa puede ser ampliado si es usado en un computador con una mayor memoria principal.

### 7.1.3. Glosario de variables usadas en el programa

A continuación se da una lista de las principales variables usadas tanto en el programa principal como en las subrutinas y una descripción corta de su significado.

N.	Número total de sectores
MSUB	Número total de subestaciones
IERR	Indicador de error en los datos del programa
K (8,100)	Vector dirección
RD (100)	Vector que contiene para cada uno de los sec

	tores el número de la subestación asignada - en el programa
KC (100)	Vector que contiene para cada uno de los sectores el número de la subestación asignada
BJ (100)	Demanda en MVA de cada uno de los sectores
KDP (100)	Vector dirección para el sistema solución
ISUB (15)	Arreglo que contiene los números de los sectores en donde están ubicadas las subestaciones
KLOC (15)	Arreglo que contiene los números de los registros de la fila que almacena el vector dirección para cada uno de los sectores con subestaciones
A (15)	Capacidad en MVA de cada una de las subestaciones
PJ (15)	Constante de pérdidas para las alimentadoras de cada subestación
TC (15)	Límite térmico de los conductores de las alimentadoras de cada subestación
TT1 (15)	Arreglo alfanumérico en donde se pueden almacenar hasta sesenta caracteres
TT2 (15)	Idem
NOM (4)	Arreglo que almacena el nombre de las subes-

- taciones
- VR (100) Arreglo que contiene las sucesivas filas de la matriz  $V^k$ , sirve como espacio de trabajo
- VS (100) Arreglo que contiene las sucesivas columnas de la matriz  $V^k$ , sirve como espacio de trabajo
- KS (100) Vector que se usa como espacio de trabajo - para la obtención del vector dirección
- CR (15) Arreglo que contiene en forma sucesiva las columnas de la matriz de costos
- DI (15) Vector que contiene la diferencia Capacidad de la Subestación - Demanda del sector; se usa como espacio de trabajo para la optimización del producto carga-distancia
- ARR (100) Arreglo que contiene la capacidad en MVA - que cada sector soporta después de la solución del problema
- PER (15) Pérdidas en MVA de cada una de las subestaciones
- POR (15) Porcentaje de sobrecarga en las alimentadoras
- KON (15) Arreglo que almacena los números de los sectores en los cuales existe sobrecarga

AL (15)	Número de alimentadoras de cada subestación
INA	Número del sector en el que debe ser ubicada la nueva subestación

## 7.2. PROGRAMA PRINCIPAL LODS

### 7.2.1. Propósito

El programa principal cumple dos funciones:

- Lee los datos generales del sistema en estudio tales como número de sectores, número de subestaciones y longitud de los sectores. Luego chequea que los datos sean consistentes; por ejemplo, que no se especifiquen más sectores que la capacidad del programa, que la longitud de los sectores no sea cero, etc. Si se encuentra algún error el programa imprime un mensaje apropiado para el caso y cancela el programa
- Llama a la operación a las subrutinas en el siguiente orden:
  - a) Subrutina LODS1  
Si los datos leídos en la subrutina LODS1 no tienen error se llaman a la operación a las siguientes subrutinas:
    - b) LODS2
    - c) LODS3
    - d) LODS4

- e) LODS5
- f) LODS6

Entonces termina la ejecución

El programa, además, tiene 2 alternativas para su ejecución: mediante el uso de interruptores, cuando para un sistema determinado se desea aumentar el número de subestaciones, o si se desea variar la demanda de los sectores.

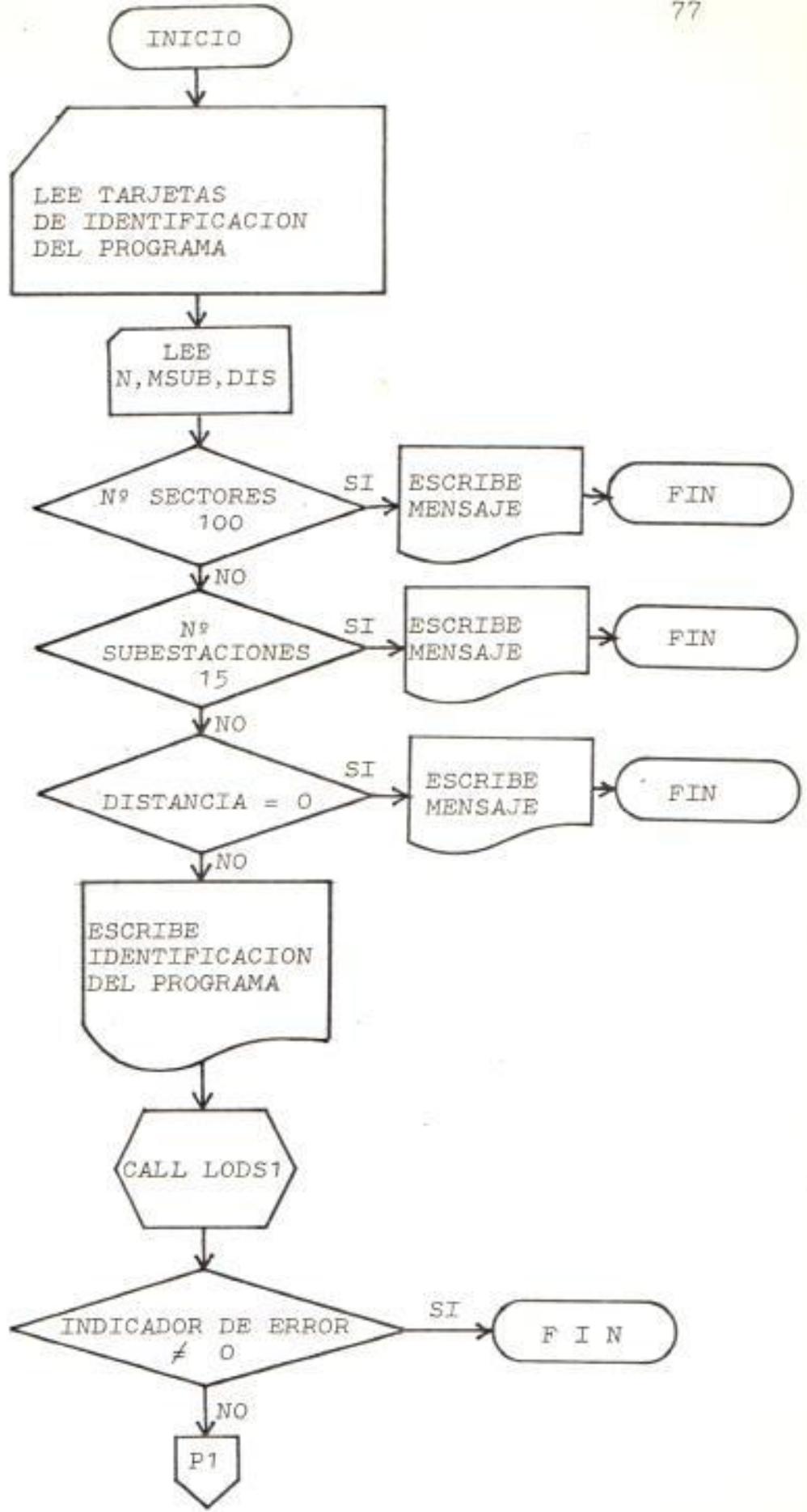
#### 7.2.2. Formatos de lectura de datos

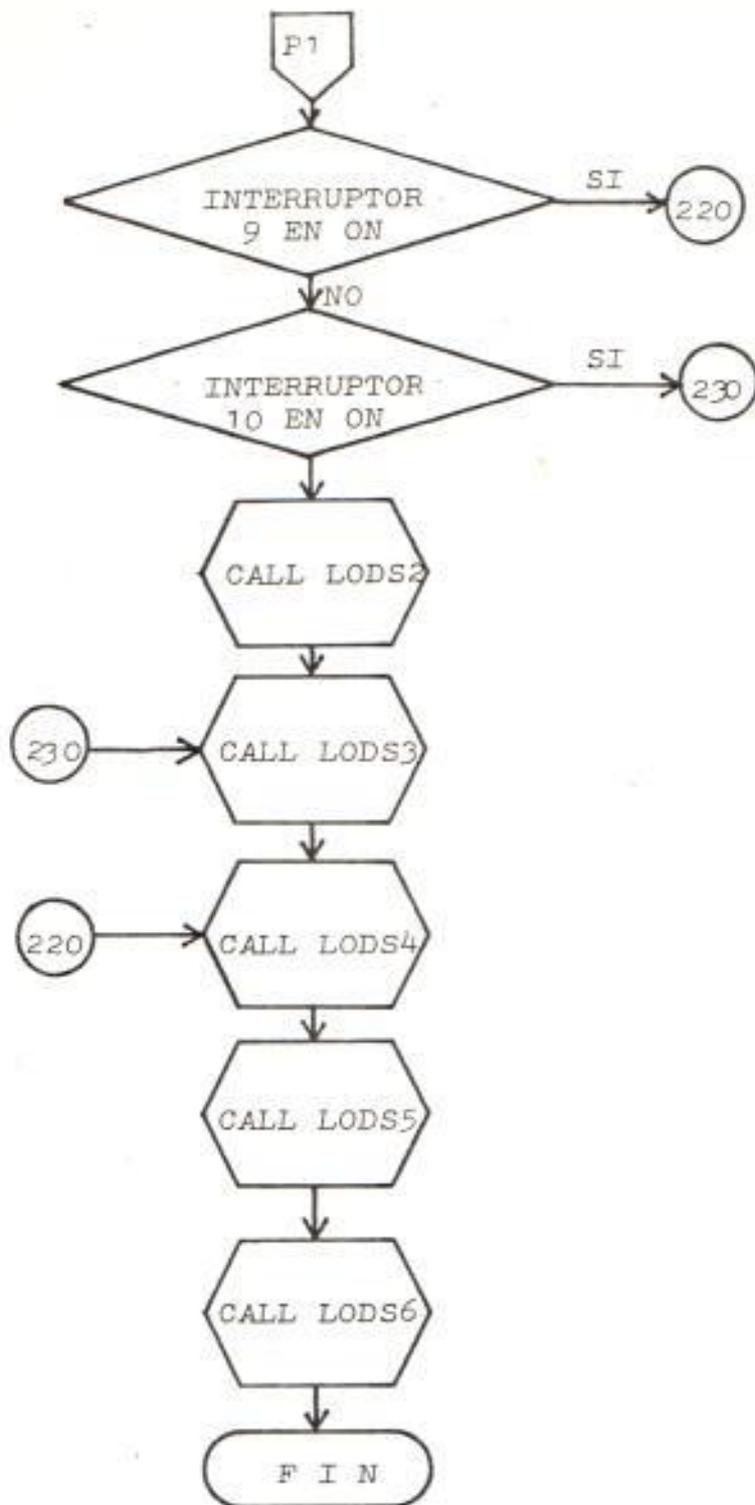
El programa principal lee 3 tarjetas de datos a continuación se describe las variables y los correspondientes formatos para cada una de estas 3 tarjetas.

Tarjeta número:	Variable:	Columnas:	Formato:
=====			
1	TT1	1 - 60	15A4
<hr/>			
2	TT2	1 - 60	15A4
<hr/>			
3	N	1 - 3	I3
	MSUB	4 - 6	I3
	DIS	7 - 15	F9.2
<hr/>			

### 7.2.3. Diagrama de Flujo

En las páginas siguientes se muestra el diagrama de flujo simplificado del programa principal.





## 7.3. SUBROUTINA LODS1

### 7.3.1. Propósito

La subrutina LODS1 tiene como propósitos:

- Leer los datos correspondientes a la configuración del gráfico del sistema, chequear si esos datos son consistentes y formar la matriz V de valores asociados a la gráfica.
- Leer los datos correspondientes a cada uno de los sectores del sistema como su demanda. I si es un sector con una subestación, la capacidad de la subestación, el límite térmico de las alimentadoras de la misma, la constante de pérdidas de estas y el número de alimentadoras. Se chequea también la consistencia de los datos.

Una vez que todos los datos de los sectores han sido leídos y si no hay error el programa hace el indicador de error IERR = 0, o 1 si lo hay; transfiriéndolo luego por medio del área COMMON al programa principal.

### 7.3.2. Formatos de lectura de datos

En el primer grupo de datos la subrutina LODS1 lee el número de tarjetas necesarias para la descripción del gráfico del sistema. Cada una de estas tarjetas contiene

las variables que se detallan a continuación:

Variable:	Columnas:	Formato:
=====		
I	1-3	I3
J	4-6	I3
D	7-16	F10.2

---

Al final de este grupo de datos se lee el segundo grupo que consta de un mínimo de tarjetas igual al número de sectores del sistema. Las variables y sus formatos se describen inmediatamente.

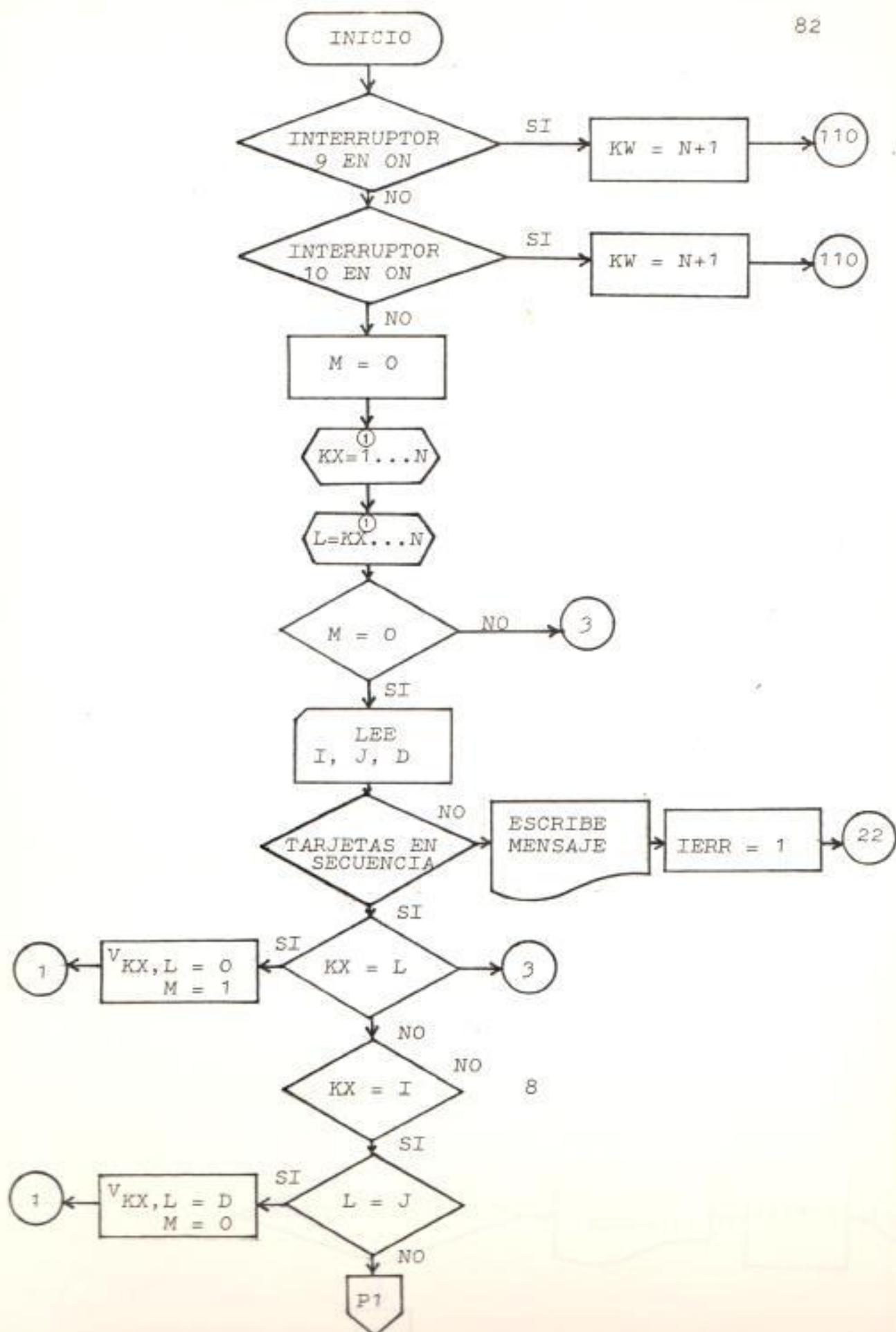
Variable:	Columnas:	Formato:
=====		
I	1-3	I3
NOM	4-11	4A2
J	12-14	I3
A1	15-20	F6.2
BJ(KX)	21-26	F6.2
PJ1	27-32	F6.2
TC1	33-38	F6.2
IAL1	39-41	I3

