ESCUELA POLITECNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA

MINIMIZACION DE PERDIDAS DE ENERGIA EN ALIMENTADORES PRIMARIOS DE DISTRIBUCION MEDIANTE LA INSTALACION DE CAPACITORES PARALELO. METODO DE VARIACIONES LOCALES

TESIS PREVIA A LA OBTENCION DEL TITULO DE
INGENIERO ELECTRICO EN SISTEMAS ELECTRICOS
DE POTENCIA

VICENTE CHAMORRO FIGUEROA

FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
BIBLIOTECA
2892
E. P. N.

QUITO, ENERO 1986

Certifico que la presente tesis ha sido realizada en su totalidad por el Sr. VICENTE CHAMORRO FIGUEROA.

ING. JESUS JATIVA
Director de tesis

DEDICATORIA :

A mi familia y en especial

a MI MADRE

PROLOGO

En el presente trabajo se minimiza las pérdidas de energía en alimentadores primarios de distribución utilizando un método de búsqueda directa llamado de las variaciones locales. La finalidad de este método es encontrar una óptima instalación de capacitores fijos y conectables que permitan obtener el máximo beneficio de la utilización de esta técnica de compensación reactiva.

La necesidad de optimizar recursos en los sistemas de distribución lleva al planteamiento de diversas alternativas técnico-económicas que permitan reducir las pérdidas que se generan en los alimentadores primarios. Es así que conjuntamente con funcionarios de la Empresa Eléctrica Quito, se formuló un plan de trabajo para obtener una herramienta que permita disminuir el grado de pérdidas de energía utilizando capacitores paralelo.

La disponibilidad del centro de cómputo y la asesoría técnica brindada en la recopilación de datos han hecho posible la realización de este trabajo. El programa digital implementado a partir de los modelos matemáticos descritos a lo largo del presente trabajo, está a disposición de los departamentos de la empresa que requieran de su utilización.

El método considerado permite el estudio de la instalación en paralelo de capacitores fijos y/o conectables sobre cualquier alimentador primario de distribución tipo radial, tomando en cuenta la influencia de los factores de crecimiento de la carga, del factor de carga, incremento del costo de energía y costo de la capacidad del sistema.

El autor quiere dejar constancia de su agradecimiento a los Ingenieros Edgar Mármol, Medardo Castillo y Fernando Gómez, funcionarios de la Empresa Eléctrica Quito y a to -

das las personas que de una u otra manera colaboraron en la realización de este trabajo y en especial al Ingeniero Jesús Játiva, Director de Tesis, con cuyo asesoramiento se llevó a cabo el desarrollo de esta tesis.

Quito ,15 de Enero de 1986

INDICE

Prólogo.		iii
Introducción		1
Objetivo y alcance		4
Capítulo I	MODELOS MATEMATICOS	7
	Modelación de pérdidas de energía en alimentadores primarios. . . .	7
	Efecto del crecimiento de la carga sobre las pérdidas de energía.	11
	Efecto del crecimiento del factor de carga.	12
	Efecto del incremento anual del costo de energía.	12
	Ahorros por reducción de pérdidas de energía.	13
	Ecuaciones que definen la instalación óptima de capacitores fijos.	18
	Ecuaciones que definen la instalación óptima de capacitores conectables.	19
	Beneficios debidos a la liberación de capacidad del sistema.	21
	Costo de los bancos de capacitores	25
	Elevación de voltaje.	26
Capítulo II	DETERMINACION DE LA FUNCION OBJETIVO DEL PROBLEMA	32
	Definición y alcance.	33
	Selección óptima de capacitores fijos	34
	Selección óptima de capacitores	

conectables 35

CAPITULO III METODO DE LAS VARIACIONES LOCALES . 38
Conceptos y definiciones. 40
Descripción del método. 41
Aplicación del método a la función objetivo de maximización de beneficios obtenidos mediante la aplicación de capacitores paralelo. . . . 45
Algoritmo de solución 47

CAPITULO IV APLICACIONES. 51
Ejemplo No. 1 51
Datos generales del sistema 51
Resultados de la instalación de capacitores fijos 52
Ejemplo No. 2 64
Descripción del alimentador 65
Datos generales del sistema 65
Resultados de la instalación de capacitores fijos 76
Análisis de la instalación de capacitores conectables 91
Instalación de capacitores conectables. 92

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES. 97

APENDICE A PROGRAMA DIGITAL. 99
Método de solución. 100
Descripción del programa digital. . 101
Diagramas de flujo. 105
Nomenclatura y variables de entrada 117
Variables de salida 122

Forma de proporcionar los datos 125
Restricciones 126
Forma de utilizar el programa 134
Resultados y corridas del programa. . 136
Ejemplo No. 1 137
Ejemplo No. 2 139
Listado del programa digital. 147

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA 164

INTRODUCCION

Un sistema moderno de electrificación transmite la energía eléctrica producida en una variedad de fuentes (hidroeléctrica, térmica, geotérmica) a los consumidores industriales, comerciales y residenciales en una vasta región para hacer funcionar maquinarias, equipos, artefactos y satisfacer el consumo doméstico y público. El sistema debe estar diseñado para satisfacer diferentes niveles de demanda y prever su crecimiento.

La mayor parte de los países en desarrollo necesitan elevar la eficiencia del uso de energía en la generación, transmisión y distribución de electricidad. Todos los sistemas eléctricos sufren pérdidas de energía en las centrales generadoras y pérdidas por resistencia en las redes de transmisión y distribución. Las pérdidas de energía debidas a la resistencia de las redes de transmisión y distribución en los países en desarrollo consumen actualmente alrededor del 15% de su producción total de energía eléctrica[1].

Dado que los niveles de pérdidas más aceptables son aproximadamente la mitad de esa cifra, se requieren nuevos esfuerzos para rehabilitar las redes de transmisión y distribución, instalar nuevos conductores, perfeccionar el funcionamiento del sistema y mejorar las instalaciones de distribución del sistema.

Una mayor eficiencia de la operación y una disminución de las pérdidas pueden reducir la necesidad de instalar mayor capacidad para suministrar la energía, lo que corresponderá a un ahorro de inversiones.

Los sistemas de transmisión han recibido bastante atención en este sentido, no así los sistemas de distribución, los cuales pese a representar grandes inversiones de capital, (aproximadamente el 50% de la inversión total de un sistema eléctrico de potencia) no han recibido igual grado de atención tendiente a optimizar su funcionamiento. En la actualidad esto debe ser to

mado muy en cuenta, más aún si se considera la precaria situación económica de las empresas eléctricas de nuestro país. Por otro lado, las empresas suministradoras de energía deben satisfacer los siguientes requerimientos básicos :

1. Conservar un alto grado de confiabilidad del servicio a los usuarios, esto es : mantener la frecuencia y voltaje constantes y dentro de los límites pérmitidos y garantizar el nivel adecuado de continuidad de servicio.
2. Obtener máxima eficiencia en la explotación, además de mejorarla continuamente para guardar una relación razonable entre lo que paga el consumidor por kilovatio-hora y lo que le cuesta a la empresa suministrarlo, frente a los costos constantemente crecientes de generación, mano de obra, materiales y mantenimiento.

La corriente reactiva al fluir a lo largo de los alimentadores de distribución ocasiona pérdidas de energía, problemas de regulación de voltaje, bajo factor de potencia y pérdida de capacidad del sistema.

Cualquier circuito eléctrico con aparatos inductivos transporta dos tipos de potencia : la real, medida en kilovatios, es la que realiza el trabajo efectivo; la segunda, la potencia reactiva " o no productiva ", medida en kilovoltioamperios reactivos KVAR, suministra el campo magnético necesario a los dispositivos inductivos, es decir establece el flujo magnético requerido por el circuito y posibilita a la potencia real realizar su trabajo. La potencia aparente que transporta el sistema es la suma vectorial de las dos potencias y está medida en kilovoltioamperios KVA. El factor de potencia para un sistema dado, es la relación entre la potencia real y la potencia aparente. La reducción del factor de potencia hace urgente la puesta en servicio de sistemas de control que faciliten el mantenimiento del voltaje requerido por el consumidor

dentro de límites aceptables, objetivo primario de los sistemas eléctricos.

Frente al problema planteado, se pueden adoptar varias soluciones, así : cambios de voltaje, cambio de conductores, cambio de transformadores de distribución, transferencia de carga de alimentadores muy cargados, equilibrio de carga en las fases, reubicación o instalación de capacitores.

Los capacitores han ido incrementando su importancia como una herramienta de diseño y operación en el área de distribución. Es posible instalar capacitores sobre los puntos de carga del consumidor, a lo largo de alimentadores secundarios, primarios o en la barra de la subestación de distribución.

La aplicación de capacitores en los terminales del consumidor proporciona los máximos beneficios, pero a veces origina problemas de autoexitación y resonancia en los motores de inducción, lo que a su vez determina la aparición de sobrevoltajes que pueden ocasionar sobrecalentamiento en los devanados y daños en el aislamiento, por esta razon los capacitores tienen limitadas aplicaciones en estos sitios.

La instalación de los capacitores en los circuitos secundarios de distribución se ve restringida por dos razones fundamentales : el costo del KVAR de capacitores para bajos voltajes (240 - 600 voltios) es mayor que el costo por KVAR de capacitores para altos voltajes (superiores a 2400 voltios) y por otro lado, la carga está distribuida en pequeños bloques a nivel del voltaje de servicio al usuario, necesitándose de un uso más extendido de pequeñas unidades de capacitores.

La instalación de capacitores en subestaciones de distribución se justifica ante la presencia de cualquiera de los siguientes factores :

1. Carga grande servida directamente desde la subestación.
2. Imposibilidad de instalar más capacitores fijos sobre los alimentadores primarios, puesto que se presentarían volta-

jes excesivos con cargas ligeras.

3. No es económico instalar bancos pequeños con capacitores conectables en alimentadores, y
4. Para despacho automático de carga de cierta área, se requiere de un gran bloque de capacitores controlable, manual o automáticamente, de acuerdo a los diferentes períodos de carga del sistema.

→ Bajo estos puntos de vista la aplicación de capacitores a lo largo de alimentadores primarios puede resultar la mejor alternativa de compensación.

La compensación con capacitores no obstante, puede ocasionar problemas de sobrevoltaje en las horas de mínima demanda por lo que se hace necesaria la utilización de capacitores fijos y conectables.