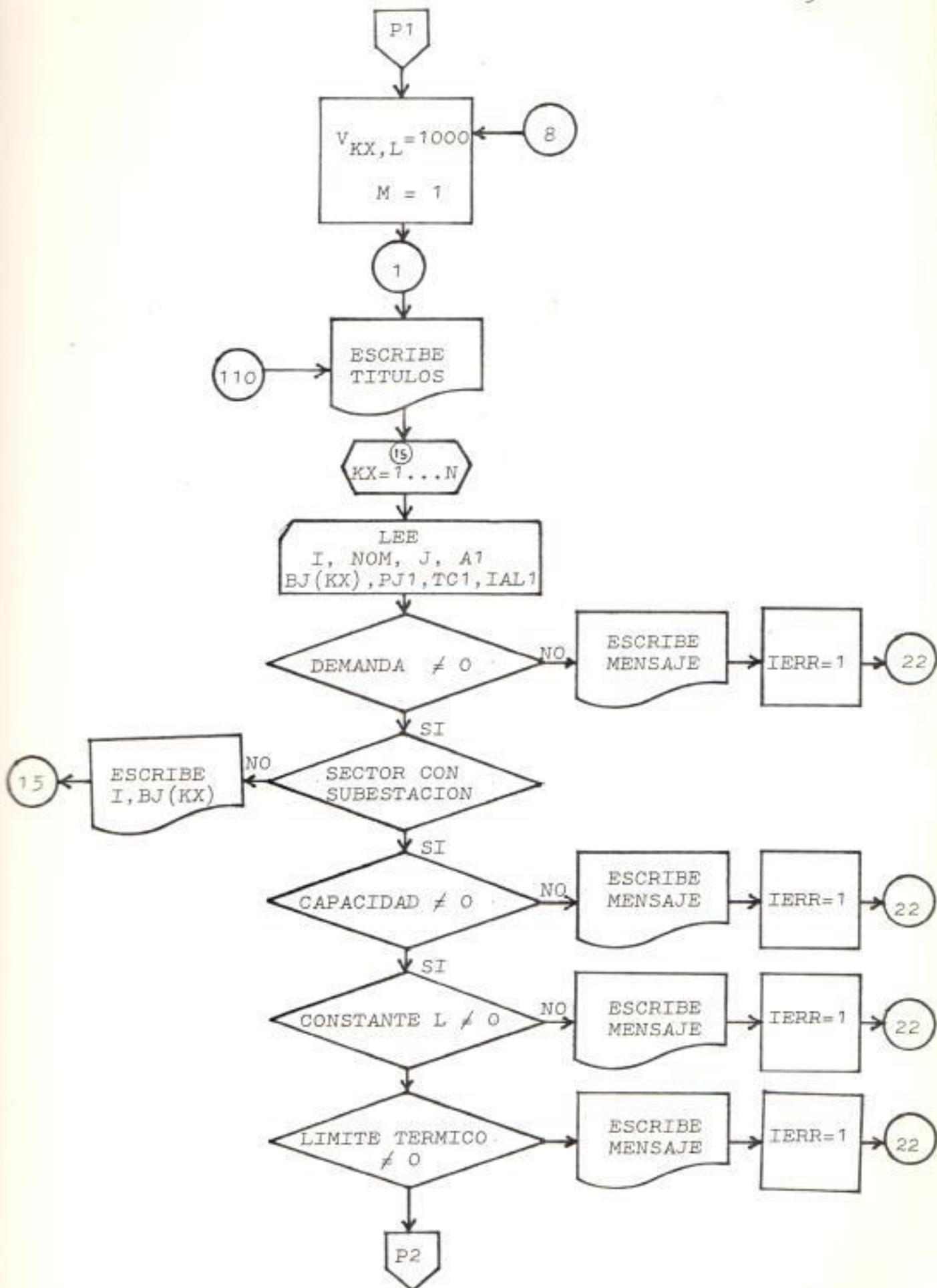
---

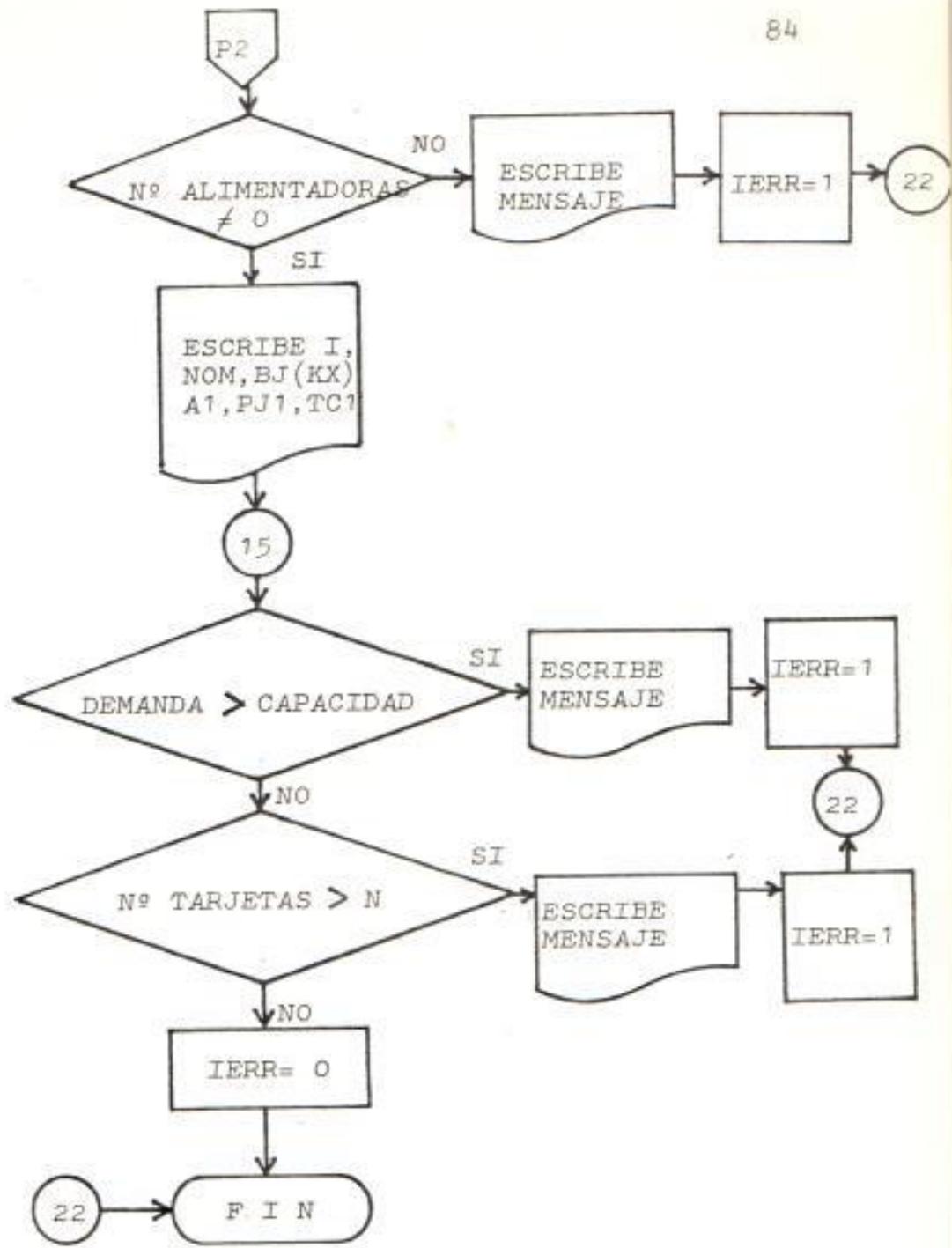
Las variables subindicadas están señaladas por el subíndice KX que toma valores entre 1 y el número de sectores leído en el programa principal.

### 7.3.3. Diagrama de Flujo

Inmediatamente se muestra el diagrama de flujo de la subrutina LODS1







## 7.4. SUBROUTINA LODS2

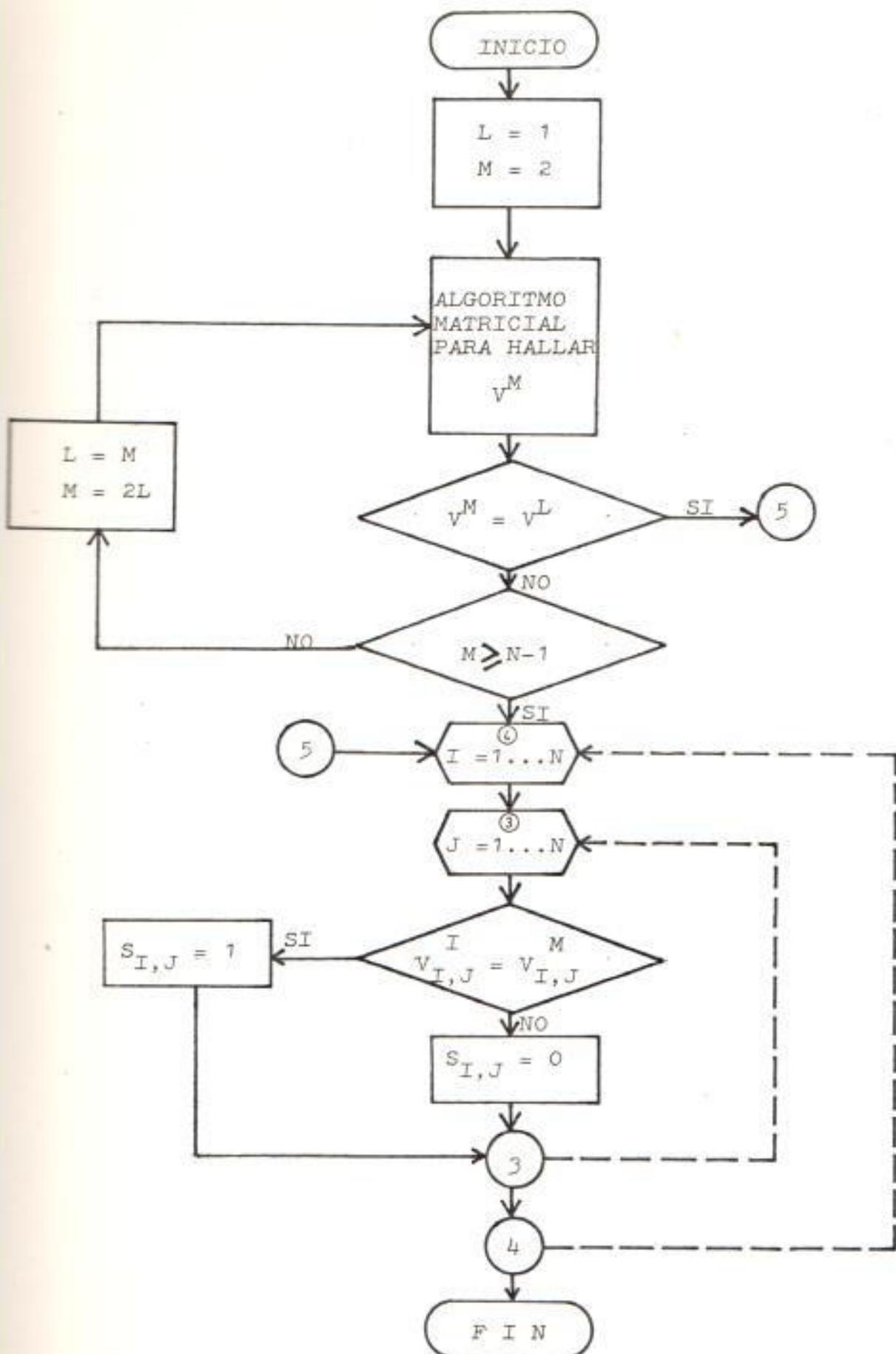
### 7.4.1. Propósito

La subrutina LODS2 tiene como propósito:

- Calcular la matriz  $V$  de distancias de valor mínimo utilizando el algoritmo matricial descrito en el Capítulo IV.
- Hallar la matriz  $S$  de arcos no modificados, comparando la matriz  $V$  de distancias de valor mínimo con la matriz de valores asociados a la gráfica del problema.

### 7.4.2. Diagrama de Flujo

En el esquema siguiente se muestra el diagrama de flujo simplificado de esta subrutina.



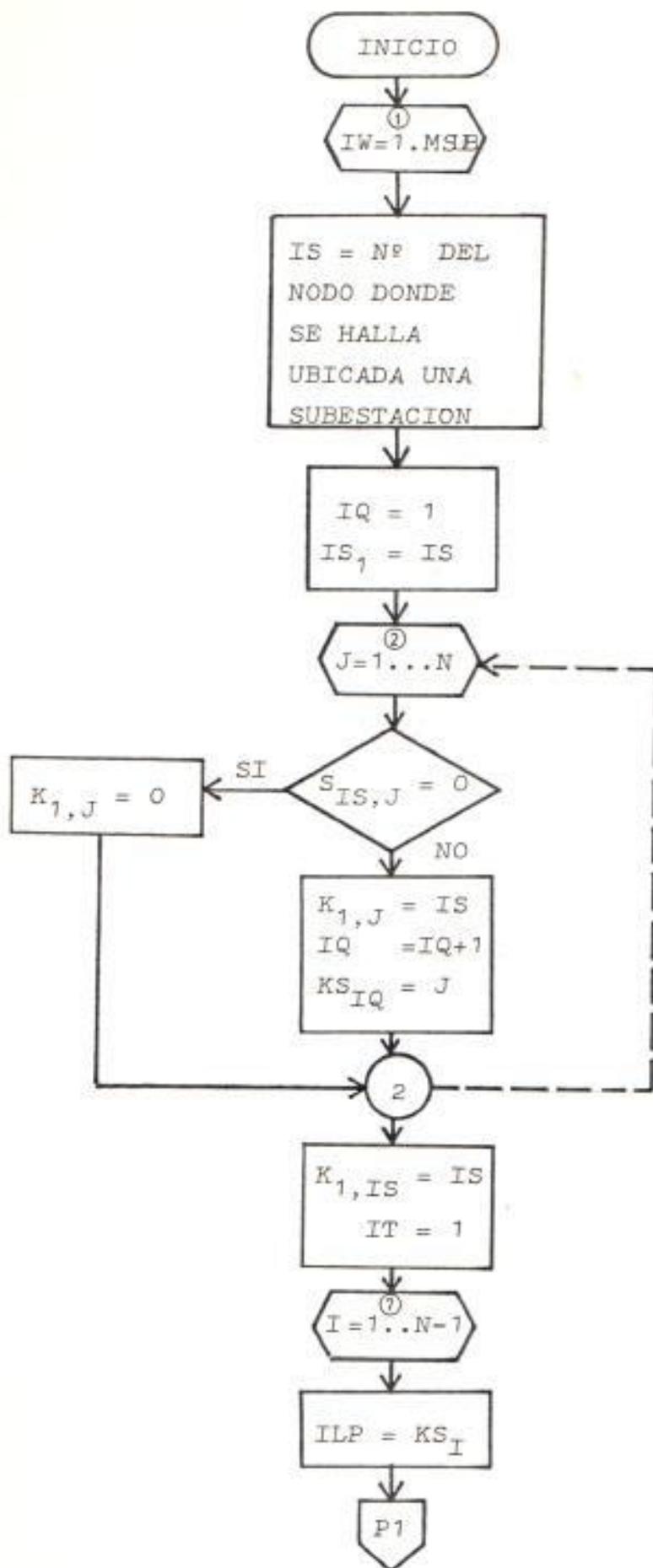
## 7.5. SUBROUTINA LODS3

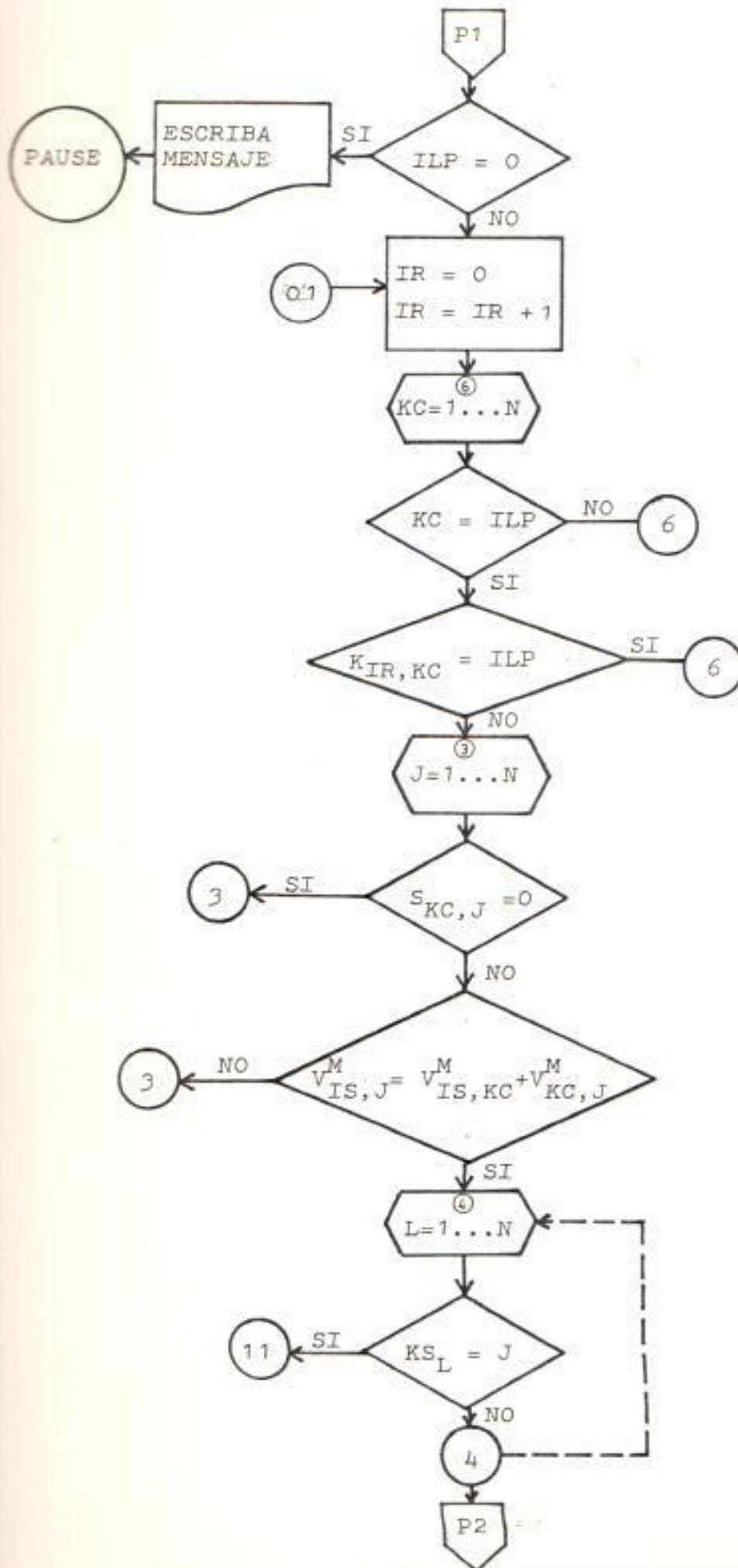
### 7.5.1. Propósito

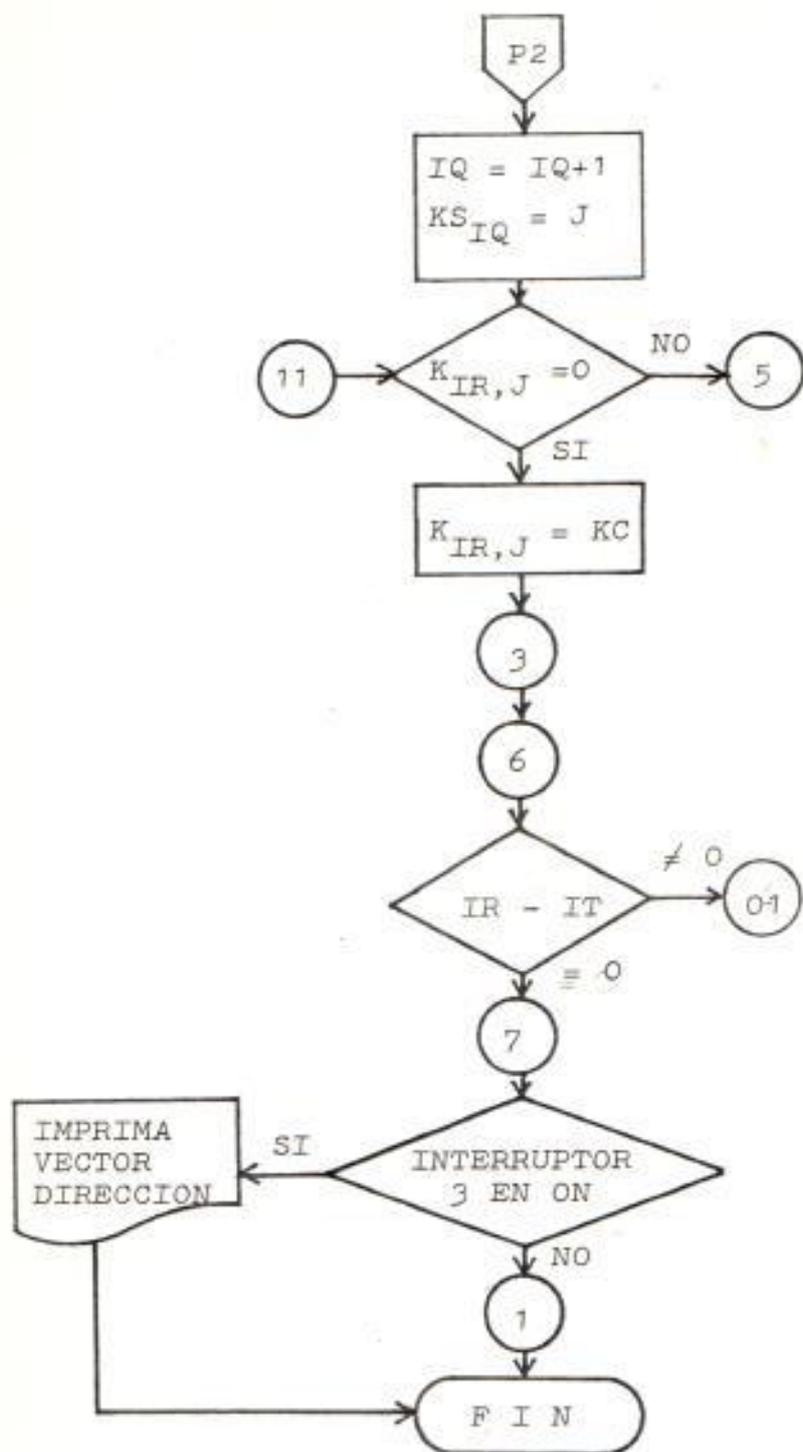
El propósito de la subrutina LODS3 es encontrar el vector dirección que fue definido en el Capítulo V para los nodos en donde se halla ubicada una determinada subestación. Para este fin utiliza un algoritmo que emplea las matrices  $V^N$  y S. Además, si se desea se imprime el vector dirección.

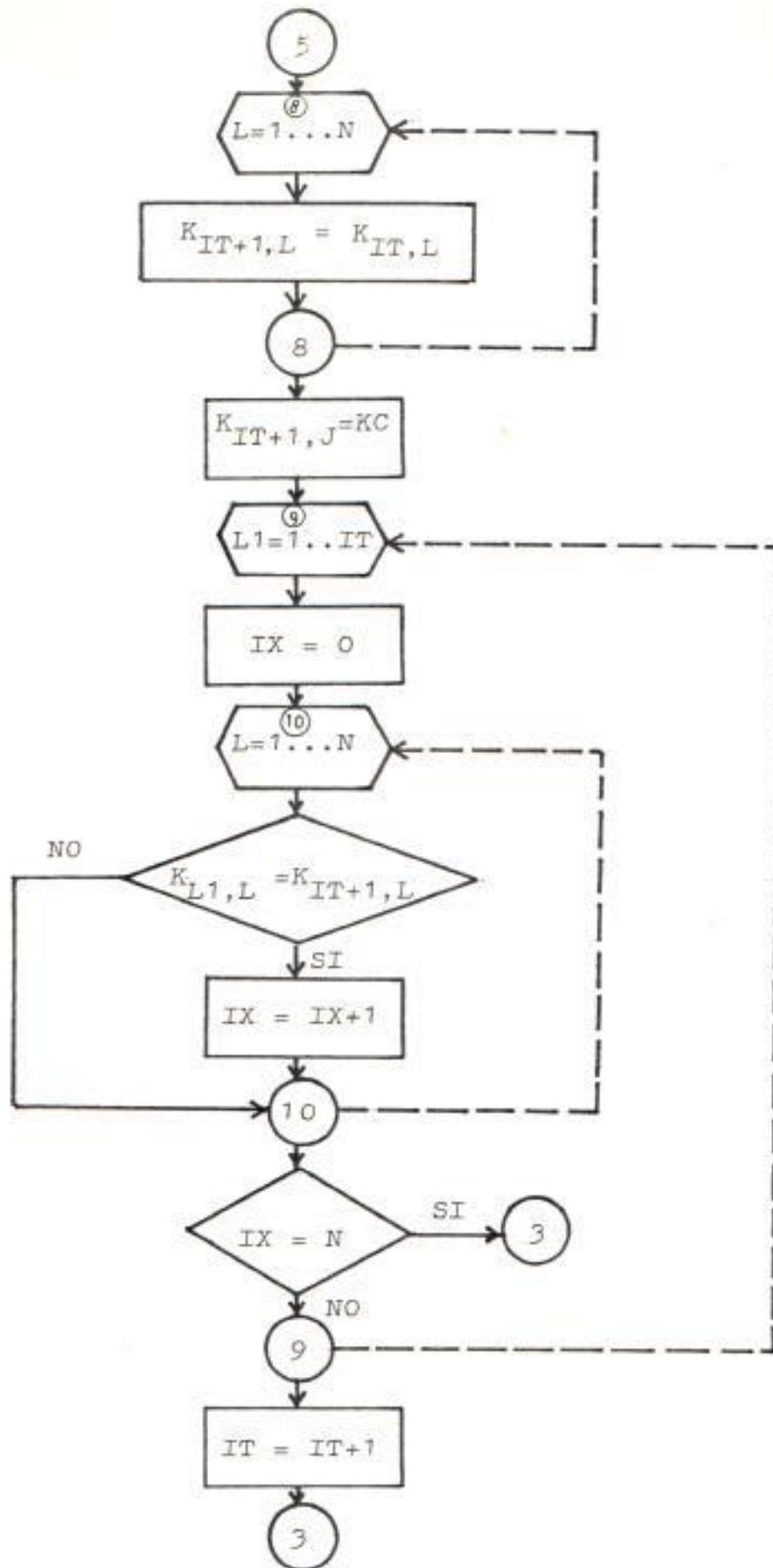
### 7.5.2. Diagrama de Flujo

El diagrama de flujo detallado de esta subrutina se muestra a continuación.









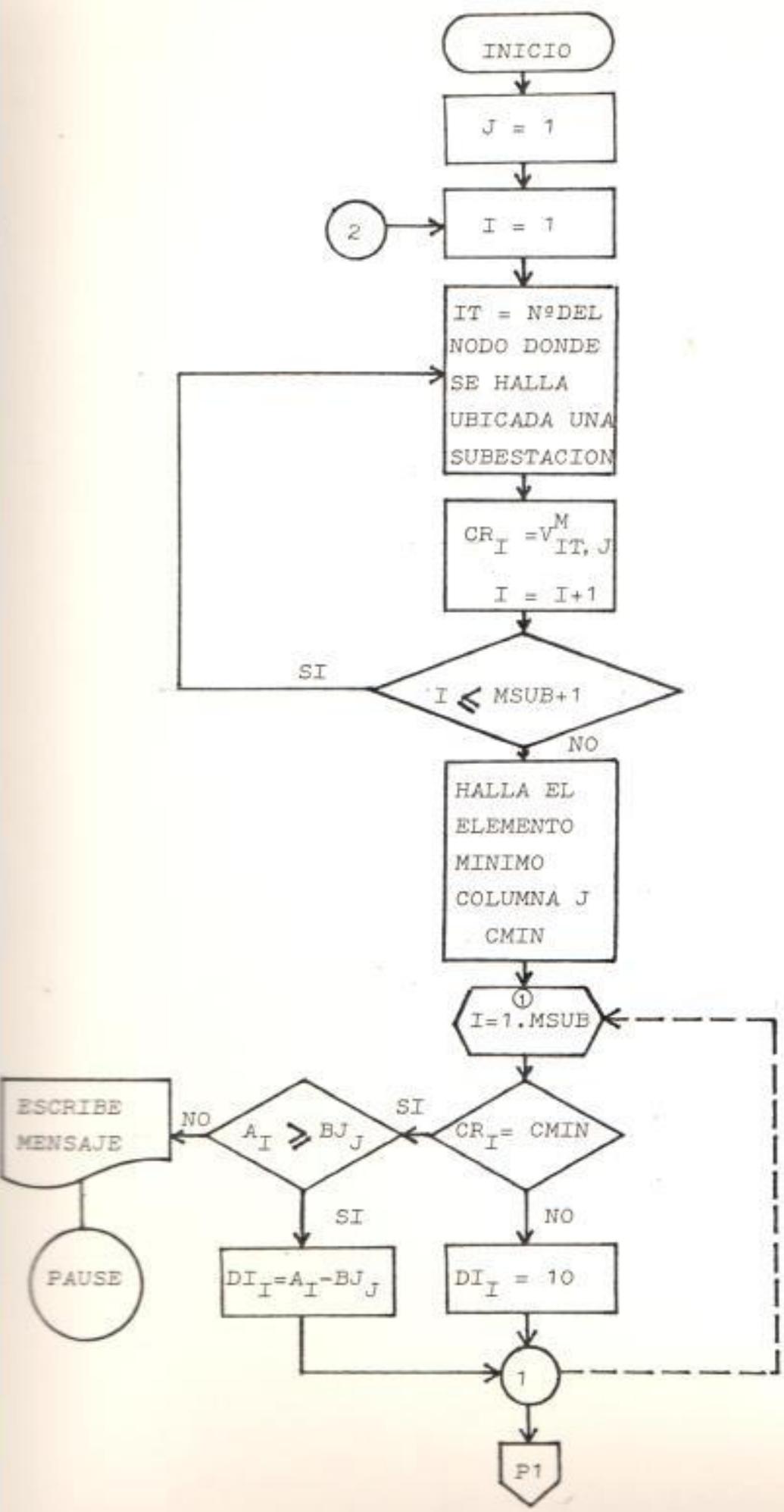
## 7.6. SUBROUTINA LODS4

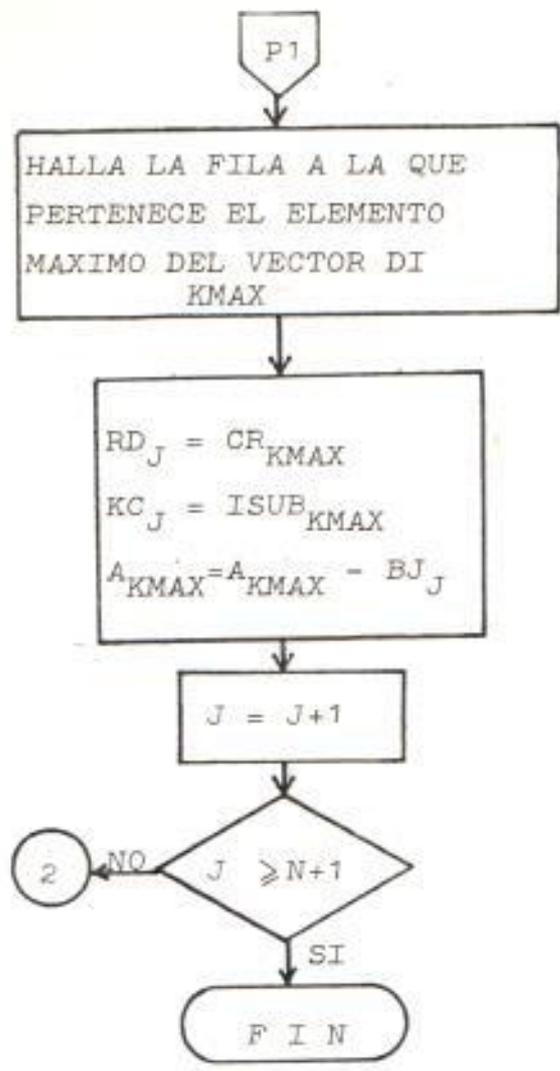
### 7.6.1. Propósito

La subrutina LODS4 tiene como propósito determinar las áreas de servicio de las subestaciones del sistema. Para este fin utiliza el algoritmo de la columna mínima para optimizar el producto carga-distancia. Como resultado se obtienen 2 vectores: el vector RD, en el que constan las distancias mínimas y el vector KC, en donde se obtiene el número de la subestación asignada para cada sector.