→ Las ventajas de la aplicación de capacitores en alimentadores primarios pueden resumirse en :

1. Reducción de pérdidas de energía en el sistema.
2. Incremento de la capacidad del sistema.
3. Voltaje uniforme a lo largo del alimentador.

Estos logros aumentan los ingresos de la empresa en respuesta a la satisfacción de los consumidores del servicio eléctrico y hacen que se posterge las inversiones en equipos de control de voltaje.

Objetivo y alcance

Planteado el problema de esta forma, el objetivo de este trabajo se enfoca hacia la implementación de un método que permita obtener los máximos beneficios que pueden lograrse a partir de la instalación de capacitores fijos y conectables en alimentadores primarios de distribución. Se analiza la manera de conseguir la instalación óptima de capacitores para permitir la minimización de pérdidas de energia en los alimentadores y de esta forma alcanzar los máximos beneficios de la compensación con

capacitores paralelo.

Un considerable número de estudios se ha realizado para optizar la instalación de capacitores a lo largo de alimentadores primarios. Schimill's comenzó en esta dirección[2] y propuso un procedimiento de búsqueda para optimizar el tamaño y localización de un número dado de capacitores. Cook desarrolló una fórmula exacta para determinar la reducción de pérdidas de energía alcanzada por los capacitores en un alimentador de distribución radial[3]. Durán formuló un buen número de teoremas sobre los ahorros resultantes de la aplicación de capacitores y sugirió una aproximación con programación dinámica para optimizar la instalación de capacitores[4]. Grainger y Lee definen tres subproblemas para los tres aspectos: localización, tamaño y tiempo de conexión , tratando un aspecto como variable y los otros dos aspectos como fijos en cada subproblema y propone un procedimiento iterativo para obtener el resultado óptimo [5]. Bee dedujo una simple ecuación matemática para calcular la reducción de pérdidas de energía y sugirió un procedimiento para optimizar la instalación de capacitores. Pero ninguno de los trabajos anotados toma en cuenta los beneficios alcanzados por liberación de capacidad del sistema o los efectos de los factores de crecimiento de carga, crecimiento del factor de carga y aumento del costo de energía, factores que tienen influencia directa en la instalación óptima de capacitores. Además ningún modelo considera el problema de la elevación de voltaje durante las horas de mínima demanda, como una restricción para limitar el grado de compensación con capacitores fijos.

El presente trabajo se lo ha dividido en varias secciones, en el primer capítulo se detallan los modelos matemáticos para representar las pérdidas económicas que se derivan de los flujos de las corrientes netas a través de los alimentadores, los beneficios debidos a la reducción de pérdidas de energía tomando en cuenta los factores de crecimiento, los beneficios alcanzados por liberación de capacidad del sistema, los costos de ca-

pacitores y la elevación del voltaje durante las horas de mínima demanda.

En el segundo capítulo se definen las funciones objetivo que permiten obtener la mejor alternativa de instalación de capacitores fijos y conectables, para en el capítulo tres presentar en forma detallada los fundamentos básicos del método de las variaciones locales y su aplicación al problema de instalación de capacitores fijos y conectables a lo largo de un alimentador primario de distribución.

En el capítulo cuatro se realiza la aplicación del método propuesto al análisis de alimentadores primarios. El primer ejemplo se toma de la referencia bibliográfica (8) y el segundo, de carácter práctico, para determinar la aplicabilidad del método a nuestro medio y realizar el análisis de instalación de capacitores fijos y conectables en un alimentador primario del sistema de distribución de la Empresa Eléctrica Quito.

CAPITULO I

MODELOS MATEMATICOS

Un modelo matemático es una representación cuantitativa o cualitativa de un sistema. Esta representación debe mostrar las relaciones entre los diversos factores que son de interés para el análisis a llevarse a cabo.

La modelación tiene gran importancia en la ingeniería, permitiendo estudiar el comportamiento de sistemas bajo diversas condiciones de operación. En ocasiones se aplica el modelo al estudio de sistemas ya existentes, con el objeto de determinar cual será el futuro estado del sistema. También se emplean los modelos en el proceso de diseño, en cuyo caso pueden evaluarse diversas alternativas.

1.1. Modelación de pérdidas de energía en alimentadores primarios.

Las pérdidas en la resistencia R de un alimentador debidas a la corriente neta I que fluye por ella, se las calcula por la expresión I^2R.

Para el ciclo de carga de la figura 1. , en el cual la corriente neta en el segmento i del alimentador varía en un infinito número de pasos discretos, las pérdidas de energía PE en esta sección de linea se encuentran sumando las pérdidas durante cada pequeño período de tiempo t_i.

Si I_{1t} es la corriente neta en el tiempo t_1, I_{2t} la corriente neta en el tiempo t_2, I_{nt} la corriente neta en el tiempo t_n, entonces las pérdidas de energía PE están dadas por :

$$PE = I_{1t}^2 Rt_1 + I_{2t}^2 Rt_2 + \ldots + I_{nt}^2 Rt_n$$

$$PE = R \sum_{i=1}^{n} I_{it}^2 t_i \quad ,wh \qquad (1)$$

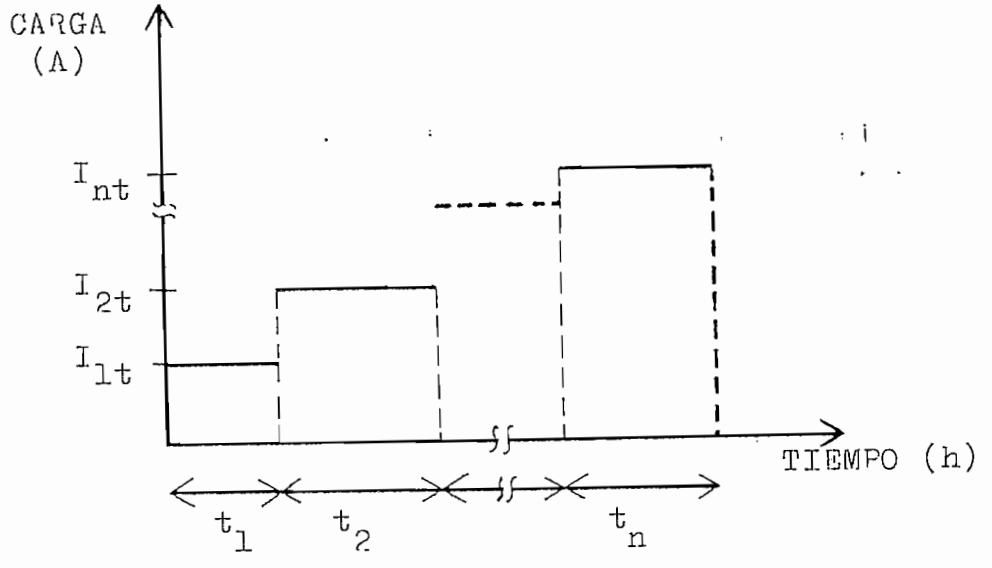


Figura 1. Ciclo de carga en el segmento i del alimentador.

El factor de pérdidas es la relación entre el promedio de las pérdidas de potencia y las pérdidas de potencia en el pico de la carga, durante el período de tiempo especificado.

Si $T = t_1 + t_2 + t_3 + \ldots + t_n$

es el período total del ciclo de carga e Imáx es la corriente en el pico de carga, el factor de pérdidas puede

calcularse mediante la expresión :

$$FPER = \frac{\sum_{i=1}^{n} I_{it}^2 \cdot t_i}{Imáx^2 \cdot T} \qquad (2)$$

Luego la ecuación (1) se puede escribir de la forma :

$$PE = Imáx^2 \cdot FPER \cdot R \cdot T \qquad (3)$$

Por otra parte, si bien el factor de pérdidas no puede ser determinado directamente del factor de carga FC, puesto que el factor de pérdidas es determinado de las pérdidas en función del tiempo y estas en cambio son proporcionales al cuadrado de la carga, la ecuación

$$FPER = m\ FC + (1 - m)\ FC^2 \qquad (4)$$

permite calcular el factor de pérdidas en términos del factor de carga, el mismo que puede calcularse mediante:

$$FC = \frac{\sum_{i=1}^{n} I_{it} \cdot t}{Imáx \cdot T}$$

Por lo tanto, dados los valores de la curva de carga diaria tanto FC y FPER pueden determinarse y establecer de esta forma la relación (4).

Luego la ecuación (1), puede expresarse para un período de un año, así :

$$PE = 8.76 \cdot R \cdot Imáx^2 \cdot FPER \quad , \quad Kwh \qquad (5)$$

y para un alimentador trifásico con n segmentos como el que se indica en la figura 2, las pérdidas de energía se expresan mediante la ecuación :

$$PE_{3\emptyset} = 26,28 \cdot \sum_{i=1}^{n} Ri \cdot Ii^2 \cdot FPER \quad , \quad Kwh \qquad (6)$$

donde : R_i es la resistencia del segmento i, en ohmios

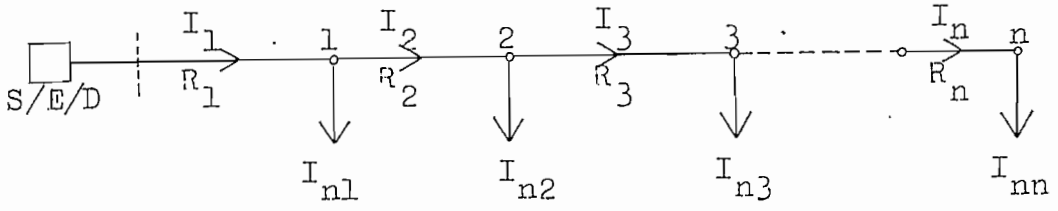


Figura 2. Alimentador de distribución de n segmentos

Ii es la corriente acumulada en el segmento i, expresada en amperios.

Ini es la corriente en el nodo i, expresada en amperios.

El costo anual de estas pérdidas de energía, a un valor 'c' en S/./Kwh, es :

$$CPE = PE_{3\emptyset} \cdot c \quad , \text{S/.} \tag{7}$$

La suma de los costos anuales de las pérdidas durante los N años de vida útil de los bancos de capacitores en los cuales se aprovecha la compensación, traídos a valor presente mediante la expresión

$$VP = \frac{F}{(1 + r)^k} \tag{8}$$

que permite determinar el valor presente VP, de las pérdidas económicas F en el año k, a una taza de actualización r. Aplicando este concepto al costo anual de pérdidas (7) resulta :

$$CPEVP = 26,28 \cdot c \cdot \sum_{i=1}^{n} Ri \cdot Ii^2 \cdot F \cdot 8760 \cdot \sum_{k=1}^{N} \frac{1}{(1 + r)^k} \quad , \text{S/.} \tag{9}$$

Como puede observarse en la ecuación (9), el costo total de las pérdidas CPEVP es función de la corriente de carga, del factor de carga y del costo de la energía. Por lo tanto esta ecuación puede modificarse para considerar el efecto del crecimiento de la carga, crecimiento del factor

de carga y el incremento del costo de la energía.