### 7.6.2. Diagrama de Flujo

Inmediatamente consta el diagrama de flujo para esta subrutina.





## 7.7. SUBROUTINA LODS5

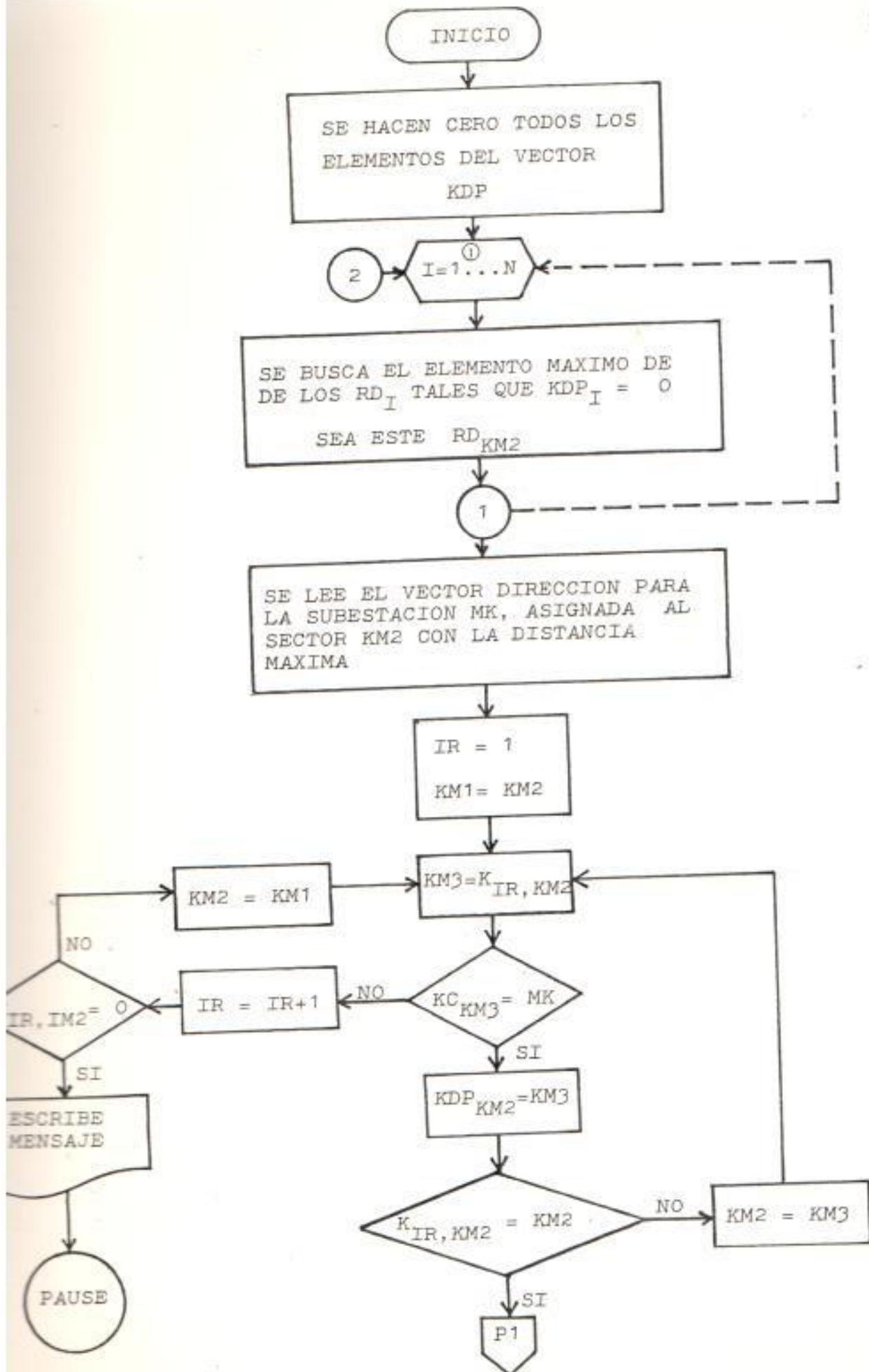
### 7.7.1. Propósito

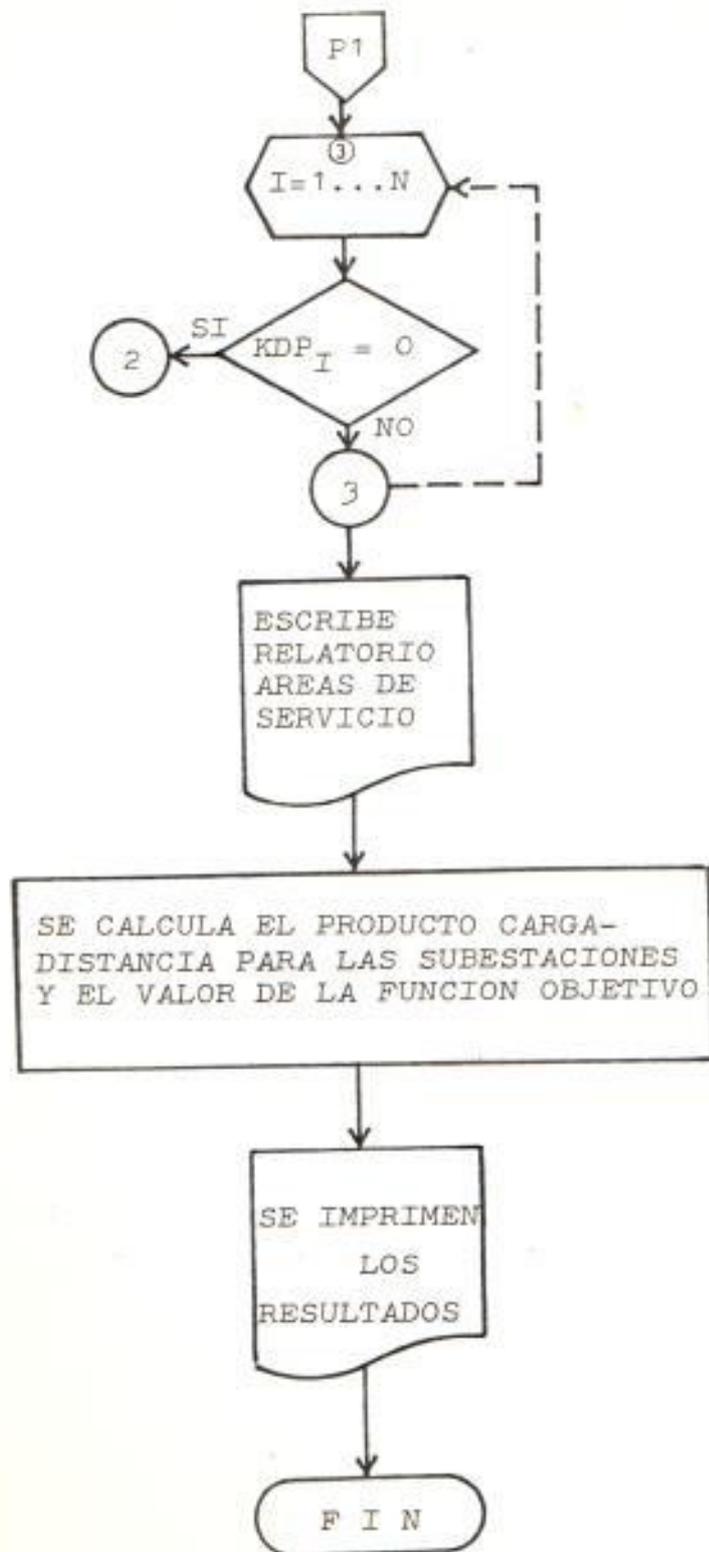
Esta subrutina tiene como propósitos:

- Realizar una inspección de la radialidad de la solución obtenida, que tiene como consecuencia la obtención del vector KDP, cuyos elementos constituyen el vector dirección para el sistema.
- Imprimir el segundo relatorio de las áreas de servicio que entrega el programa, en donde constan: las distancias mínimas de cada sector a su subestación; la subestación asignada a cada uno de ellos y el vector dirección para el sistema.
- Por último, calcula el producto carga-distancia para cada subestación, así como el valor de la función objetivo. Imprimiendo además la primera parte del tercer relatorio del programa, en donde se indican ciertos datos de evaluación como son los calculados anteriormente.

### 7.7.2. Diagrama de Flujo

El diagrama de bloques de esta subrutina sigue inmediatamente.





## 7.8. SUBROUTINA LODS6

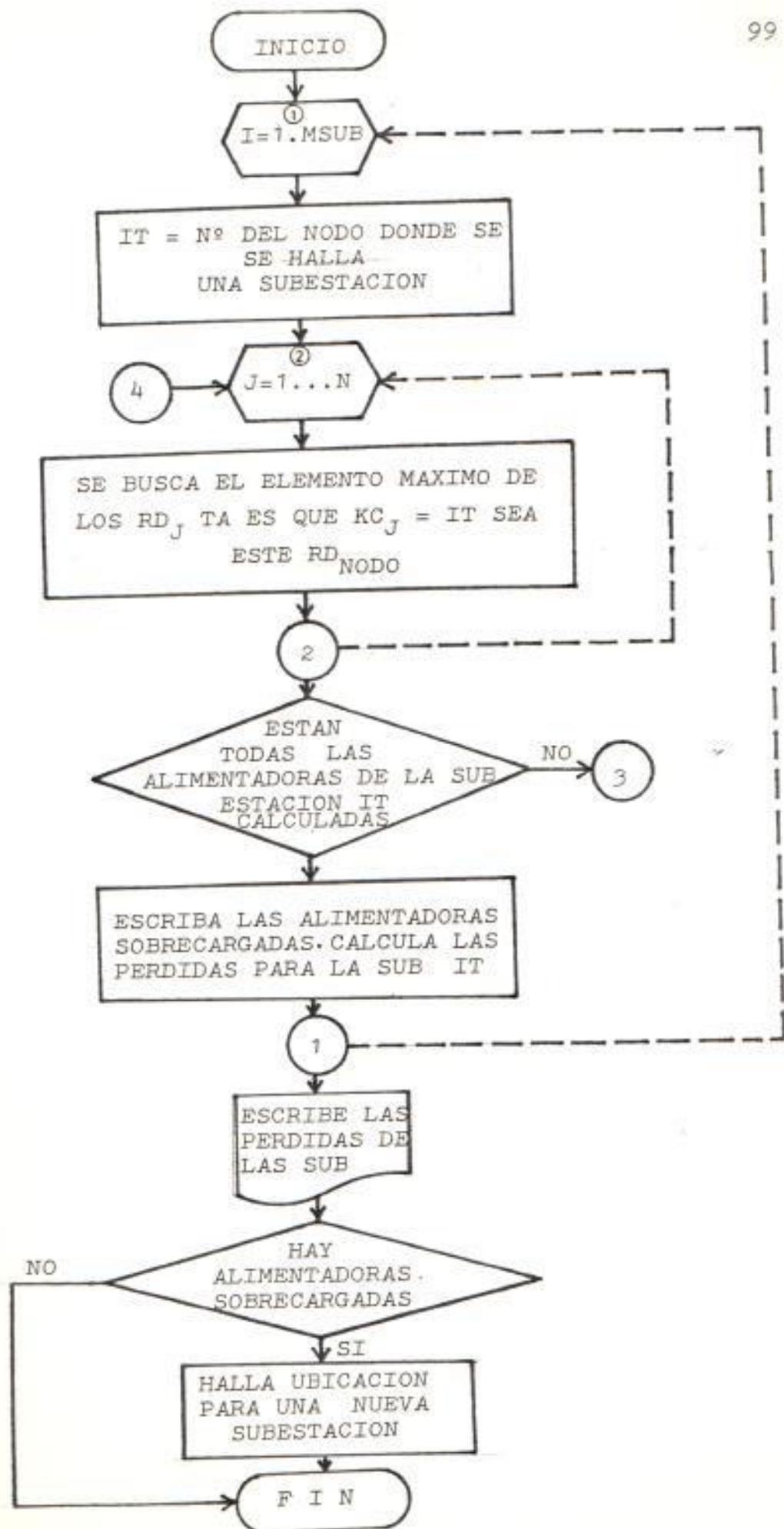
### 7.8.1. Propósitos

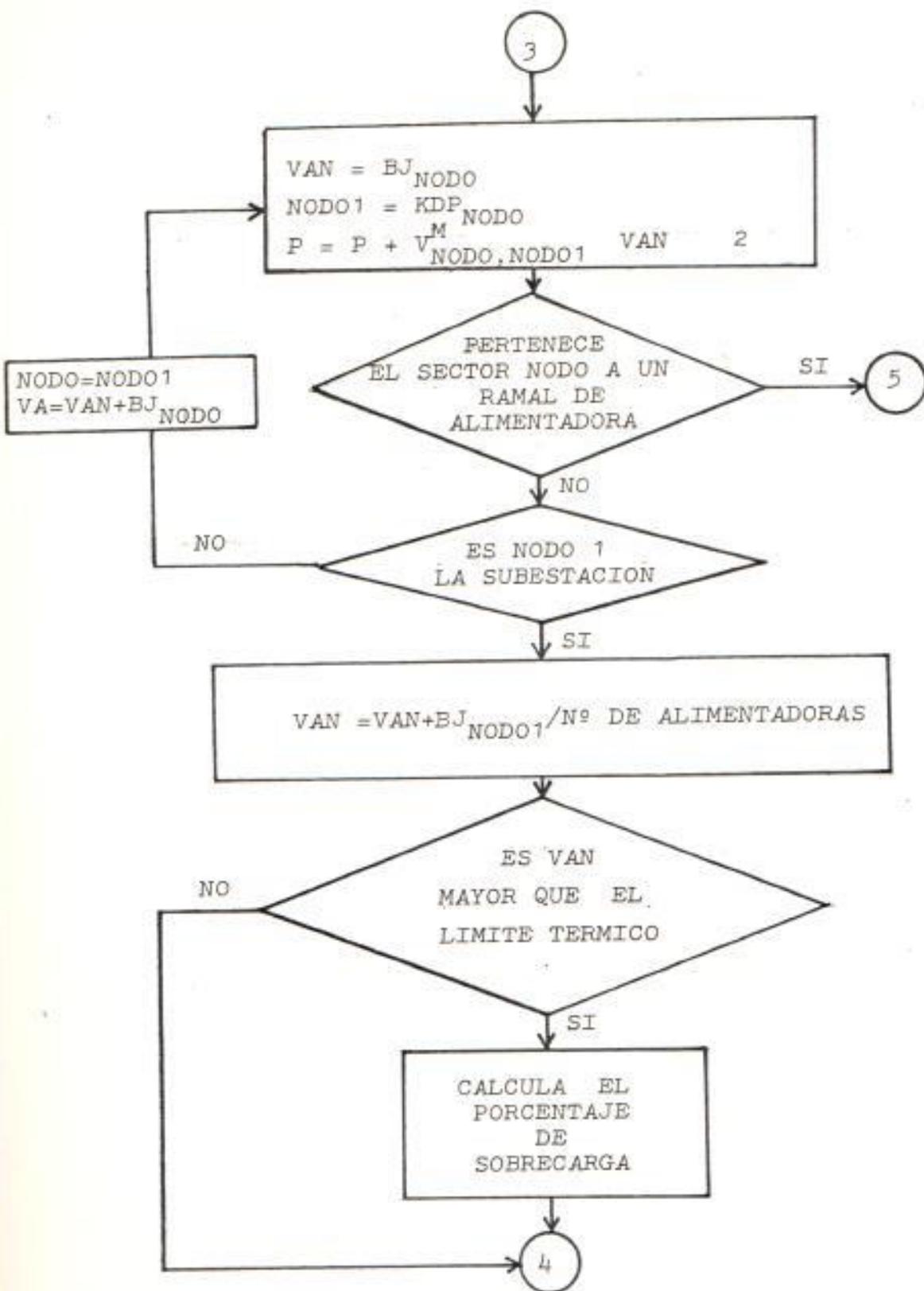
La subrutina LODS6 tiene los siguientes propósitos:

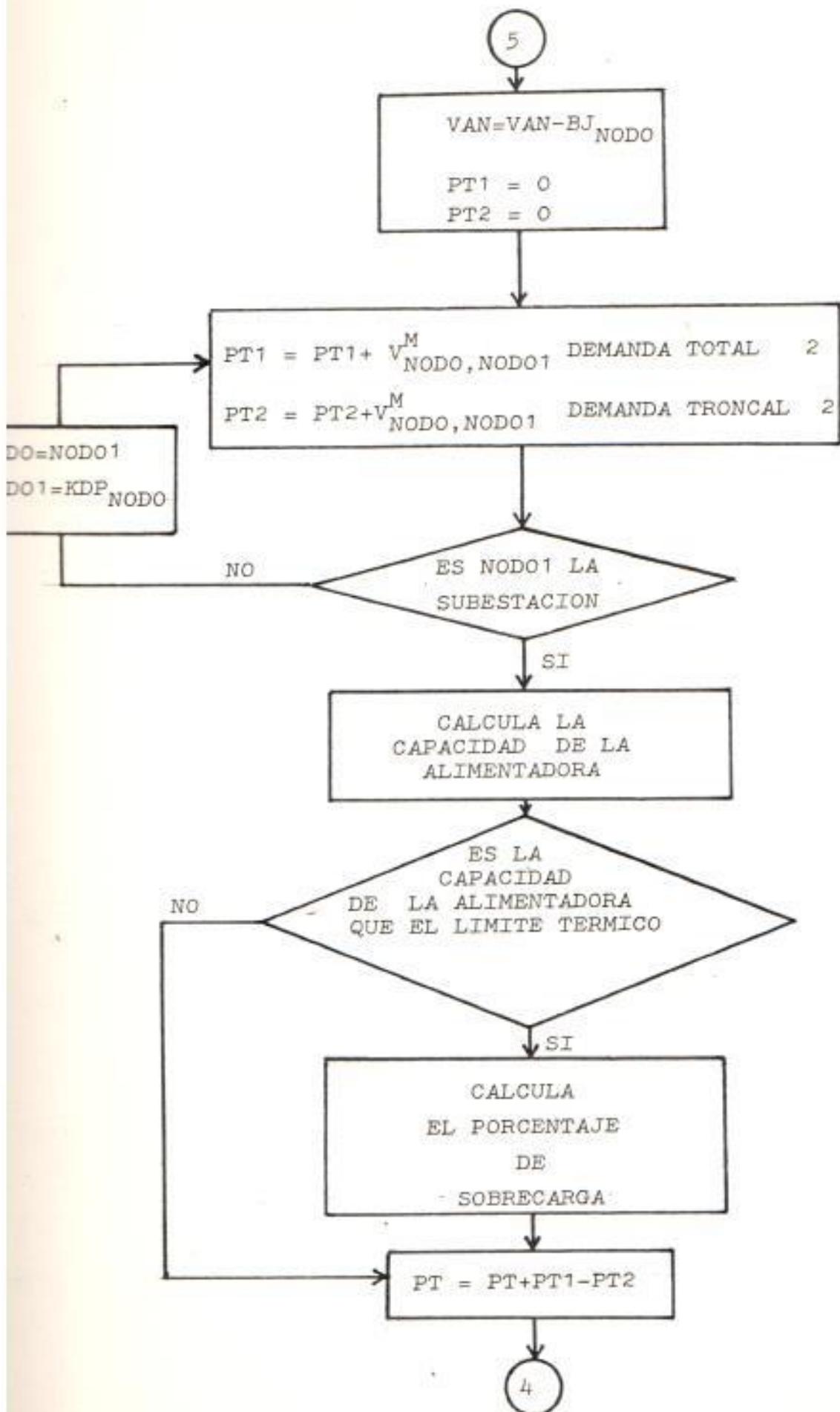
- Hallar las pérdidas de las subestaciones del sistema.
- Inspeccionar el límite térmico de las alimentadoras de cada una de las subestaciones.
- Imprimir los resultados de los cálculos anteriores.
- Hallar la posición para una nueva subestación si el límite térmico de alguna de las alimentadoras ha sido sobrepasado así como imprimir el resultado.

### 7.8.2. Diagrama de Flujo

El diagrama de flujo de la subrutina LODS6 consta inmediatamente.





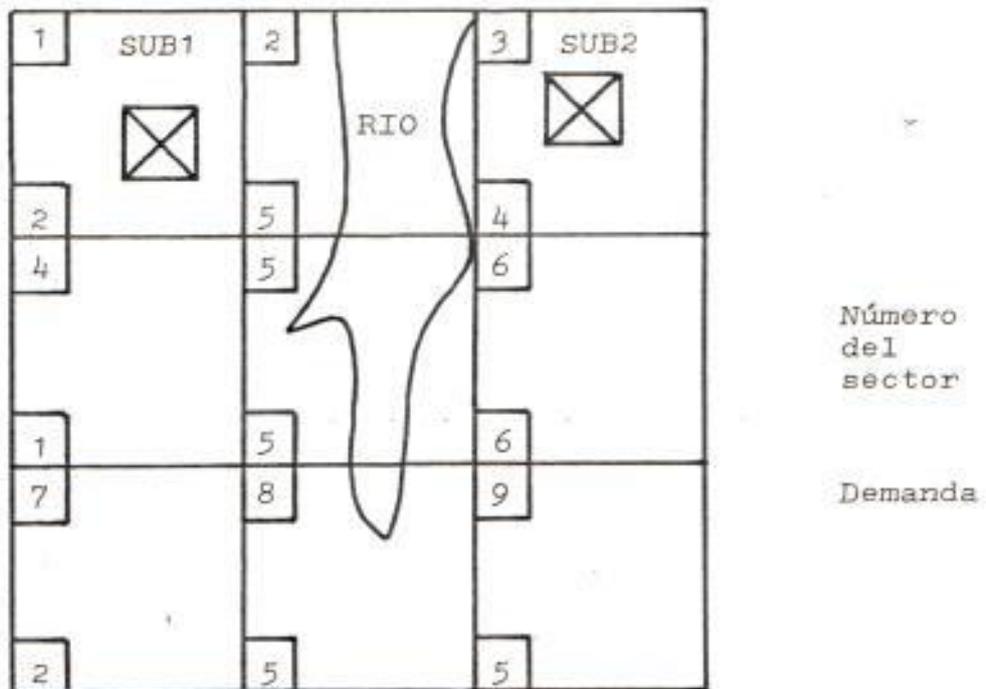


## CAPITULO 8

### EJEMPLOS DE APLICACION

#### 8.1. SISTEMA TEORICO

Para ilustrar ciertas consideraciones que se asumen en la aplicación del programa se ha escogido el ejemplo citado en la referencia. Se trata de un pequeño sistema de 9 sectores y 2 subestaciones. Su disposición física se muestra en la Fig. 8.1.



*Fig. 8.1. Area geográfica del ejemplo*

Donde se muestra además el número asignado a cada sector y la demanda en MVA de cada uno de ellos.

Este sistema puede ser representado por la gráfica de

la Fig. 8.2., que como se puede observar es una gráfica simétrica, es decir, que toda pareja de vértices adyacentes están siempre unidos por dos arcos de orientaciones diferentes.

Los arcos uniendo sectores adyacentes en forma horizontal o vertical tienen un valor de 1.0 y todos los arcos diagonales el de 1.4. Cuando no hay posibilidad de interconexión porque existe un obstáculo físico entre 2 sectores se asigna una distancia infinita en este caso-1000.0

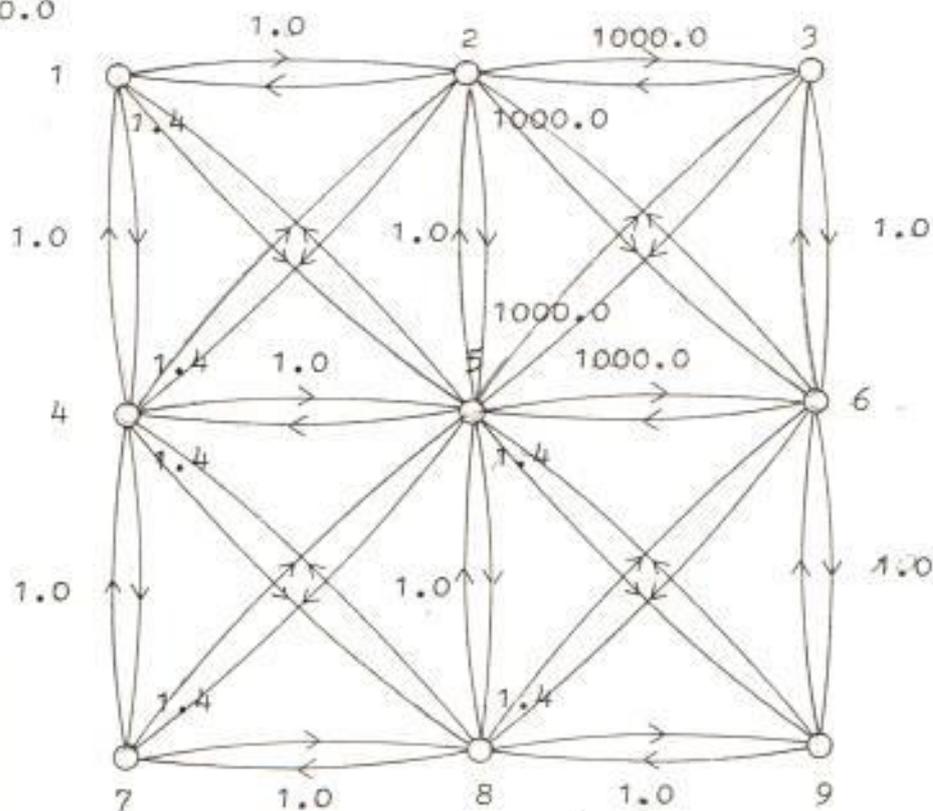


Fig. 8.2 Gráfico equivalente del sistema del ejemplo

De esta manera la matriz de valores asociados a la gráfica será:

	$v_1^I$	$v_2^I$	$v_3^I$	$v_4^I$	$v_5^I$	$v_6^I$	$v_7^I$	$v_8^I$	$v_9^I$
$v_1^I$	0.0	1.0	100.0	1.0	1.4	100.0	100.0	100.0	100.0
$v_2^I$	1.0	-0.0	100.0	1.4	-1.0	100.0	100.0	100.0	100.0
$v_3^I$	100.0	100.0	0.0	100.0	100.0	1.0	100.0	100.0	100.0
$v_4^I$	1.0	1.4	100.0	0.0	1.0	100.0	1.0	1.4	100.0
$v_5^I$	1.4	1.0	100.0	1.0	0.0	100.0	1.4	1.0	1.4
$v_6^I$	100.0	100.0	1.0	100.0	100.0	0.0	100.0	1.4	1.0
$v_7^I$	100.0	100.0	100.0	1.0	1.4	100.0	0.0	1.0	100.0
$v_8^I$	100.0	100.0	100.0	1.4	1.0	1.4	1.0	0.0	1.0
$v_9^I$	100.0	100.0	100.0	100.0	1.4	1.0	100.0	1.0	0.0

Como puede verse se trata de una matriz simétrica. Las matrices de caminos de valor óptimo y de arcos de valor no modificado para el sistema serán respectivamente:

$V_1^M \quad V_2^M \quad V_3^M \quad V_4^M \quad V_5^M \quad V_6^M \quad V_7^M \quad V_8^M \quad V_9^M$ 

$V_1^M$	0.0	1.0	4.8	1.0	1.4	3.8	2.0	2.4	2.8
$V_2^M$	1.0	0.0	4.4	1.4	1.0	3.4	2.4	2.0	2.4
$V_3^M$	4.8	4.4	0.0	3.8	3.4	1.0	3.4	2.4	2.0
$V_4^M$	1.0	1.4	3.8	0.0	1.0	2.8	1.0	1.4	2.4
$V_5^M$	1.4	1.0	3.4	1.0	0.0	2.4	1.4	1.0	1.4
$V_6^M$	3.8	3.4	1.0	2.8	2.4	0.0	2.4	1.4	1.0
$V_7^M$	2.0	2.4	3.4	1.0	1.4	2.4	0.0	1.0	2.0
$V_8^M$	2.4	2.0	2.4	1.4	1.0	1.4	1.0	0.0	1.0
$V_9^M$	2.8	2.4	2.0	2.4	1.4	1.0	2.0	1.0	0.0

	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$s_5$	$s_6$	$s_7$	$s_8$	$s_9$
$s_1$	0	1	0	1	1	0	0	0	0
$s_2$	1	0	0	1	1	0	0	0	0
$s_3$	0	0	0	0	0	1	0	0	0
$s_4$	1	1	0	0	1	0	1	1	0
$S = s_5$	1	1	0	1	0	0	1	1	1
$s_6$	0	0	1	0	0	0	0	1	1
$s_7$	0	0	0	1	1	0	0	1	0
$s_8$	0	0	0	1	1	1	1	0	1
$s_9$	0	0	0	0	1	1	0	1	0

Como se esperaba estas matrices también son simétricas y son generadas utilizando el algoritmo matricial descrito anteriormente. Los vectores dirección para los vértices 1 y 3 con subestaciones se muestran inmediatamente:

Para el vértice 1

$$K^1 = \begin{matrix} K_1^1 & K_2^1 & K_3^1 & K_4^1 & K_5^1 & K_6^1 & K_7^1 & K_8^1 & K_9^1 \\ \boxed{1} & \boxed{1} & \boxed{6} & \boxed{1} & \boxed{1} & \boxed{8} & \boxed{4} & \boxed{4} & \boxed{5} \end{matrix}$$

y para el vértice 3

$$K^3 = \begin{matrix} K_1^3 & K_2^3 & K_3^3 & K_4^3 & K_5^3 & K_6^3 & K_7^3 & K_8^3 & K_9^3 \\ \boxed{4} & \boxed{5} & \boxed{3} & \boxed{8} & \boxed{8} & \boxed{3} & \boxed{8} & \boxed{6} & \boxed{6} \end{matrix}$$

Estos vectores son generados por el algoritmo descrito en el Capítulo V.

La minimización del producto carga-distancia nos da como resultado la siguiente configuración del sistema. (Fig. 8.3.)

Esta configuración está descrita en el vector KDP, el cual es para este caso.

$$KDP = \begin{matrix} kdp_1 & kdp_2 & kdp_3 & kdp_4 & kdp_5 & kdp_6 & kdp_7 & kdp_8 & kdp_9 \\ \boxed{1} & \boxed{2} & \boxed{3} & \boxed{1} & \boxed{1} & \boxed{3} & \boxed{4} & \boxed{4} & \boxed{6} \end{matrix}$$

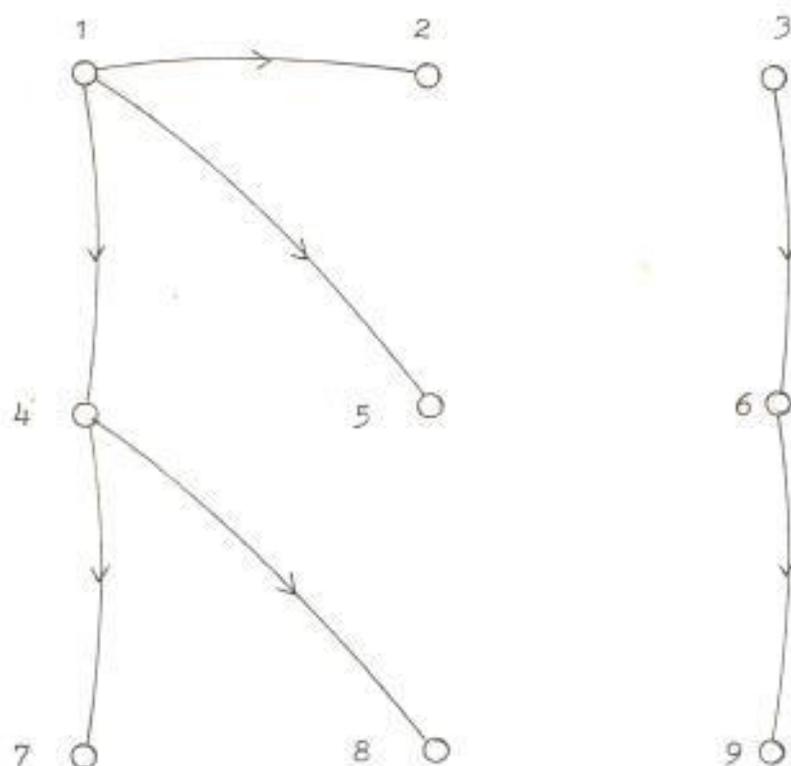


Fig. 8.3 Configuración resultante del sistema

El producto carga-distancia para esta configuración es 28 para la subestación 1 y 16 para la subestación 3, siendo el valor de la función objetivo 44, valor que concuerda con el de la referencia para el mismo sistema.