1.1.1. Efecto del crecimiento de la carga sobre las pérdidas de energía.

El crecimiento de la carga es un fenómeno natural en un sistema eléctrico y se puede deber a incrementos adicionales de las cargas ya existentes o a la adición de nuevas cargas en el alimentador. Un alimentador se diseña y construye en un sistema, por lo general, para satisfacer los requerimientos de demanda en un período planificado de tiempo, en el cual puede aceptar cargas adicionales a las ya existentes debiendo cumplir las restricciones térmicas y de regulación de voltaje.

Una vez que los incrementos de carga superan la capacidad nominal del alimentador, limitada por dichas restricciones, se construyen nuevos circuitos y la configuración del circuito cambia. Se asume que los crecimientos de carga sobre el alimentador se producen en una determinada taza anual, g, en proporción a las cargas conectadas.

Luego, el efecto del crecimiento de la carga en las pérdidas puede introducirse multiplicando la ecuación (9), por un factor :

$$(1 + g)^k \quad \text{para} \quad k = 1,2,. \ . \ ,M$$

que permite obtener la carga futura en el año k, en p.u de la carga actual y en la cual M es el período planificado de tiempo hasta el cual el alimentador puede admitir el crecimiento de la carga, sujeto a un máximo período limitado por la vida de los capacitores y se lo toma como referencia para posteriores evaluaciones con los ahorros alcanzados al instalar los bancos de capacitores.

1.1.2. Efecto del crecimiento del factor de carga

El factor de carga expresa la relación entre la carga promedio y la carga pico en un período de tiempo determinado. Los sistemas experimentan un contínuo crecimiento del factor de carga en el tiempo, debido a razones tales como : incremento de la diversidad de carga (relación entre la suma de los picos de carga de dos o más cargas al pico de la carga combinada), incremento del consumo de energía por KW de carga conectado, variaciones que se perciben observando la curva de crecimiento de la demanda pico.

Una variación del factor de carga implica una modificación de la relación

$$FPER = mFC + (1-m)FC^2$$

establecida para un factor de carga dado, puesto que el valor de m depende de las variaciones de las cargas en los diferentes intervalos.

Un factor de carga variable en el tiempo FC_k, para $k = 1,2, \ldots, N$ que responde a la curva de crecimiento del factor de carga, se puede introducir en la ecuación (9), considerando de esta forma el efecto del crecimiento del factor de carga sobre las pérdidas económicas de energía.

1.1.3. Efecto del incremento anual del costo de la energía.

El costo de equipamiento, materiales, construcción, operación y mantenimiento en un sistema eléctrico se incrementa en el tiempo, lo cual resulta en un contínuo incremento en el costo de energía del sistema.

El efecto resultante del incremento del costo de energía sobre las pérdidas económicas puede considerarse en el modelo definiendo el término 'c' en la ecuación (9) como una variable dependiente del tiempo, C_k ,para

$k = 1, 2, \ldots, N$

Resumiendo los efectos de los factores de crecimiento ya discutidos, la siguiente expresión permite encontrar las pérdidas económicas de energía PE_N debidas a las pérdidas I^2R en los alimentadores de distribución, durante los N años de vida de los capacitores a instalarse :

$$PE_N = \sum_{i=1}^{n} PE_{Ni} = 26.28 \sum_{i=1}^{n} Ri \left\{ \sum_{k=1}^{M} C_k \left[\left[Ii(1+g)^k \right]^2 (m\, FC_k + \right.\right.$$

$$+ (1-m)FC_k^2) \left] \frac{1}{(1+r)^k} + \sum_{k=M+1}^{N} C_k \left[\left[Ii(1+g)^M \right]^2 (mFC + \right.\right.$$

$$\left.\left. + (1-m)FC_k^2) \right] \frac{1}{(1+r)^k} \right\} \quad \$ \qquad (10)$$

1.2. Ahorros por reducción de pérdidas de energía mediante la instalación de capacitores.

Puesto que la expresión de pérdidas es función de la corriente al cuadrado, se deduce que las pérdidas debidas a las dos componentes de la corriente pueden considerarse separadamente de la siguiente forma :

Pérdidas totales = pérdidas por corriente activa
+ pérdidas por corriente reactiva

$$PERT = I^2R = R\,((I\cos\phi)^2 + (I\operatorname{sen}\phi)^2) \qquad (11)$$

donde ϕ es el ángulo del factor de potencia asociado a la carga.

Cuando un capacitor entrega una corriente Ic, el alimentador transporta una nueva corriente de línea I', luego las pérdidas son :

$$I'^2R = R\,((I\cos\phi)^2 + (I\operatorname{sen}\phi - Ic)^2) \qquad (12)$$

La reducción de pérdidas debida a la adición del capaci-

tor es por lo tanto :

$$RPE = I^2 R - I'^2 R = 2 I \operatorname{sen} \phi \; Ic \; R - Ic^2 R \qquad (13)$$

La ecuación (13), muestra que solo la componente reactiva de la corriente de línea, es decir Isenϕ, debe considerarse en la reducción de pérdidas I^2R por la adición de capacitores. En un caso práctico, las pérdidas totales de energía, es decir los kw-hora perdidos en un período dado, son usualmente el factor más importante en la determinación de la óptima localización de capacitores. Desde luego el ciclo de carga tiene que ser tomado en cuenta para lograr una precisión aceptable en la reducción de pérdidas.

Cuando el objetivo primario de la instalación de capacitores es la reducción de pérdidas, se necesita determinar el número óptimo de capacitores fijos y conectables. Los capacitores fijos permanecen unidos al sistema eléctrico durante todo el ciclo de carga, en tanto que los capacitores conectables entran en servicio durante el pico de carga. En general, la reducción óptima de pérdidas se obtiene con una combinación de capacitores fijos y conectables.

Las dos componentes de la corriente reactiva en una sección de línea son la corriente de carga I_{rit} variable en el tiempo y la corriente suministrada por un capacitor Ic, figura 3., fluyendo a través de un conductor de resistencia R. Asumiendo que la corriente de carga I_{rit} varía en un infinito número de pasos discretos, figura 4., de tal manera que la corriente I_{r1t} circula durante el tiempo t_1, la corriente I_{r2t} circula durante el tiempo t_2, . . , la corriente I_{rnt} circula durante el tiempo t_n; con lo que las pérdidas de energía durante cada pequeño intervalo de tiempo causadas por la corriente reactiva en este segmento del alimentador se suman y se obtiene las pérdidas de energía durante el ciclo de carga PEIR mediante la siguiente ecuación :

$$PEIR = (I_{r1t} - Ic)^2 Rt_1 + (I_{r2t} - Ic) Rt_2 + \ldots + (I_{rnt} - Ic)^2 Rt_n \quad (14)$$

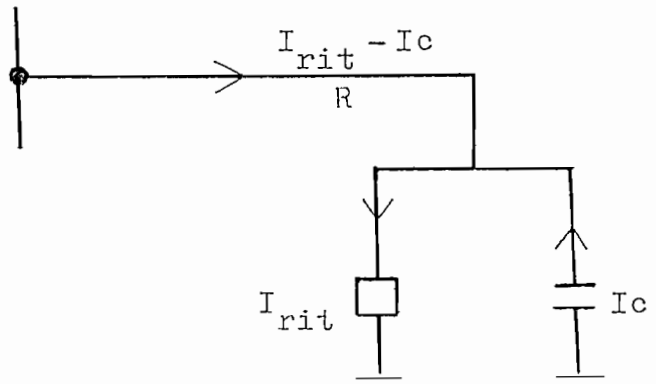


Figura 3. Componentes de la corriente reactiva en un segmento del alimentador

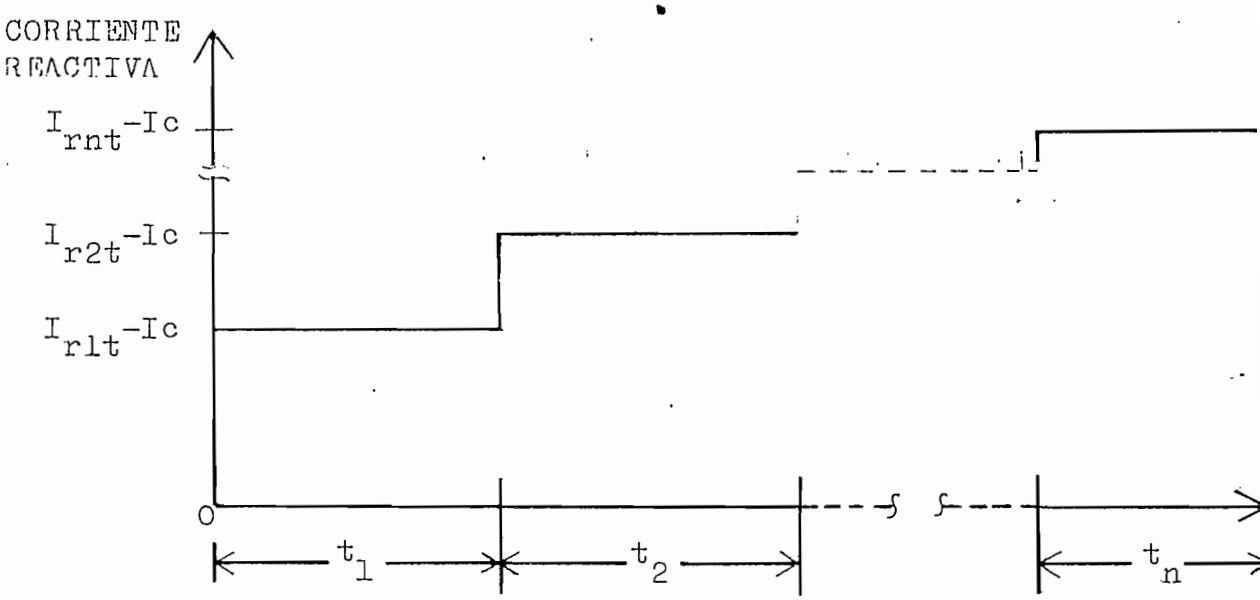


Figura 4. Ciclo de carga reactiva de un segmento del alimentador, $(I_{rit} - Ic)$ circula durante t_i

$$PEIR = I_{r1t}^2 Rt_1 + I_{r2t}^2 Rt_2 + \ldots + I_{rnt}^2 Rt_n - 2I_{r1t} Ic\, Rt_1 -$$

$$- 2I_{r2t} Ic\, Rt_2 - \ldots - 2I_{rnt} Ic\, Rt_n + Ic^2 Rt_1 + Ic^2 Rt_2 +$$

$$+ \ldots + Ic^2 Rt_n \qquad (15)$$

Las pérdidas de energía sin capacitores se encuentran mediante la ecuación :

$$PEIRS = I_{r1t}^2 Rt_1 + I_{r2t}^2 Rt_2 + \ldots + I_{rnt}^2 Rt_n \qquad (16)$$

Por lo tanto la reducción de pérdidas por fase RPEMF alcanzada por los capacitores se obtiene restando la ecuación (15) de la ecuación (16)

$$RPEMF = 2Ic\, R\, (I_{r1t}t_1 + I_{r2t}t_2 + \ldots + I_{rnt}t_n) -$$

$$- Ic^2 R\, (t_1 + t_2 + \ldots + t_n) \qquad (17)$$

Si en la ecuación (17) se define

$T = t_1 + t_2 + \ldots + t_n$ como el período total del ciclo de carga, y

$I_{r1t}t_1 + I_{r2t}t_2 + \ldots + I_{rnt}t_n$ es la sumatoria de las áreas de la curva de carga reactiva para el período T, con lo cual se tiene :

$$I_{r1t}t_1 + I_{r2t}t_2 + \ldots + I_{rnt}t_n = I_{rprom}T \qquad (18)$$

$$I_{rprom} = I_{rmáx}\, FCR \qquad (19)$$

donde I_{rprom} e $I_{rmáx}$ son las corrientes inductivas promedio y máxima, respectivamente, durante el ciclo de carga, y, FCR es el factor de carga reactivo, esto es, la relación entre el promedio de carga reactiva en un período determinado de tiempo y la carga reactiva pico ocurrida en ese período, por lo tanto la ecuación (17) puede expresarse como :

$$RPEMF = (2\, I_{rmáx}\, Ic\, FCR - Ic^2)\, RT \quad wh \qquad (20)$$

y considerando en un año :

$$RPEMFA = 8.76\, R\, (2I_{rmáx}\, FCR\, Ic - Ic^2) \quad kwh \qquad (21)$$

y para una línea trifásica con n segmentos en el alimentador y n bancos de capacitores instalados, tal como indica la figura 5., los ahorros de energía RPETF pueden expresarse mediante :

$$RPETF = 8.76 \sum_{i=1}^{n} 3\, Ri\, (\, 2\, I_{ri}\, FCR\, Ic_i - Ic_i^2) \quad kwh \qquad (22)$$

además, se define los términos Ic_i como la corriente capacitiva acumulada en el segmento i del alimentador e ic_i es la corriente suministrada por el capacitor en el nodo i.

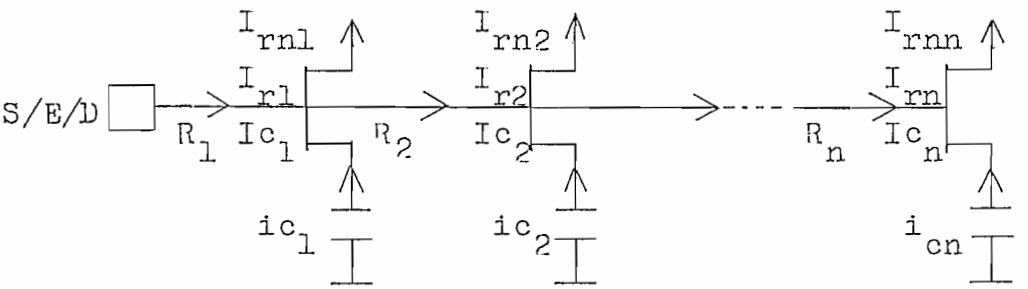


Figura 5. Alimentador de distribución de n segmentos y n bancos de capacitores.

donde I_{ri} es la corriente reactiva neta acumulada en el segmento i del alimentador, e I_{rni} es la corriente reactiva de cada nodo del alimentador.

El ahorro anual debido a esta reducción de pérdidas de energía a un costo 'c' en S/./kwh está dado por :

$$CRPE = RPETF \cdot c \qquad (23)$$

La suma de los ahorros anuales alcanzados a lo largo de los N años de vida útil de los capacitores, traídos a valor presente se determina por :

$$CRPEVP = 26.28c \sum_{i=1}^{n} Ri(2I_{ri} FCR\ lc_i - Ic_i^2) \sum_{k=1}^{N} \frac{1}{(1+r)^k} \quad S/. \quad (24)$$

Como puede observarse de la ecuación (24), el ahorro CRPEVP es una función de la corriente de carga inductiva, del factor de carga reactivo y del costo de energía. Por lo tanto, esta ecuación se puede expresar considerando el efecto del crecimiento de la carga, del factor de carga y el incremento del costo de la energía.

1.2.1. Ecuaciones que definen la instalación óptima de capacitores fijos.

1.2.1.1. Efecto del crecimiento de carga

El efecto del crecimiento de la carga en los ahorros logrados por la instalación de capacitores se puede introducir multiplicando la ecuación (24) por un factor $(1 + g)^k$, para $k = 1,2, \ldots, M$ que permite obtener la carga futura en el año k en p.u. de la carga actual y M es el período planificado de tiempo hasta el cual el alimentador admite el crecimiento de la carga, sujeto a un máximo período limitado por la vida del capacitor.

1.2.1.2. Efecto del crecimiento del factor de carga

El factor de carga variable en el tiempo, FCR_k, para $k = 1, 2, \ldots, N$ se puede introducir en la ecuación (24) considerando el efecto del crecimiento del factor de carga reactivo en los ahorros debidos a la reducción de pérdidas de energía mediante la instalación de capacitores.

1.2.1.3. Efecto del incremento anual del costo de energía.

El efecto del incremento del costo de la energía sobre los ahorros producidos por la reducción de pérdidas de energía, se considera en el modelo definiendo

el término 'c' de la ecuación (24) como una variable dependiente del tiempo, C_k , para k = 1, 2, . . , N; donde N es el número de años de vida de los capacitores.

Resumiendo, los efectos de los factores de crecimiento, discutidos anteriormente para encontrar los ahorros producidos por la reducción de pérdidas de energía durante la vida de los capacitores CRPEN, se define con la siguiente expresión :

$$CRPEN = \sum_{i=1}^{n} CRPEi = 26.28 \sum_{i=1}^{n} Ri \left\{ \sum_{k=1}^{M} C_k \left[2I_{ri} (1+g)^k FCR_k Ic_i - Ic_i^2 \right] \frac{1}{(1+r)^k} + \sum_{k=M+1}^{N} C_k \left[2I_{ri} (1+g)^M FCR_k Ic_i - Ic_i^2 \right] \cdot \frac{1}{(1+r)^k} \right\} \quad \text{S/} \qquad (25)$$

1.2.2. Ecuaciones que definen la óptima localización de capacitores conectables.

Las ecuaciones que definen los ahorros logrados por la reducción de pérdidas durante el período de conexión de los capacitores conectables, se pueden determinar considerando el ciclo de carga de la figura 6., en la cual T_1 y T_2 son los períodos de tiempo durante los cuales el capacitor entra en servicio.

Las pérdidas de energía durante los períodos T_1 y T_2 producidas por los flujos de corriente inductiva en los segmentos del alimentador antes de la instalación de los capacitores, se calcula mediante la ecuación :

$$PEIRSC = R(I_{r1t}^2 t_1 + I_{r2t}^2 t_2 + I_{r3t}^2 t_3 + I_{r4t}^2 t_4 + I_{r5t}^2 t_5 + I_{r6t}^2 t_6) \qquad (26)$$

Las pérdidas de energía luego de instalar los capacitores conectables se obtiene mediante la ecuación :

$$PEIRCC = R\left\{ (I_{r1t} - Ic')^2 t_1 + (I_{r2t} - Ic')^2 t_2 + (I_{r3t} - \right.$$
$$- Ic')^2 t_3 + (I_{r4t} - Ic')^2 t_4 + (I_{r5t} - Ic') t_5 +$$
$$\left. + (I_{r6t} - Ic')^2 t_6 \right\} \qquad (27)$$

donde Ic' es la corriente suministrada por el capacitor conectable.

La reducción de pérdidas de energía, debida a la instalación de capacitores conectables, puede obtenerse restando

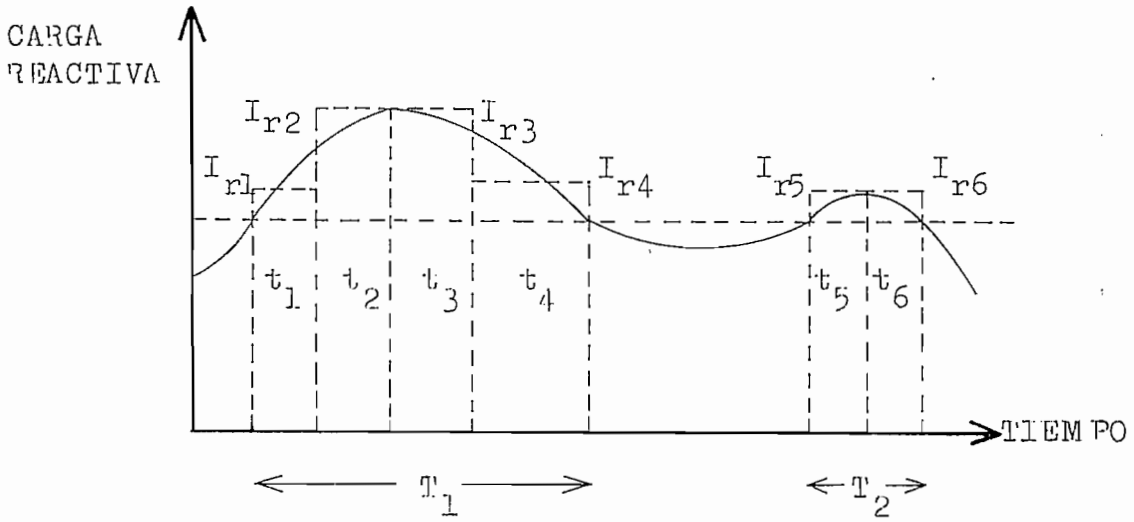


Figura 6. Ciclo de carga reactiva en una sección del alimentador.

de la ecuación (26) la ecuación (27), luego :

$$RPECC = R\left\{ 2\, Ic' (I_{r1t}\, t_1 + I_{r2t}\, t_2 + I_{r3t}\, t_3 + I_{r4t}\, t_4 + \right.$$
$$\left. + I_{r5t}\, t_5 + I_{r6t}\, t_6) - Ic'^2 (T_1 + T_2) \right\} \qquad (28)$$

Si $T_1 + T_2 = T$, tiempo total en el cual el capacitor conectable permanece en servicio, $I_{rmáx}$ es la máxima corriente inductiva durante los períodos T_1 y T_2 , y además FCR'

es la relación entre la corriente inductiva promedio durante el período T y la máxima corriente inductiva, es decir es un factor promedio para los períodos combinados T_1 y T_2 similar al factor de carga reactivo para el ciclo de carga completo.