Si, además, consideramos un bajo límite térmico de manera que el sistema se sobrecargue el sector para la nueva subestación será el 8.

## 8.2. SISTEMA GUAYAQUIL

Se ha escogido el Sistema Guayaquil para aplicar el

procedimiento descrito para la ubicación y determinación de la capacidad óptima de subestaciones de distribución, debido a la peculiar ubicación de sus subestaciones, así como por su crecimiento acelerado que exigirá la creación de nuevas subestaciones en el futuro.

En esta parte del capítulo, en primer lugar, se describirá el Sistema actual que nos servirá de base para un estudio posterior, la configuración geográfica de la ciudad que nos ha permitido hacer ciertas consideraciones para la aplicación del programa; se describirá también las consideraciones hechas para la obtención de los datos bases de demanda, para finalmente describir la forma de aplicación del programa en un período de 10 años, presentando los resultados obtenidos.

#### 8.2.1. Descripción del Sistema

##### 8.2.1.1. Niveles Nominales de Tensión

El Sistema Guayaquil utiliza dos niveles de tensión para distribuir la energía: 13.8 KV y 4.16 KV, con niveles básicos de aislamiento, 90 KV y 65 KV respectivamente. En ambos casos la conexión es Y con neutro sólido y puesto a tierra. El tipo de sistema de distribución es radial.

##### 8.2.1.2 Generación

El Sistema recibe energía de 2 centros de generación. La Planta Guayaquil, ubicada al centro-este de la ciudad con una capacidad de 43.5 MW; y la Planta Estero-Salado, ubicada en la zona El Salitral, en el km 10 de la vía a la Costa; con una capacidad propia de 135 más 99 MW instalados por Inecel.

#### 8.2.1.3. Subtransmisión

El Sistema de subtransmisión consiste de un anillo de 69 KV que interconecta las plantas de Guayaquil y Estero Salado, y entrega energía a 8 subestaciones de distribución.

La línea de subtransmisión tiene soportes metálicos de madera y hormigón de 55 a 60 piés. Los conductores están dispuestos sobre aisladores tipo poste con un calibre 336.4 MCM de aluminio con alma de acero ACSR 18/1 tipo Merlin; tienen además hilo de guardia.

#### 8.2.1.4. Subestaciones de Distribución y Alimentadoras

Las características de las subestaciones y de sus respectivas alimentadoras constan en la Tabla 8.1.

#### 8.2.2. Configuración geográfica de la Ciudad

Guayaquil se encuentra a orillas de la Ría formada-

TABLA 8.1

SUBESTACION	CAPACIDAD DE TRANSFORMADOR	ALIMENTADORA	CAPACIDAD DE RECONECTADOR O BREAKER	CAPACIDAD DE ALIMENTADOR	CARGA MW+MVAR ACTUAL	MVAR		LONGITUD KM
						FIJO	INSTALADO DESCON.	
BOYACA	T-2	CORDOVA	560 A	380 A	5.0+J2.1	.6	1.2	1.5
	12/16 MVA	PANAMA		380 A	2.0+J .8	.6	.6	1.5
		LAS PEÑAS		380 A	4.3+J1.7	1.2	.6	2.1
EST. SALADO	T-3	LA PUNTILLA		310 A	1.6+J .5	.6	1.2	2.2
	12/16 MVA	PADRE SOLANO		500 A	5.3+J1.7	.9	---	2.8
		SAN EDUARDO	1200 A	380 A	5.5+J2.4	---	---	3.2
PLANTA A VAPOR GUAYAQUIL		CERRO AZUL			5.4+J2.0	1.2	---	5.7
		LIZARDO GARCIA	1200 A		7.0+J1.8	1.2	---	3.5
		EL ORO			5.2+J1.4	1.2	.6	2.4

SUBESTACION	CAPACIDAD DE TRANSFORMADOR	ALIMENTADORA	CAPACIDAD DE RECONECTADOR O BREAKER	CAPACIDAD DE ALIMENTADOR	CARGA MW+MVAR ACTUAL	MVAR		LONGITUD KM
						FIJO	INSTALADO DESCON.	
PLANTA A VAPOR GUAYAQUIL		PORTETE			3.8+J1.0	1.2	1.2	2.3
		ESMERALDAS			4.9+J1.2	.6	1.2	3.4
		P. MONCAYO			5.8+J1.5	.9	1.8	2.4
EL GUASMO	12/16 MVA	ALFARO		310 A	3.8+J1.0	.9	.6	2.3
		ACERIAS	1200 A	380 A	1.2+J .5	---	---	1.2
		25 DE JULIO			5.8+J1.8	.9	1.8	8.0
LA TORRE	12/16 MVA	CUBA			6.6+J2.4	1.2	1.2	4.5
		TORRE # 1	560 A	500 A	2.4+J .5	.6	---	3.8
		TORRE # 2			7.4+J1.8	1.2	---	4.5
		TORRE # 3			5.2+J2.4	.3	.6	6.2

TABLA 8.1

SUBESTACION	CAPACIDAD DE TRANSFORMADOR	ALIMENTADORA	CAPACIDAD DE RECONECTADOR O BREAKER	CAPACIDAD DE ALIMENTADOR	CARGA MW+MVAR ACTUAL	MVAR INSTALADO		LONGITUD KM
						FIJO	DESCON.	
LOS CEIBOS	T # 1 12/16 MVA	NORTE	1200 A	380 A	4.8+j1.4	.6	.6	3.0
		LOS CEIBOS			2.7+j .8	.6	.6	2.0
	MIRAFLORES			5.4+j1.6	1.2	1.2	9.0	
	LAS LOMAS			6.0+j1.9	1.5	.6	3.5	
MAPASINGUE	T # 2 12/16 MVA	CARLOS JULIO			5.4+j1.7	1.2	1.2	4.8
		URDESA			2.1+j .6	---	---	4.0
	MAPASINGUE # 1	560 A	500 A	1.0+j .5	---	---	0.5	
PASCUALES	8/10 MVA	MAPASINGUE # 2 #2			6.8+j3.2	1.8	.6	3.8
		PASCUALES	560 A	340 A	4.0+j1.8	1.2	.6	6.5
		LA TOMA			3.7+j1.7	.6	1.2	13.5

SUBESTACION	CAPACIDAD DE TRANSFORMADOR	ALIMENTADORA	CAPACIDAD DE RECONECTADOR O BREAKER	CAPACIDAD DE ALIMENTADOR	CARGA MW+MVAR ACTUAL	MVAR INSTALADO		LONGITUD KM
						FIJO	DESCON.	
ATARAZANA	8/10 MVA	ATARAZANA # 1	560 A	500 A	1.6+J .6	.6	---	2.0
		ATARAZANA # 2			4.6+J1.6	.6	---	2.4

124.90    15.90    133.3  
 ✓

6  
 12 7  
 2  
 38  
 20.3  
 18  
 43.3

TABLA 8.1

SUBESTACION	CAPACIDAD DE TRANSFORMADOR	ALIMENTADORA	CAPACIDAD DE RECONECTOR O BREAKER	CAPACIDAD DE ALIMENTADOR	CARGA MW+MVAR ACTUAL	MVAR $\frac{\text{INSTALADO}}{\text{FIJO} - \text{DESCON.}}$	LONGITUD KM
BOYACA	5/7 MVA	BOLIVAR	1200 A		1.8+j .5		
		9 DE OCTUBRE			1.1+j .8		
		JUAN MONTALVO			1.2+j .4		
		RUMICHACA	1200 A		1.1+j .4		
PLANTA A		SUR			1.1+j .4		
VAPOR		CHIMBORAZO			1.9+j .7		
GUAYAQUIL		PICHINCHA			1.4+j .4		
		PEDRO CARBO			1.1+j .4		
		BOYACA			.4+j .2		

por la confluencia de los ríos Daule y Babahoyo. La parte oeste y sur de la ciudad se encuentran rodeadas por un brazo de mar. Hacia la parte norte, la ciudad se encuentra dividida en dos secciones: por el Estero Salado y por los Cerros Santa Ana y el Carmen, que dejan tan solo un estrecho corredor entre la zona constituida por la parte central de la ciudad y la zona formada por urbanizaciones residenciales y una creciente zona industrial.

Tomando en cuenta estos límites naturales, para nuestro estudio se ha dividido la ciudad en las dos zonas descritas anteriormente. Considerando que, junto a estos límites, existen subestaciones el error que se cometa al hacer esta simplificación es mínimo.

De acuerdo a esto y tomando en cuenta la topografía de la ciudad el gráfico del sistema consta en la Fig. 8.4

### 8.2.3. Consideraciones sobre la Demanda del Sistema

Ha sido criterio totalmente aceptado que para efectos de estudios de demanda (Ref. 7, Ref. 8) dividir la ciudad en zonas de consumo uniforme.

La metodología para determinar las cargas actuales de estas zonas en cambio, ha sido diferente. Así la Ref. 1 luego de zonificar el área de acuerdo al consumo determina la carga en cada zona en la hora pico de un día de

terminado, definiendo previamente la proporción de alimentadoras de distribución por zonas.

Por otro lado, la demanda (Ref. 8 ) ha sido tomada tanto considerando la porción de alimentadoras en cada zona así como tomando en cuenta la capacidad de los transformadores instalados (Boletín REA N° 45-A).

Para nuestro estudio hemos adoptado la zonificación que considera los siguientes tipos de consumo: industrial alto, industrial medio, residencial alto, residencial medio, semisuburbio, suburbio, comercial alto, comercial medio, comercial bajo, zona norte y zona sur.

Para la obtención de una base de datos para la aplicación del programa LODS se ha dividido la ciudad en 125 sectores de una área aproximada de  $0.5 \text{ km}^2$ . Cada uno de estos sectores perteneciendo a una o a varias zonas de consumo uniforme.

Aplicando un método cuya descripción detallada consta en el Apéndice 2, hemos encontrado la demanda para el año base, este método toma en cuenta la proporción de área servida por alimentadora a cada sector así como su densidad de carga de acuerdo a la zona de consumo; además, este método asume una distribución uniforme de la carga en cada una de las zonas así como también la demanda a 4.16 KV se ha convertido a demanda a 13.8 KV.

La proyección para el año horizonte de nuestro estudio que lo hemos situado en 10 años, así como en los años intermedios, se realiza por sector y cada sector a su vez por clase de consumo adoptando tasas acordes con el crecimiento de estas zonas. (Ver apéndice 2).

De esta manera los datos empleados para la aplicación del programa constan en la Tabla 8-2, como también en la Fig. 8-5 consta la ubicación de los sectores y la carga en el año base.

#### 8.2.4 Aplicación del Programa y resultados

##### 8.2.4.1. Procedimiento

El primer paso para la aplicación del método del LODS ha sido considerar un año horizonte; pues se trata de una planificación a largo plazo para ubicar nuevas subestaciones.

De esta manera, el año horizonte en este estudio se ha considerado a 10 años, a partir del año base.

Los datos iniciales han sido proyectados para el año horizonte y para los años intermedios con períodos de 2 años hasta completar los 10 años. (Ver apéndice 2).

Las capacidades para las subestaciones se han hecho arbitrariamente grandes 100 y 200 MVA, además que el con-

TABLA 8-2

## ZONA LOS CEIBOS - ATARAZANA

NODO Nº	AÑO 0	AÑO 2	AÑO 4	AÑO 6	AÑO 8	AÑO 10
1	0.84	1.01	1.22	1.48	1.80	2.17
2	1.5	1.88	2.36	2.96	3.72	4.67
3	0.75	0.94	1.18	1.48	1.86	2.33
4	1.76	2.13	2.76	3.47	4.36	5.47
5	0.84	1.01	1.22	1.48	1.80	2.17
6	0.84	1.01	1.22	1.48	1.80	2.17
7	1.5	1.85	2.28	2.81	3.45	4.26
8	0.6	0.74	0.91	1.12	1.38	1.70
9	0.25	0.31	0.38	0.47	0.58	0.71
10	1.18	1.42	1.72	2.09	2.52	3.06
11	1.12	1.38	1.70	2.09	2.58	3.18
12	0.25	0.31	0.39	0.49	0.62	0.78
13	1.61	1.94	2.35	2.85	3.45	4.17
14	1.29	1.56	1.88	2.28	2.76	3.34
15	0.25	0.31	0.39	0.49	0.62	0.78
16	0.92	1.11	1.34	1.62	1.97	2.38
17	1.73	2.09	2.53	3.06	3.70	4.48
18	2.18	2.63	3.19	3.86	4.67	5.65
19	0.25	0.31	0.39	0.49	0.62	0.78
20	1.40	1.69	2.04	2.48	3.00	3.63
21	1.80	2.17	2.63	3.18	3.85	4.66

## ZONA LOS CEIBOS - ATARAZANA

NODO Nº	AÑO 0	AÑO 2	AÑO 4	AÑO 6	AÑO 8	AÑO 10
22	0.85	1.02	1.24	1.50	1.82	2.20
23	0.16	0.19	0.23	0.28	0.34	0.41
24	0.99	1.19	1.44	1.75	2.12	2.56
25	1.29	1.43	1.74	2.10	2.55	3.08
26	0.60	0.72	0.87	1.06	1.28	1.55
27	1.00	1.25	1.57	1.97	2.48	3.11
28	0.8	0.96	1.17	1.41	1.71	2.07
29	0.18	0.21	0.26	0.31	0.38	0.46
30	0.67	0.81	0.98	1.18	1.43	1.73
31	0.54	0.65	0.79	0.95	1.15	1.40
32	0.46	0.55	0.67	0.81	0.98	1.19
33	0.19	0.24	0.30	0.37	0.47	0.59
34	0.30	0.36	0.43	0.53	0.64	0.77
35	0.90	1.08	1.31	1.59	1.92	2.33
36	0.69	0.83	1.01	1.22	1.47	1.78
37	0.67	0.81	0.98	1.18	1.43	1.73
38	0.67	0.81	0.98	1.18	1.43	1.73
39	3.26	3.94	4.77	5.77	6.98	8.45
40	0.23	0.28	0.34	0.41	0.49	0.60
41	4.0	4.0	1.0	1.0	1.0	1.0
42	1.76	2.20	2.76	3.47	4.36	5.47

## ZONA LOS CEIBOS - ATARAZANA

NODO Nº	AÑO 0	AÑO 2	AÑO 4	AÑO 6	AÑO 8	AÑO 10
43	1.76	2.20	2.76	3.47	4.36	5.47
44	1.76	2.20	2.76	3.47	4.36	5.47
45	1.76	2.20	2.76	3.47	4.36	5.47
46		0.50	0.63	0.79	0.99	1.24
47		0.50	0.63	0.79	0.99	1.24
48			0.50	0.63	0.79	0.99
49			0.50	0.63	0.79	0.99
50				0.50	0.63	0.79
51				0.50	0.63	0.79
52					0.50	0.63
53					0.50	0.63
54						0.50
55						0.50