Luego la expresión (28) se expresa como :

$$RPECC = R\ T\ (\ 2\ Ic'\ I_{rmáx}\ FCR' - Ic'^{2}) \qquad (29)$$

Por lo tanto la reducción de pérdidas de energía debida a la conexión de los capacitores conectables en un alimentador radial como el indicado en la figura 5., de n segmentos de diferente conductor se obtiene mediante la ecuación :

$$RPEMF' = \frac{T}{1000} \sum_{i=1}^{n} Ri\ (2\ I_{ri}\ FCR'\ Ic_i' - Ic_i'^{2}) \qquad kwh \quad (30)$$

Aplicando los efectos de crecimiento de la carga y el incremento del costo de energía, descritos anteriormente, la ecuación (31), permite obtener los beneficios alcanzados mediante la instalación de capacitores conectables durante su período de vida útil :

$$CRPEN' = \sum_{i=1}^{n} CRPE_i' = \frac{3T}{1000} \sum_{i=1}^{n} Ri \left\{ \sum_{k=1}^{M} C_k \left[2I_{ri}\ (1+g)^k\ .\ FCR'.\ .Ic_i' - Ic_i'^{2} \right] \frac{1}{(1+r)^k} + \sum_{k=M+1}^{N} C_k \left[2\ I_{ri}\ (1+g)^k .\ FCR'.\ .Ic_i' - Ic_i'^{2} \right] \frac{1}{(1+r)^k} \right\} \qquad S/ \quad (31)$$

1.3. Beneficios debidos a la liberación de capacidad del sistema.

A menudo el más importante de los beneficios y que justifica la adición de capacitores, es que su instalación permite al sistema aceptar carga adicional que de otra

manera no podría ser atendida.

Esto es particularmente significativo cuando se sirve a cargas con rápido crecimiento. La adición de capacitores alivia la capacidad térmica del sistema posponiendo la necesidad de añadir otros equipos más costosos, que de otro modo tendrían que instalarse. En otras palabras, la corriente capacitiva que fluye en el sistema hacia la fuente compensa la corriente inductiva demandada por las cargas reduciendo el flujo de corriente neta en el sistema.

Esta reducción en el flujo de corriente en los alimentadores transformadores, líneas de transmisión y generadores conduce a una apreciable cantidad de liberación de sus capacidades. Esta liberación de capacidad, D, en cualquier componente de un sistema que alimenta una carga S_1 dada en KVA , provocada por un flujo de corriente capacitiva Ic, se obtiene de la figura 7., que muestra la representación fasorial de los flujos de potencia real y reactiva en un segmento de un alimentador o en cualquier otro componente del sistema :

De la figura 7. , la liberación de capacidad D es :

$$D = S_1 - S_2 \quad , \text{KVA} \tag{32}$$

$$S_2 = \frac{P}{\cos\phi_2} = \frac{S_1 \cos\phi_1}{\cos\phi_2} \tag{33}$$

donde S_2 es la carga alimentada después de instalar los capacitores, los que suministran una potencia reactiva Qc en KVAR, dada por la ecuación :

$$Qc = S_1 \operatorname{sen}\phi_1 - S_2 \operatorname{sen}\phi_2 \tag{34}$$

$$\cos\phi_2 = (1 - \operatorname{sen}^2\phi_2)^{1/2} \tag{35}$$

De la ecuación (34)

$$\operatorname{sen}\phi_2 = (S_1 \operatorname{sen}\phi_1 - Qc)/S_2 \tag{36}$$

reemplazando la ecuación (36) en (35)

$$\cos \phi_2 = \left\{ 1 - \left(\frac{S_1 \operatorname{sen} \phi_1 - Qc}{S_2} \right)^2 \right\}^{1/2} \qquad (37)$$

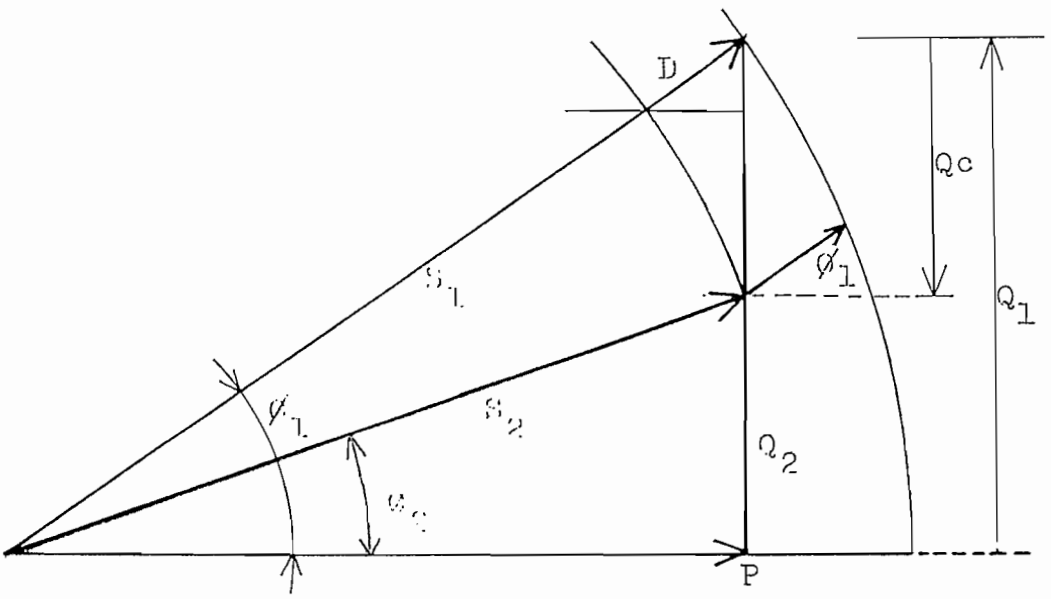


Figura 7. Obtención gráfica de la liberación de capacidad en cualquier componente del sistema.

De la ecuación (33)

$$S_2 \cos\phi_2 = S_1 \cos\phi_1 \qquad (38)$$

reemplazando en la ecuación (37) y simplificando se tiene :

$$S_2 = (S_1^2 - 2 S_1 Qc \operatorname{sen}\phi_1 + Qc^2)^{1/2} \qquad (39)$$

Sustituyendo la ecuación (39) en (32), relacionando Qc en términos de la corriente capacitiva Ic y si S_1 es el pico del ciclo de carga, la liberación de capacidad D se determina por medio de la siguiente ecuación :

$$D = S_1 \left\{ 1 - \left[1 + \left[\frac{\sqrt{3} V\ Ic}{S_1} \right]^2 - \frac{2\sqrt{3}\ V\ Ic}{S_1} \operatorname{sen} \phi_1 \right]^{1/2} \right\} \qquad (40)$$

donde V es el voltaje fase-fase en el alimentador, expresado en kilovoltios.

El beneficio debido a la liberación de capacidad se escribe como :

$$CLC = D\ C_p \tag{41}$$

donde C_p es el costo requerido para suplir cada KVA adicional demandado por la componente del sistema.

Para el caso de alimentadores de distribución los bancos de capacitores se localizan a lo largo del alimentador, por lo que el flujo de corriente capacitiva en sus varias secciones es diferente. Por lo tanto, las capacidades liberadas en el alimentador y los correspondientes beneficios se obtienen mediante las ecuaciones (40) y (41) para cada sección del alimentador y el beneficio total en el alimentador debido a la liberación de su capacidad está dado por :

$$CLCA = \sum_{i=1}^{n} CLC_i = \sum_{i=1}^{n} C_{pi}\ S_{li} \left\{ 1 - \left\{ 1 + \left(\frac{\sqrt{3}\ V\ Ic_i}{S_{li}} \right)^2 - \frac{2\sqrt{3}\ V\ Ic_i}{S_{li}} \operatorname{sen} \phi_1 \right\}^{1/2} \right\} \tag{42}$$

Los beneficios producidos por la liberación de capacidad en las subestaciones de distribución, líneas de transmisión y en la generación se pueden combinar, debido a que los KVA de carga alimentados y la corriente de los capacitores instalados en el alimentador de distribución son los mismos en todos estos componentes.

Por lo tanto, los beneficios por la liberación de capacidad de generación, transmisión y subestaciones se obtiene mediante la ecuación :

$$CLCS = C_{ps}\ S_{1máx} \left\{ 1 - \left\{ 1 + \left(\frac{\sqrt{3}\ V\ Ic_t}{S_{1máx}} \right)^2 - \frac{2\sqrt{3}\ VIc_t}{S_{1máx}} \operatorname{sen} \phi_1 \right\}^{1/2} \right\} \tag{43}$$

donde C_{ps} es el costo S/./KVA, requerido para invertir en las capacidades de las subestaciones, líneas de transmisión y generación y programar cada KVA adicional de demanda en el sistema, $S_{lmáx}$ es la máxima demanda en KVA del alimentador e Ic_t es la corriente capacitiva suministrada por todos los capacitores instalados en el alimentador.

1.4. Costo de los bancos de capacitores

El modelo del costo de los bancos de capacitores Cc guarda una relación lineal con la corriente capacitiva suministrada por ellos, esto es,

$$Cc = \sum_{i=1}^{n} (\sqrt{3}\, V\, e\, ic_i + ad) \qquad (44)$$

donde ic_i es la corriente del banco conectado en el nodo i del alimentador, e es la componente de costo variable que depende del tamaño del banco y está dada en S/./KVAR, d es la componente de costo fijo imputable a la instalación del banco en S/. .

El modelo de costos está sujeto a las siguientes condiciones:

$$\left.\begin{array}{l} ic_0 = 0 \\ a = 1 \quad \text{para} \quad ic_i \quad \text{mayor que} \quad 0 \\ a = 0 \quad \text{para} \quad ic_i \quad \text{igual a} \quad 0 \end{array}\right\} i = 1, \ldots, n \qquad (45)$$

FACULTAD DE INGENIERÍA
BIBLIOTECA
2892

En general, los capacitores no requieren ningún tipo de mantenimiento, sin embargo, para considerar los costos por inspección ocasional, costo de reemplazo de fusibles y otros accesorios de control y para tener en cuenta las pérdidas de los capacitores, se define una componente de costos en térmi

nos de desembolsos anuales, definida mediante :

$$Com = \sum_{k=1}^{N} h \sum_{i=1}^{n} \frac{(\sqrt{3}\ V\ e\ ic_i + ad)}{(1 + r)^k} \qquad (46)$$

donde h es el desembolso anual representado en p.u. del costo del banco de capacitores y r es la taza de actualización para traer a valor presente los gastos anuales. Combinando las ecuaciones (44) y (46) el modelo general de costos de los bancos de capacitores se escribe en los siguientes términos :

$$Ccom = \sum_{i=1}^{n} Ccomi = \sum_{i=1}^{n} (\sqrt{3}\ V\ e'\ ic_i + ad') \qquad (47)$$

$$\text{donde : } e' = e\left\{1 + \sum_{k=1}^{N} \frac{h}{(1 + r)^k}\right\} ,$$

$$d' = d\left\{1 + \sum_{k=1}^{N} \frac{h}{(1 + r)^k}\right\} .$$

1.5. Elevación de voltaje

Los capacitores proveen dos beneficios con respecto al voltaje. Los capacitores fijos elevan el nivel de voltaje a lo largo del alimentador, mientras que los capacitores conectables pueden reemplazar a los reguladores de voltaje en el alimentador, reguladores de voltaje en la barra de la subestación o transformadores con cambiador de tomas bajo carga.

Elevando los niveles de voltaje del alimentador, los capacitores fijos, reducen los costos de regulación. Un capacitor fijo no es un regulador de voltaje y no pueden ser directamente comparados. Sin embargo, respecto a la elevación de los niveles de voltaje los capacitores fijos reducen la gradiente de voltaje a lo largo del alimentador. En otras palabras, la relación del voltaje al final del alimentador y el voltaje

en la barra de la subestación, con cargas fuertes, se aproxima a la unidad si los capacitores fijos se aplican adecuadamente.

La caída de voltaje DV en alimentadores o líneas cortas, figura 8. , se calcula con la relación :

$$DV = |V_S| - |V_R|$$

$$DV = |V_S| - \left\{\sqrt{V_S^2 - (XIa - RI_r)^2} - RIa - XI_r\right\}$$

donde las componentes de la caída de voltaje en la resistencia R y la reactancia X de la impedancia Z_A del segmento del alimentador están dadas por las componentes activa Ia y reac-

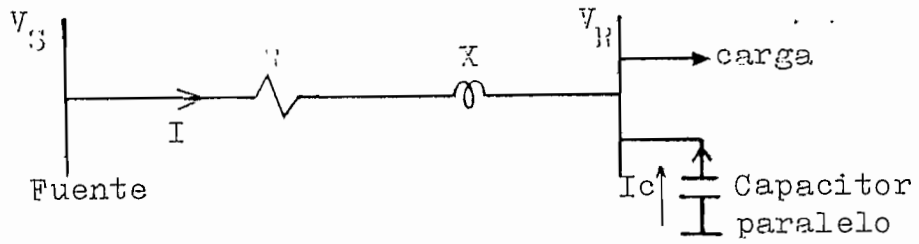


Figura 8. Diagrama unifilar de un alimentador.

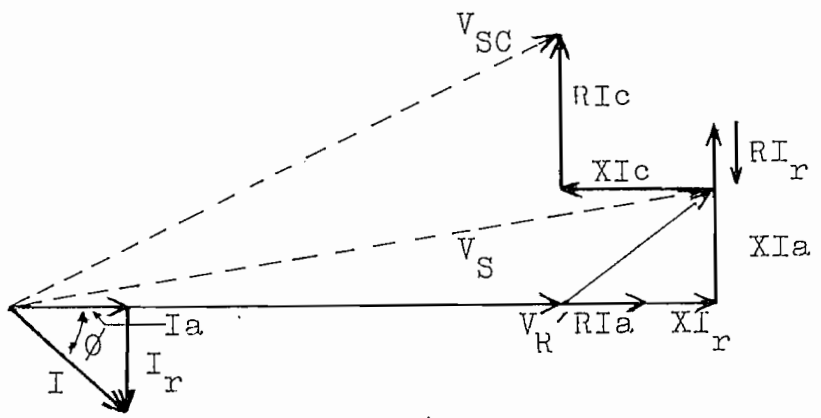


Figura 9. Efecto de la compensación capacitiva en la caida de voltaje.

tiva I_r , de la corriente neta I.

Si un capacitor se instala en paralelo al final de la línea, la caída de voltaje decrece o lo que es lo mismo, el voltaje en el terminal receptor V_R se eleva.

La nueva caída de voltaje DV' se calcula mediante la ecuación

$$DV' = |V_S| - \sqrt{|V_S|^2 - (XIa - R(I_r - Ic))^2} + RIa + X(I_r - Ic) \qquad (48)$$

Luego si Ic, se hace lo suficientemente grande, tanto que los términos RIa, XI_r, XIa y RI_r se consigan eliminar pueden existir problemas de sobrecompensación.

La ecuación (48), muestra que si la caída de voltaje se compensa en carga máxima con capacitores fijos, puede suceder que en carga mínima, donde Ia e I_r son pequeñas, la línea sea sobrecompensada, puesto que Ic depende unicamente del voltaje y no de la carga.

Por lo tanto puede ocurrir que en carga mínima la elevación de voltaje exceda el límite máximo normal de operación, lo cual representa una condición indeseable.

En consecuencia, es esencial considerar en el modelo de optimización una restricción del grado de compensación con capacitores fijos que tome en cuenta la elevación de voltaje durante las horas de mínima demanda.

Una fórmula que permite calcular la elevación de voltaje en las horas de carga mínima, en cualquier nodo de recepción R del alimentador, se puede determinar considerando el diagrama fasorial de la figura 10. , que muestra los fasores voltaje y corriente de una sección del alimentador entre los nodos S de envío y R de recepción. La ganancia G en la magnitud de voltaje entre los nodos S y R se determina como sigue :

el voltaje V_S en el nodo de envío está relacionado vectorialme con el voltaje V_R y la caída en el alimentador por medio de la ecuación :

$$V_S = V_R + I'min\ Z$$

o también,

$$|V_S|\cos\beta + j|V_S|\operatorname{sen}\beta = |V_R| + |I'minZ|\cos(\alpha + \varphi) + j|I'minZ|\operatorname{sen}(\alpha + \varphi)$$

igualando las partes real e imaginaria de la expresión dada :

$$|V_S| \cos\beta = |V_R| + |I'min\ Z| \cos(\alpha + \varphi) \tag{49}$$

$$|V_S| \operatorname{sen}\beta = |I'min\ Z| \operatorname{sen}(\alpha + \varphi) \tag{50}$$

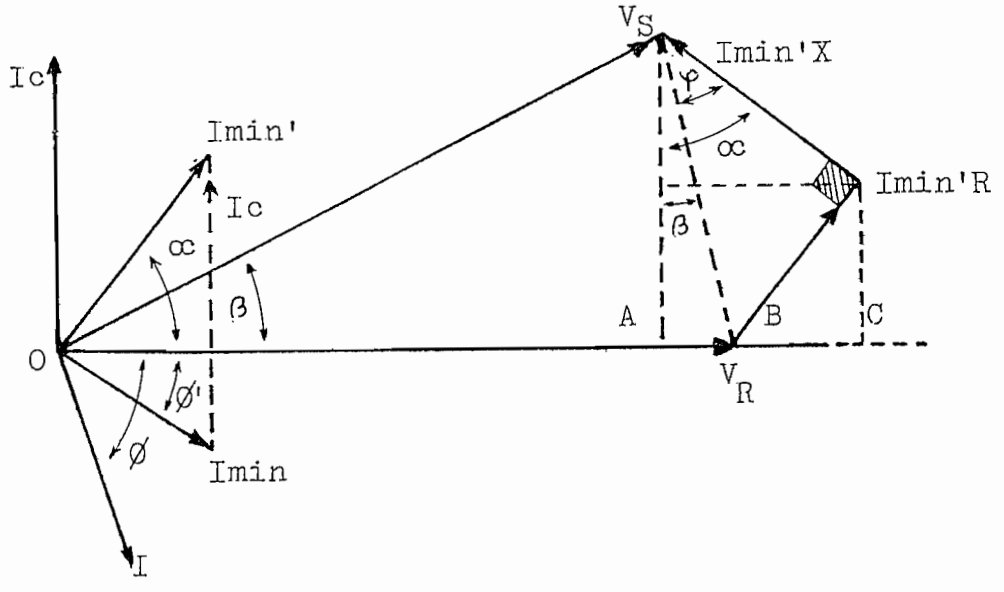


Figura 10. Determinación gráfica de la ganancia de voltaje

Luego de la ecuación (50)

$$|V_S| = |I'min\ Z| \operatorname{sen}(\alpha + \varphi) / \operatorname{sen}\beta \tag{51}$$

de la ecuación (49)

$$|V_R| = |V_S| \cos\beta - |I'min\ Z| \cos(\alpha + \varphi) \tag{52}$$

en donde las variables α, φ y β pueden determinarse por medio de las siguientes expresiones :

$$\operatorname{sen}\alpha = \frac{Ic - Imin \operatorname{sen}\emptyset'}{Imin'} \tag{53}$$

$$\operatorname{sen}\varphi = \frac{X}{(X^2 + R^2)^{1/2}} \tag{54}$$

$$\operatorname{sen}\beta = \frac{AB}{|I'min\ Z|} \tag{55}$$

en las ecuaciones anteriores se han definido los términos :