## ZONA CENTRO - SUBURBIO - GUASMO

NODO Nº	AÑO 0	AÑO 2	AÑO 4	AÑO 6	AÑO 8	AÑO 10
1	0.86	1.07	1.35	1.69	2.12	2.67
2	0.86	1.07	1.35	1.69	2.12	2.67
3	0.64	0.80	1.00	1.26	1.58	1.98
4	0.11	0.13	0.17	0.21	0.27	0.34
5	0.86	1.07	1.35	1.69	2.12	2.67
6	0.86	1.07	1.35	1.69	2.12	2.67
7	0.90	1.12	1.41	1.77	2.22	2.79
8	0.86	1.07	1.35	1.69	2.12	2.67
9	0.85	1.06	1.33	1.67	2.10	2.63
10	0.95	1.19	1.49	1.87	2.35	2.95
11	0.98	1.22	1.54	1.93	2.42	3.04
12	0.97	1.21	1.52	1.91	2.40	3.01
13	0.74	0.92	1.16	1.46	1.83	2.29
14	0.71	0.92	1.19	1.55	2.03	2.64
15	1.12	1.40	1.76	2.21	2.77	3.47
16	1.14	1.43	1.79	2.25	2.82	3.54
17	0.29	0.36	0.45	0.57	0.71	0.90
18	0.54	0.73	0.85	1.06	1.34	1.68
19	0.62	0.84	0.97	1.22	1.54	1.93
20	0.94	1.20	1.54	1.98	2.55	3.28
21	0.94	1.17	1.47	1.85	2.32	2.91

## ZONA CENTRO - SUBURBIO - GUASMO

NODO Nº	AÑO 0	AÑO 2	AÑO 4	AÑO 6	AÑO 8	AÑO 10
22	0.64	0.80	1.00	1.26	1.58	1.98
23	0.61	0.82	0.96	1.20	1.51	1.90
24	1.14	1.46	1.79	2.25	2.83	3.54
25	0.83	1.04	1.31	1.63	2.08	2.63
26	0.79	0.99	1.24	1.55	1.95	2.45
27	1.11	1.39	1.74	2.19	2.74	. 4
28	1.38	1.86	2.17	2.72	3.42	4.29
29	0.62	0.84	0.97	1.22	1.54	1.93
30	1.83	2.47	2.87	3.61	4.54	5.69
31	3.13	3.78	4.58	5.54	6.70	8.11
32	2.06	2.49	3.02	3.66	4.44	5.38
33	2.75	3.34	4.05	4.93	5.99	7.28
34	2.63	3.21	3.92	4.79	5.85	7.15
35	2.33	2.93	3.69	4.65	5.87	7.41
36	1.01	1.36	1.59	1.99	2.50	3.14
37	0.87	1.17	1.37	1.71	2.16	2.71
38	3.08	3.73	4.53	5.50	6.68	8.11
39	4.09	4.94	5.98	7.24	8.76	10.60
40	4.31	5.21	6.31	7.63	9.23	11.67
41	2.80	3.38	4.09	4.96	6.00	7.26
42	2.50	3.02	3.66	4.42	5.35	6.48
43	4.27	5.35	6.71	8.41	10.56	13.26

## ZONA CENTRO - SUBURBIO - GUASMO

NODO Nº	AÑO 0	AÑO 2	AÑO 4	AÑO 6	AÑO 8	AÑO 10
44	0.5	0.67	0.90	1.21	1.63	2.20
45	1.97	2.22	2.76	3.45	4.32	5.42
46	2.04	2.63	3.39	4.38	5.66	7.32
47	1.97	2.40	2.92	3.57	4.36	5.33
48	1.87	2.26	2.73	3.31	4.00	4.85
49	3.91	4.73	5.72	6.92	8.38	10.14
50	3.25	3.93	4.75	5.75	6.96	8.42
51	11.40	14.50	17.25	21.19	26.02	32.06
52	13.01	16.43	19.78	24.33	29.92	36.95
53	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3	1.3
54	1.42	1.77	2.23	2.80	3.53	4.44
55	1.69	2.07	2.55	3.14	3.87	4.78
56	2.72	3.34	4.09	5.00	6.13	7.50
57	2.5	3.20	4.08	5.20	6.65	8.48
58	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2	1.2
59	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5	0.5
60	2.0	2.0	2.0	0.10	0.10	0.10
61		0.50	0.63	0.79	0.99	1.24
62		0.50	0.63	0.79	0.99	1.24
63			0.50	0.63	0.79	0.99
64			0.50	0.63	0.79	0.99
65				0.50	0.63	0.79

## ZONA CENTRO - SUBURBIO - GUASMO

NODO Nº	AÑO 0	AÑO 2	AÑO 4	AÑO 6	AÑO 8	AÑO 10
66				0.50	0.63	0.79
67					0.50	0.63
68					0.50	0.63
69						0.50
70						0.50

ductor y, en consecuencia, el límite térmico de las alimentadoras se ha considerado uniformes en el sistema, esto es 336.4 MCM de aleación de aluminio y 12 MVA, respectivamente.

Con estas simplificaciones se procedió a correr el programa para el año base con la ubicación actual de subestaciones y para los años sucesivos; ubicando las nuevas subestaciones de acuerdo a los requerimientos del Sistema, esto es cada vez que el límite térmico de las alimentadoras era sobrepasado. De esta manera, al llegar al año horizonte se tuvo una configuración del sistema que puede servir como un paso inicial para ubicar y determinar la capacidad de las subestaciones.

#### 8.2.4.2. Resultados

Se hicieron un total de 13 corridas comenzando con el año base y luego para los años sucesivos hasta el año horizonte.

Se dividió a la ciudad en dos zonas de acuerdo a los límites naturales impuestos por la topografía de la ciudad. Es decir, se separó a la ciudad a través del Estero Salado y los Cerros del Carmen y Santa Ana.

La configuración de las áreas de Servicio para el año base y los años sucesivos constan en las Figs. 8.6 a 8.11 en donde como puede apreciarse se han ido añadiendo -

las subestaciones que el sistema requería. Las demandas asignadas a cada subestación ya existente como a las nuevas subestaciones consta en la Tabla 8.3.

Del análisis de los datos se desprende que deben ser ubicadas 4 subestaciones:

- a) Subestación 1, ubicada en el nodo 31 de la zona Centro-Suburbio-Guasco, situada aproximadamente en la zona aledaña a las calles Rosendo Avilés y García Moreno
- b) Subestación 2, ubicada en el nodo 32 de la zona Centro-Suburbio-Guasco, situada aproximadamente en la zona aledaña a la Ciudadela del Maestro y Ciudadela Huancavilca
- c) Subestación 3, ubicada en el nodo 11 de la zona Centro-Suburbio-Guasco, situada aproximadamente en la zona aledaña a la calle 27 y Venezuela y
- d) Subestación 4, ubicada en el nodo 47 de la zona Los Ceibos-Atarazana, situada aproximadamente en la Ciudadela Alborada

Las capacidades para estas subestaciones deberán ser para el año horizonte 66, 42, 41 y 12 MVA respectivamente, lo que corresponde a 3 transformadores 24/32 para la primera; dos 24/32 para la segunda y tercera; y un 12/16 para la cuarta.

Se debe anotar, además, que las subestaciones existentes aumentan su capacidad unas, la mantienen otras, y otras disminuyen notablemente su capacidad.

Así las Subestaciones Boyacá, Los Ceibos, Atarazana, Mapasingue tienen en el año horizonte capacidades casi 3 veces mayores que la capacidad del año base.

No sucede así con las subestaciones La Torre y El Guasmo, que disminuyen su capacidad ya que las cargas asignadas a ellas son transferidas a subestaciones mejor ubicadas.

Se debe anotar por último que las alimentadoras - que mayores sobrecargas experimentan son aquellas que sirven a la zona industrial ubicada a lo largo de la vía a Daule.

Las salidas de las corridas constan en el Apéndice 3.

TABLA 8.3  
 DEMANDA ASIGNADA A LAS SUBESTACIONES (MVA)

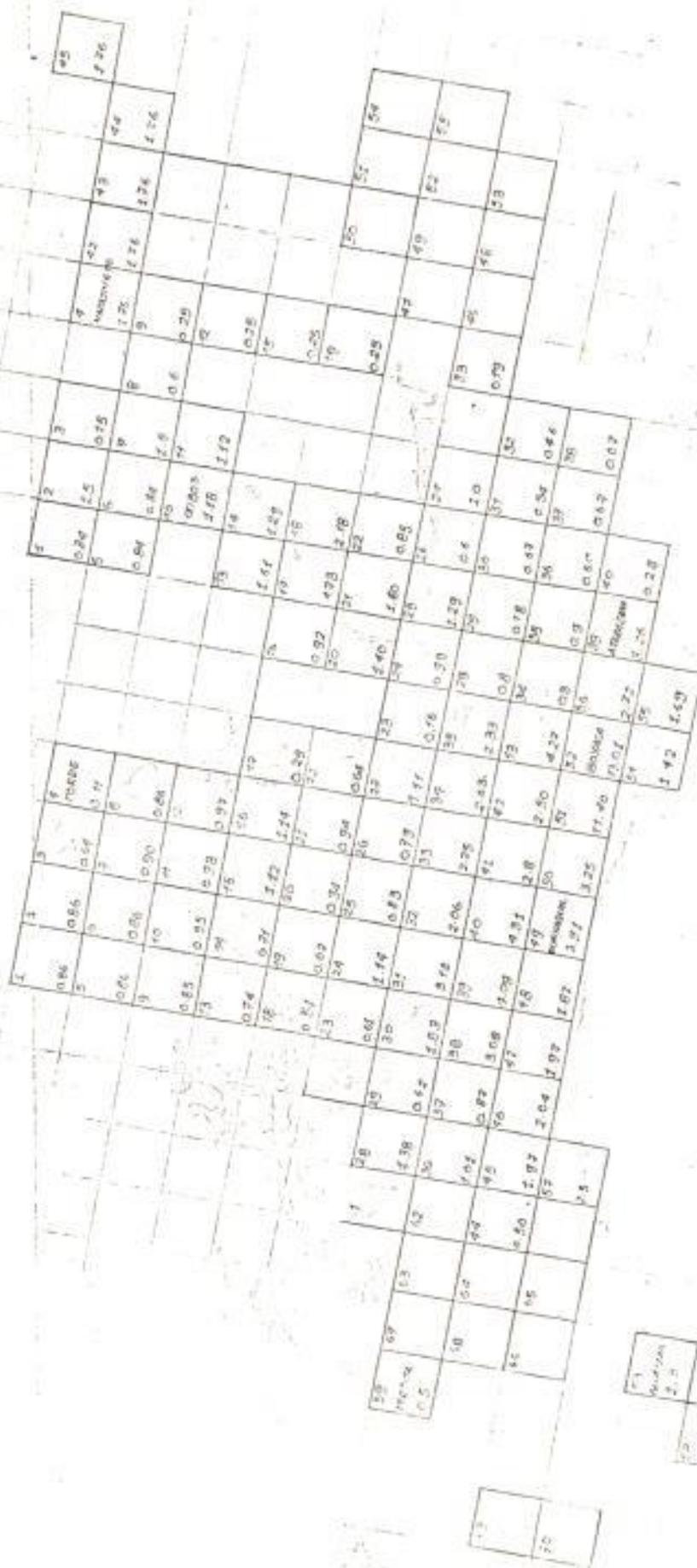
SUBESTACION	AÑO BASE	AÑO DOS	AÑO CUATRO	AÑO SEIS	AÑO OCHO	AÑO HORIZONTE
LA TORRE	13	15	19	24	30	8
GUAYAQUIL	50	22	27	33	39	48
BOYACA	44	53	64	79	98	120
GUASMO	8	9	5	4	4	5
MAPASINGUE	11	14	18	24	31	31
LOS CEIBOS	21	25	31	37	45	55
ATARAZANA	18	21	22	26	32	35
SUBESTACION 1	-	46	41	51	63	66
SUBESTACION 2	-	-	20	26	34	42

TABLA 8.3

DEMANDA ASIGNADA A LAS SUBESTACIONES (MVA)

SUBESTACION	AÑO BASE	AÑO DOS	AÑO CUATRO	AÑO SEIS	AÑO OCHO	AÑO HORIZONTE
SUBESTACION <sub>3</sub>	-	-	-	-	-	41
SUBESTACION <sub>4</sub>	-	-	-	-	-	12