I'min corriente resultante de la suma vectorial de la corrien-

te de carga mínima Imin y la corriente suministrada por el banco de capacitores Ic

ϕ factor de potencia de la carga en máxima demanda

ϕ' factor de potencia de la carga en mínima demanda

Imin corriente neta en mínima demanda en un segmento del alimentador

Por otra parte, se puede definir la ecuación :

$$\cos \alpha = (1 - \text{sen}^2 \alpha)^{1/2}$$

Además, de la figura 10. ,

$$AB = AC - BC = I'min \; X \; \text{sen} \; \alpha - I'min \; R \cos \alpha \qquad (56)$$

reemplazando la ecuación (53) en (56)

$$AB = I'min \; X \; \left(\frac{Ic - Imin \; \text{sen} \; \phi'}{I'min}\right) - I'min \; R \left[1 - \left(\frac{Ic - Imin \text{sen}\phi'}{I'min}\right)^2\right]^{1/} \qquad (57)$$

Resolviendo,

$$AB = X(Ic - Imin\text{sen}\phi') - I'min R \left[1 - \left(\frac{Ic - Imin\text{sen}\phi'}{I'min}\right)^2\right]^{1/2} \qquad (58)$$

De la figura 10. ,

$$I'min = \left[(Imin \cos \phi')^2 + (Ic - Imin \; \text{sen}\phi')^2\right]^{1/2} \qquad (59)$$

Simplificando,

$$I'min = \left[(Imin^2 + Ic^2 - 2 \; Ic \; Imin \; \text{sen}\phi')\right]^{1/2} \qquad (60)$$

Por lo tanto una vez determinados todos los valores necesarios la expresión

$$G = |V_R| - |V_S| \qquad (61)$$

permite calcular el valor de la elevación de voltaje en las horas de mínima demanda en cualquier nodo de recepción, debida al flujo de corriente capacitiva Ic.

La corriente de minima demanda Imin se obtiene de la corrien

te de máxima demanda multiplicada por el factor de relación de demandas mínima a máxima en el alimentador.

CAPITULO II

DETERMINACION DE LA FUNCION OBJETIVO DEL PROBLEMA

La mayoría de los sistemas cuyo tamaño y complejidad requieren la simulación de su operación deben cumplir con muy diversos objetivos. Para determinar el grado con el cual los sistemas cumplen sus objetivos se establece las medidas de efectividad y si estas se pueden reducir a la misma escala y sumarse, es factible establecer una sola función objetivo. Si existe esta función única, se puede emplear alguna técnica de optimización para llegar a la mejor solución. Establecida la medida de efectividad que agrupe a todos los objetivos del sistema, la búsqueda de la mejor solución es una operación matemática que se realiza en el paso de la generación y la evaluación de alternativas.

El problema que trata este trabajo tiene como objetivo encontrar la adecuada instalación de bancos de capacitores a lo largo de un alimentador primario que permita minimizar las pérdidas de energía en él, lo cual a su vez permitirá maximizar los beneficios a ser alcanzados mediante esta óptima instalación.

La función objetivo requerida se puede establecer relacionando los modelos matemáticos de los beneficios debidos a la reducción de pérdidas de energía considerando los factores de crecimiento, beneficios por liberación de capacidad del sistema y los costos de los bancos de capacitores a ser instalados, cantidades que pueden reducirse a una escala de beneficio expresada en unidades monetarias. Esta función objetivo está sujeta a restricciones de tipo lineal y no lineal, y es función de los flujos de corriente capacitiva en las seccio-

del alimentador.

2.1. Definición y alcance

La función objetivo que permite optimizar la instalación de capacitores se define en la siguiente expresión :

F = beneficios por reducción de pérdidas de energía
+ beneficios alcanzados por la liberación de capacidad del alimentador
+ beneficios alcanzados por la liberación de capacidades en otras partes del sistema (subestaciones, líneas y generación).
- Costo de los bancos de capacitores (62)

Las ecuaciones (25) y (31) definidas en el capítulo anterior para la instalación de capacitores fijos y conectables respectivamente, permiten calcular los beneficios alcanzados por la reducción de pérdidas de energía.

La liberación de capacidad es efectiva en todo el equipamiento entre el capacitor y la fuente. Esto incluye alimentador, subestación de distribución, líneas de subtransmisión, líneas de transmisión, subestación de potencia y generadores.

Aunque los beneficios por liberación de capacidad del alimentador son considerables e influencian la instalación de los bancos a lo largo del alimentador, este beneficio es solo teórico. La capacidad del alimentador limitada por la regulación de voltaje se alcanza en la mayoría de los casos, más rapidamente que la capacidad térmica.

En los países desarrollados la capacidad térmica nunca se alcanza debido a la robustez de los alimentadores.

Además los alimentadores se diseñan y construyen en base a períodos largos de tiempo, considerando adecuadas previsiones en la capacidad del alimentador para programar el

crecimiento de carga esperado en el área.

En consecuencia debido a que la capacidad del alimentador está planificada para desarrollos de carga programados, por lo general, la capacidad liberada por los capacitores no se requerirá y por lo tanto no se considerará ningún beneficio económico práctico.

Si este beneficio se lo considera en el modelo de optimización de todos los alimentadores puede conducir a resultados equivocados y los beneficios que realmente se consiguen pueden desplazarse por esta ganancia teórica y la instalación de capacitores puede resultar perjudicial para la economía del sistema.

Por lo tanto el segundo término de la ecuación (62) debe ser tratado como una componente particular propia de cada alimentador analizado.

La capacidad liberada entre la subestación de distribución y las fuentes generadoras disminuye posibles condiciones de sobrecarga y puede servir para suplir un eventual incremento de carga. Esto es especialmente importante ya que las empresas eléctricas sirven a cargas con crecimientos rápidos.

Por otro lado, si el factor de potencia es corregido a valores cercanos a uno, el voltaje para condiciones de mínima carga podría ser excesivo. Surgen aquí dos alternativas : considerar en el modelo de optimización una restricción a la elevación de voltaje o utilizar capacitores conectables.

Definidos estos criterios, se procede a definir la función objetivo para cada uno de los tipos de capacitores.

2.2. Selección óptima de capacitores fijos

La cantidad de potencia reactiva añadida a un alimentador mediante la instalación de capacitores y el lugar donde debe ubicarse depende de la distribución de cargas, tamaño del conductor, factor de potencia de la carga y condiciones de voltaje.

La función objetivo que permite determinar la instalación óptima de capacitores en cuanto a número, localización y tamaño, a lo largo de alimentadores radiales se puede expresar relacionando las ecuaciones (25),(42),(43),(47) como una función de los flujos de corriente capacitiva en las secciones del alimentador, esto es :

Ff = beneficios por reducción de pérdidas de energía
+ beneficio por liberación de capacidad del alimentador
+ beneficios por liberación de capacidad del sistema
- costo de los bancos de capacitores fijos

$$Ff = \sum_{i=1}^{n} CRPEi(Ic_i) + CLCA(Ic_i) + CLCS(Ic_1) - \sum_{i=1}^{n} \left\{ \sqrt{3}\, V\, e'\, ic_i + ad' \right\} \qquad (63)$$

La restricción principal es que la elevación de voltaje, G, dada por la ecuación (61), durante las horas de carga liviana en cualquier nodo del alimentador no exceda un límite especificado. Si G , se establece en un valor menor o igual a cero, el nivel de voltaje en todos los nodos será menor o igual al voltaje de la fuente. Esta restricción tiene la forma :

$$G(Ic_i) \leq 0 \quad , \quad i = 1,2, \ldots, n \qquad (64)$$

2.3. Selección óptima de capacitores conectables

La función objetivo que permite determinar la instalación óptima de bancos de capacitores conectables en adición a los capacitores fijos a lo largo del alimentador primario, se puede establecer en forma similar, relacionando las ecuaciones (31),(42),(43),(47) esto es :

Fc = beneficio por reducción de pérdidas de energía
+ beneficio por liberación de capacidad del alimentador mediante la instalación de capacitores fijos y conectables
- beneficio por liberación de capacidad del alimentador mediante la instalación de capacitores fijos
+ beneficio por liberación de capacidad del sistema mediante la instalación de capacitores fijos y conectables
- beneficio por liberación de capacidad del sistema mediante la instalación de capacitores fijos
- costo de los bancos de capacitores conectables

$$Fc = \sum_{i=1}^{n} CRPE'i(Ic_i') + CLCA(Ic_i'+Ic_i) - CLCA(Ic_i) + CLCS(Ic_1'+ Ic_1) - CLCS(Ic_1) - \sum_{i=1}^{n}\left[\sqrt{3}\ V\ e'\ ic_i' + ad'\right] \qquad (65)$$

donde ic_i', es la corriente capacitiva de los capacitores conectables. La corriente capacitiva de los capacitores fijos Ic_i, la cual es conocida de antemano, se ajustará con los flujos de corriente inductiva en las secciones del alimentador y solo los flujos de corriente inductiva neta serán substituidos en la ecuación (31). Esto significa que el término

$$I_{ri}(1 + g)^k \quad \text{en la ecuación (31)}$$

se reemplaza por un término

$$I_{ri}(1 + g)^k - Ic_i$$

Puesto que los capacitores conectables no están en servicio durante las horas fuera de pico, la restricción de elevación de voltaje no necesita considerarse en este caso.
Luego, el problema planteado de seleccionar la instalación óptima de capacitores paralelo a lo largo de un alimentador radial, es un proceso de determinación de los flujos de co-

rriente capacitiva en las diferentes secciones del alimentador que permitan maximizar los beneficios netos dados por las ecuaciones (63) y (65) sujetos a restricciones lineales y no lineales.

CAPITULO III

METODO DE LAS VARIACIONES LOCALES

La exploración de alternativas necesita realizarse de manera ordenada y observando la variación que sufren las medidas de efectividad al cambiar ciertas características del sistema con la finalidad de seguir manejando aquellas que afecten en forma más pronunciada a la función objetivo.

En este paso es frecuente recurrir a técnicas de optimización, estando entre las más importantes, la programación lineal y la programación dinámica.