42  
DUNEDIN  
5.0

70  
WELLINGTON  
2.2

71  
MILAN  
2.5

Fig. 8.5 Demande Año Inicial

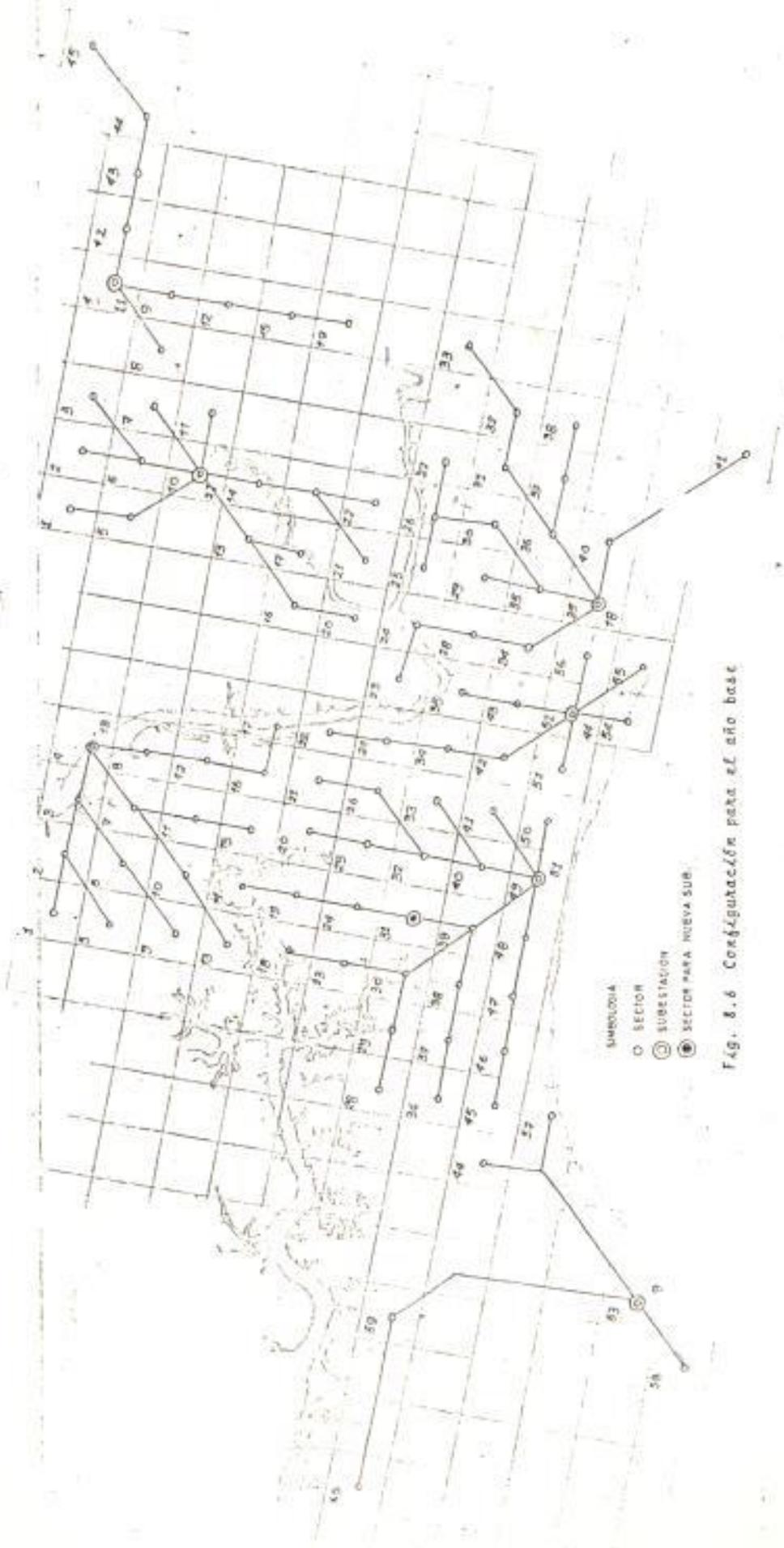


Fig. 8.6 Configuración para el año base

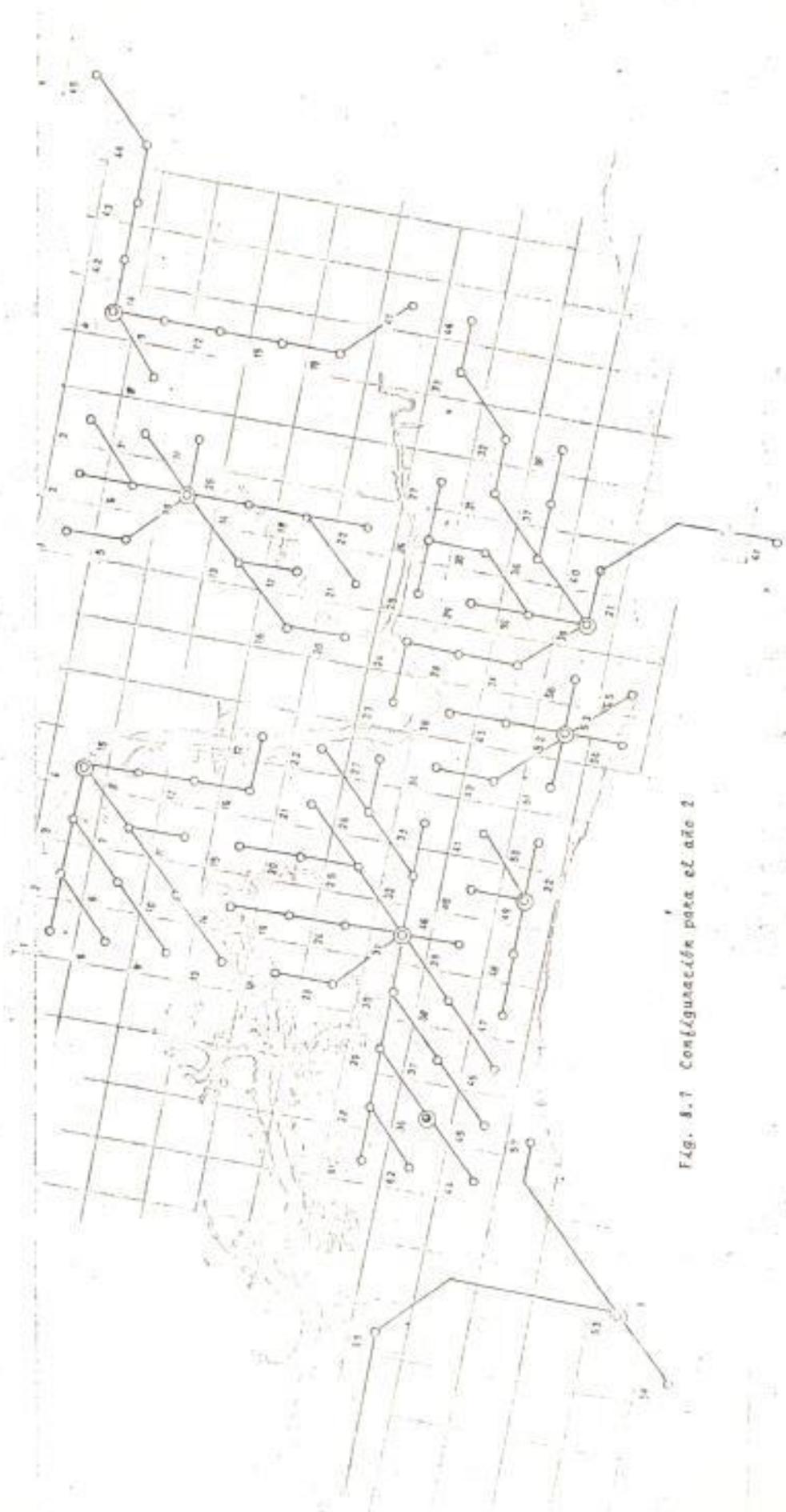


Fig. 8.1 Configuración para el año 2



Fig. 8.8 Configuración para el año 4

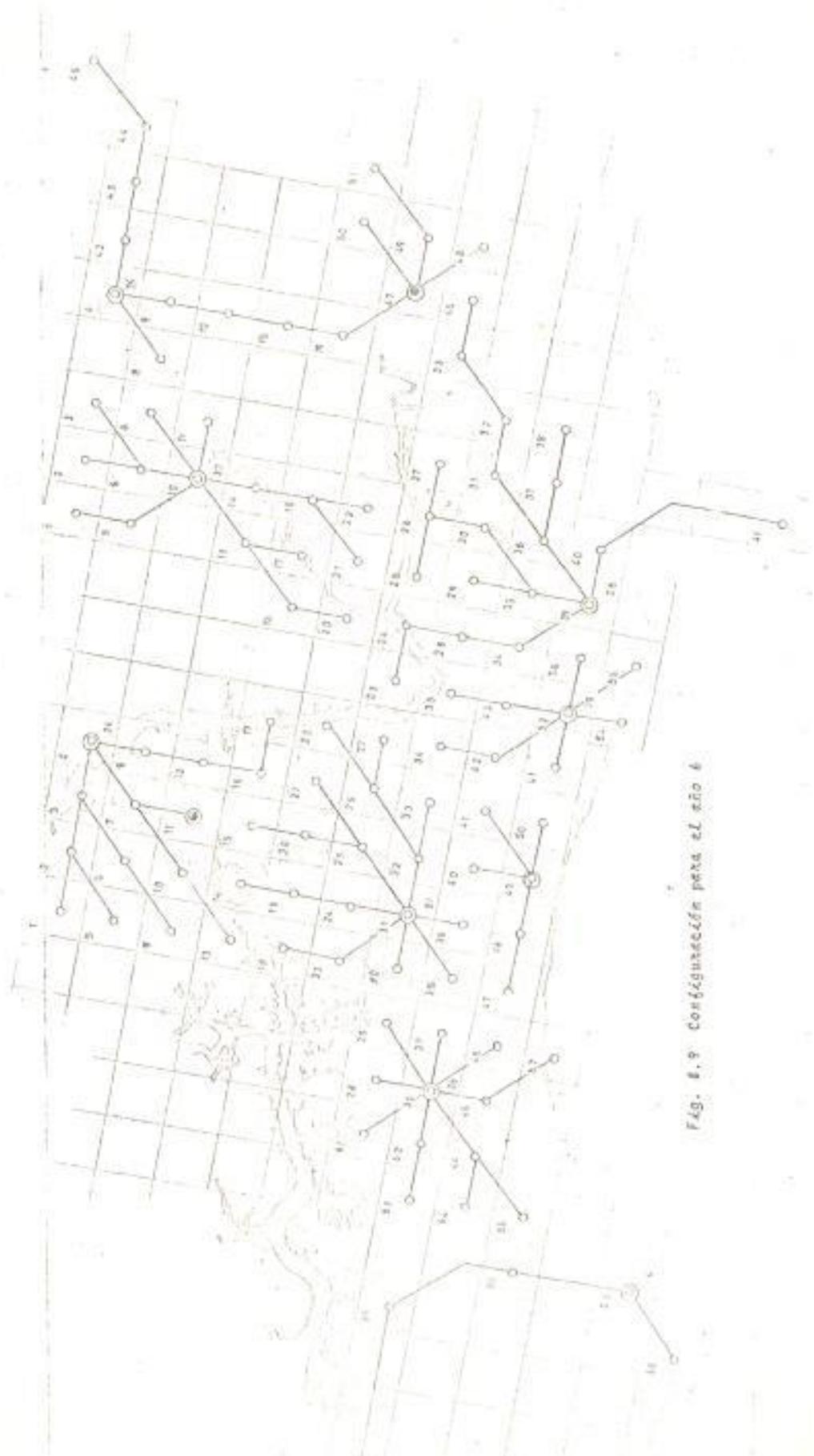


FIG. 8.9 Configuración para el año 6



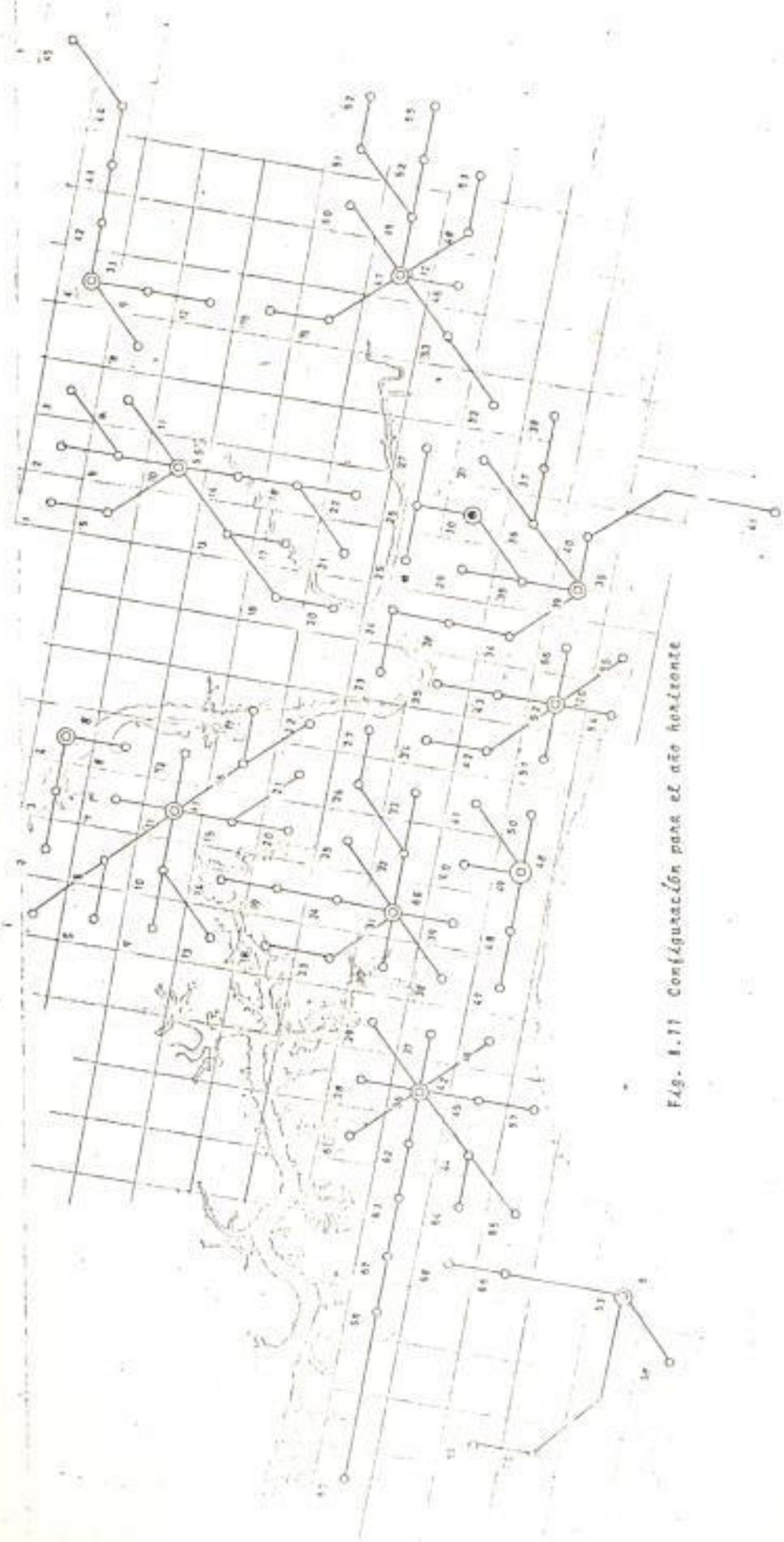


Fig. 1.11 Configuración para el río horizonte

## CAPITULO 9

### CONCLUSIONES

En este estudio se ha presentado un planteamiento matemático que nos permite realizar la planificación de un sistema estableciendo la relación de la capacidad y del área de servicio de una subestación con las otras subestaciones del sistema.

Además, se ha desarrollado un nuevo enfoque matemático que nos permite ubicar subestaciones de manera que la planificación tenga alternativas viables.

Para esto se han usado procedimientos matriciales y modelos matemáticos originales. De tal manera que el procedimiento del LODS puede ser una herramienta eficaz de un Ingeniero de Distribución en la Planificación, ya que además se presenta datos de evaluación complementarios como ser pérdidas y sobrecargas en las alimentadoras.

De la utilización del programa se desprende 3 ventajas inmediatas; pues, el programa puede ser utilizado para definir las áreas de servicio óptimas de las subestaciones; puede ser utilizado para determinar ubicaciones para nuevas subestaciones; y por último puede ser utilizado para determinar la capacidad de las subestaciones.

La mayor limitación del programa es su capacidad, ya que a medida que los sectores sean más pequeños los resul

tados obtenidos serán más confiables y de mayor utilidad.

En caso que el actual sistema de computación de la ESPOL sea cambiado por uno de mayor memoria y velocidad - el programa puede ampliarse proporcionalmente y lograr sus objetivos con mayor eficacia.

Del análisis de los resultados obtenidos para la zona centro-suburbio-guasmo (zona sur), se desprende que la adición de nuevas subestaciones deberá hacerse en áreas comprendidas dentro de un triángulo formado, teniendo como vértices las subestaciones El Guasmo, Boyacá y La Torre; es decir, en el interior del sistema.

Además, las subestaciones La Torre y El Guasmo en el año horizonte transfieren su carga a nuevas subestaciones mejor ubicadas y por lo tanto su capacidad disminuye, de lo que se puede concluir que se debe evitar ubicar subestaciones que tengan áreas de influencia con ángulos que no sean cercanos a  $360^{\circ}$ .

Por otro lado, en la zona Los Ceibos-Atarazana (zona norte), la nueva subestación debe ser ubicada fuera del área de influencia de las subestaciones existentes, debido a que estas están ubicadas dentro de los centros de carga del sistema.

Estos resultados han sido obtenidos partiendo de una

aplicación del programa LODS en pasos de 2 años, hasta llegar al año horizonte, que en este estudio se ha ubicado en 10 años a partir del año base. Esta forma de planificar para el Sistema Guayaquil, en particular nos da resultados satisfactorios.

Sería deseable si contáramos con métodos computarizados para la obtención de la demanda del sistema; esto es, codificación del consumo KW-hora de acuerdo al transformador de distribución primario y obtención de factores de demanda y diversificación, de acuerdo a la clase de consumo; ya que a medida que el sistema se expande la evaluación de la demanda se hace más necesaria para estudios de planificación.

Finalmente tal como se mencionó en la Introducción, - este trabajo pretende ser un inicio en una área de investigación que puede abarcar la planificación total de todos los elementos del sistema de distribución, y en la aplicación de métodos de optimización a la planificación de otros aspectos diferentes de un Sistema de Potencia como serían Transmisión y Generación.

## BIBLIOGRAFIA

1. Electric Utility Engineers, Distribution Systems, East Pittsburgh: Westinghouse Electric Corporation, 1965.
2. E. Masud, "An Interactive Procedure for Sizing and - Timing Distribution Substations", IEEE Trans. (Power-Apparatus and Systems) Vol-pag 1281 - 1286, 1974.
3. D.M. Crawford, S.B. Holt Jr, "A Mathematical Optimiza- tion Technique for Locating and Sizing Distribution - Substations, and Deriving their Optimal Service Areas" IEEE Trans. (Power Apparatus and Systems) Vol-pag 230-235, Marzo/Abril 1975.
4. Hu, T.C., Integer Programming and Network Flows, Addison Wisley Publishing Company, 1970.
5. K.S. Hindi, Brameller, "Design of Low-voltage Distribu- tion Networks: A Mathematical Programming Method", Proc IEE, Vol 124, pag 54-58, Enero 1977.
6. "Electric Distribution Systems Engineering Manual", Ebasco Services Incorporated.
7. G. Romero "Planificación del Sistema Eléctrico de la- ciudad de Guayaquil", Tesis, Escuela Superior Politéc- nica del Litoral, Agosto 1976.
8. CIER. Informe presentado por la Empresa Eléctrica del

Ecuador Inc. 1969.

9. IBM, 1130 Scientific Subroutine Package Programmer's Manual.
10. E. Crompton Apuntes 1978-1979.
11. Jauffred, Moreno, Acosta, Métodos de Optimización, Representaciones y Servicios de Ingeniería S.A., 1975.
12. J.A. Smith, "Economic of Primary Distribution Voltages of 4.16 Through 34.5 KV" AIEE Transactions (Power Apparatus and Systems), Octubre 1961.
13. General Electric, Distribution Data Book
14. X. Salinas "Programa para Cálculo de Cortocircuitos aplicable a plantas Industriales", Tesis, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Mayo 1978.