La técnica de programación lineal permite encontrar para cierto tipo de modelos de sistemas definidos por funciones objetivo y restricciones lineales, los parámetros que optimicen la medida de efectividad determinando aquellos cuya variación tiene mayor efecto sobre la función objetivo. La estructura de los problemas que pueden resolverse con esta técnica es siempre la misma, de manera que contando con un buen programa para la solución de estos, pueden resolverse sin necesidad de tener que escribir programas especiales para la solución de problemas específicos.

En otro tipo de modelos de sistemas, definidos por funciones objetivo y restricciones que pueden ser no lineales, es necesario recurrir a la programación dinámica, a fin de encontrar las alternativas con las mejores medidas de efectividad, en la cual se enumera en forma explícita diversas combinaciones posibles de variables y se selecciona entre ellas la mejor.

En el análisis de sistemas, la programación dinámica se usa en general en problemas de toma de decisiones, frecuentemente relacionados con la asignación de recursos.

No obstante, esta técnica presenta dos obstáculos que impiden su utilización en forma más amplia : en primer lugar, la estructura de los problemas que pueden resolverse utilizando esta técnica no es siempre la misma, es decir no existen modelos generalizados y con frecuencia se necesita desarrollar programas particulares para obtener la solución de un problema específico; por otra parte, como se trata de una técnica enumerativa se requieren grandes tiempos de computación y gran capacidad de memoria. Debido a ello, el empleo de esta técnica es un tanto limitado a pesar de su extensivo número de aplicaciones potenciales.

En años recientes, se ha desarrollado un nuevo método para resolver problemas variacionales, el cual tiene relación con la técnica de programación dinámica. Esta técnica llamada "Método de las Variaciones Locales", no es una técnica de enumeración de posibles soluciones y posterior búsqueda de entre ellas de la óptima, por lo tanto no requiere de tiempo y capacidad de memoria grandes.

Cada una de estas técnicas de optimización imponen tanto a la función objetivo como a las restricciones, determinadas condiciones y entre más estrictas son estas, tanto más eficiente es la técnica de optimización correspondiente.

La técnica de las variaciones locales es un método de búsqueda directa que depende de la comparación de los valores de la función objetivo en dos o más puntos.

Los métodos directos para resolver problemas variacionales con funciones de una o más variables no requieren para su aplicación que la función sea diferenciable o contínua. La función tiene que ser unicamente calculable, es decir, se

debe poder evaluar el valor de la variable dependiente si se conocen los valores de las variables independientes.

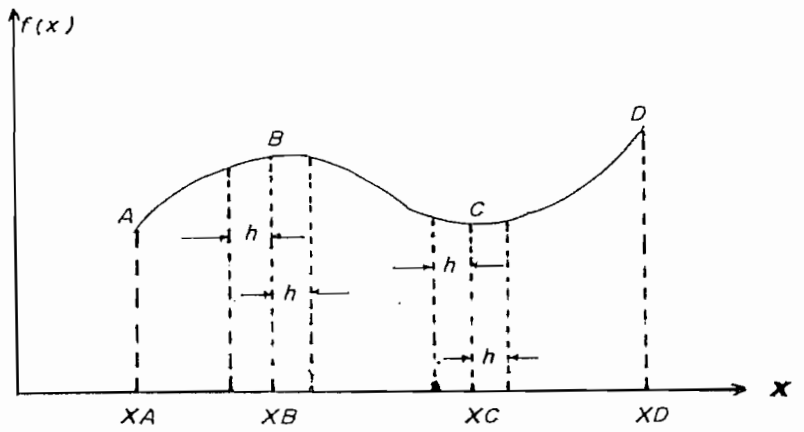
3.1. Conceptos y definiciones

. Variable de decisión : es aquella variable que puede manipularse para obtener determinado cambio en la función objetivo.

. Variables de estado : conjunto de variables cuyo valor es necesario conocer en un instante dado, para poder determinar el nuevo estado del sistema en un instante posterior, frente a un cambio de las variables externas del sistema.
Así por ejemplo, en un circuito eléctrico es necesario conocer el voltaje en todos los capacitores y la corriente en todas las inductancias en el instante t_1 , para poder determinar el nuevo estado del sistema en el instante t_2 , conocidas todas las variaciones en el intervalo $t_2 - t_1$.

. Máximos y mínimos : se dice que la función $f(x)$ tiene un máximo o un mínimo local en el punto $x = x_1$, en el intervalo : $a \leqslant x_1 \leqslant b$, si solamente se cumple que $f(x)$ es mayor o menor en $x = x_1$ que en otro punto de la vecindad de x_1, donde esta vecindad puede estar tan próxima del punto x_1 como se quiera.
Por otra parte, se dice que la función $f(x)$ tiene un máximo o mínimo absoluto en el intervalo $a \leqslant x \leqslant b$ en el punto $x = x_o$, $a \leqslant x_o \leqslant b$, si $f(x)$ es mayor o menor en $x = x_o$ que en cualquier otro punto del intervalo (a,b).

La figura 11 ilustra estos conceptos.



Punto A: mínimo absoluto $f(x_A) \leq f(x)$, $x_A \leq x \leq x_D$

Punto B: máximo local $f(x_B) \geq f(x_B \pm h)$

Punto C: mínimo local $f(x_C) \leq f(x_C \pm h)$

Punto D: máximo absoluto $f(x_D) \geq f(x)$, $x_A \leq x \leq x_D$

Figura 11. Mínimos y máximos locales y absolutos de una función.

. Funcional : el término funcional es utilizado para describir funciones cuyos argumentos son otras funciones.

3.2. Descripción del método

El método de las variaciones locales encuentra el mínimo local de funciones. Con respecto al método de programación dinámica, reduce el número de operaciones y la cantidad de información almacenada durante la solución. Es aplicable a funciones de cualquier número de variables[8] .

La descripción se ilustra con el ejemplo de un problema de cálculo variacional:

Encontrar la función u(t) que satisfaga las condiciones u(a)= A, u(b)= B y que haga el funcional :

$$I = \int_a^b f(t,u,\dot{u})\, dt \qquad \text{un mínimo} \qquad (66)$$

El punto denota diferenciación con respecto a t.
Se divide el intervalo (a,b) en N intervalos iguales por medio de los puntos $t_k = a + kT$, donde $T = (b-a)/N$ y $k = 0, 1, 2, \ldots, N$
Introduciendo la notación

$$I_k(u',u'') = Tf\left(\frac{t_{k-1} + t_k}{2} , \frac{u' + u''}{2} , \frac{u'' - u'}{T} \right) \qquad (67)$$

Nótese que $I_k(u',u'')$ es el valor aproximado de la integral

$$I_k(u',u'') \approx \int_{t_{k-1}}^{t_k} f(t,u(t),\dot{u}(t))\, dt$$

con las condiciones $u' = u(t_{k-1})$, $u'' = (t_k) = u_k$. Luego los puntos (t_k,u_k) definen la función u(t). En este instante se puede reemplazar el funcional I, ecuación (66) por la suma

$$I \simeq \sum_{k=1}^{N} I_k\,(u_{k-1},u_k) \qquad (68)$$

El problema de encontrar los extremos u(t) de (66) se reduce por lo tanto a encontrar los números u_k que minimizen la función (68).

La solución se encuentra por aproximaciones sucesivas. La aproximación cero, $u_k^{(o)}$, debe satisfacer las condiciones límites $u = A$, $u_{(o)N} = B$, pero esto puede ser arbitrario (las consideraciones tanto cualitativas como físicas asociadas con el problema específico deben ser tomadas en cuenta en esta elección). Suponiendo que la n-ésima aproximación, es decir los números $u_k^{(n)}$ se conocen, (donde $k = 0, 1, 2, \ldots, N$ y $n > 0$ es un entero) y describiendo el proceso recurrente para determinar la (n+1)-ésima aproximación, se define primero los puntos $u_o^{(n+1)} =$

$= u_o^{(n)} = A$, $u_N^{(n+1)} = u_N^{(n)} = B$. Se asume que los primeros k $(1 \leqslant k \leqslant N-1)$ números de la (n+1)-ésima aproximación se conocen, es decir $u_o^{(n+1)}$, $u_1^{(n+1)}$, . . . , $u_{k-1}^{(n+1)}$ ya se han encontrado . Luego se calcula las cantidades :

$$F_k = I_k(u_{k-1}^{(n+1)}, u_k^{(n)}) + I_{k+1}(u_k^{(n)}, u_{k+1}^{(n)})$$

$$F_k^+ = I_k(u_{k-1}^{(n+1)}, u_k^{(n)}+h) + I_{k+1}(u_k^{(n)}+h, u_{k+1}^{(n)}) \qquad (69)$$

$$F_k^- = I_k(u_{k-1}^{(n+1)}, u_k^{(n)}-h) + I_{k+1}(u_k^{(n)}-h, u_{k+1}^{(n)})$$

donde $h>0$ es suficientemente pequeño y se puede encontrar cual de estas cantidades es la más pequeña.

Si $F_k = F_k^+ < F_k^-$ o $F_k = F_k^- < F_k^+$, se toma F_k como la más pequeña; si $F_k^+ = F_k^- < F_k$, se toma cualquiera de las dos cantidades F_k^+ o F_k^- .

Ahora se hace $u_k^{(n+1)}$ igual a $u_k^{(n)}$, $u_k^{(n)} + h$ o $u_k^{(n)} - h$ dependiendo de cual de las tres cantidades (F_k , F_k^+, F_k^-) es la menor. Se encuentra luego $u_{k+1}^{(n+1)}$ de la misma manera y se continúa hasta que $u_{N-1}^{(n+1)}$ se ha encontrado. La (n+1)-ésima, aproximación por lo tanto se conoce completamente.

En cada paso de este proceso el nuevo valor de u_k se elige de tal forma que la suma de los dos términos de la ecuación (68), la cual depende de u_k , se reduzca. En la figura 12 se muestra en línea cortada los puntos (t_k, u_k) y las variaciones que pueden darse al evaluarse los tres valores de la funcional y que se analizan durante la solución . De los tres caminos que conectan los puntos

(t_{k-1},u_{k-1}) y (t_{k+1},u_{k+1}) se elige aquel que proporciona el menor valor de la función (68) y esto determina el nuevo valor de u_k. Durante el proceso, la función (68) no se incrementa. Si no hay cambio de aproximación a aproximación (es decir, que $u_k^{(n+1)} = u_k^{(n)}$ para $0 \leqslant k \leqslant N$) se debe disminuir el paso h, dividiéndolo por ejemplo, y continuar el proceso iterativo.

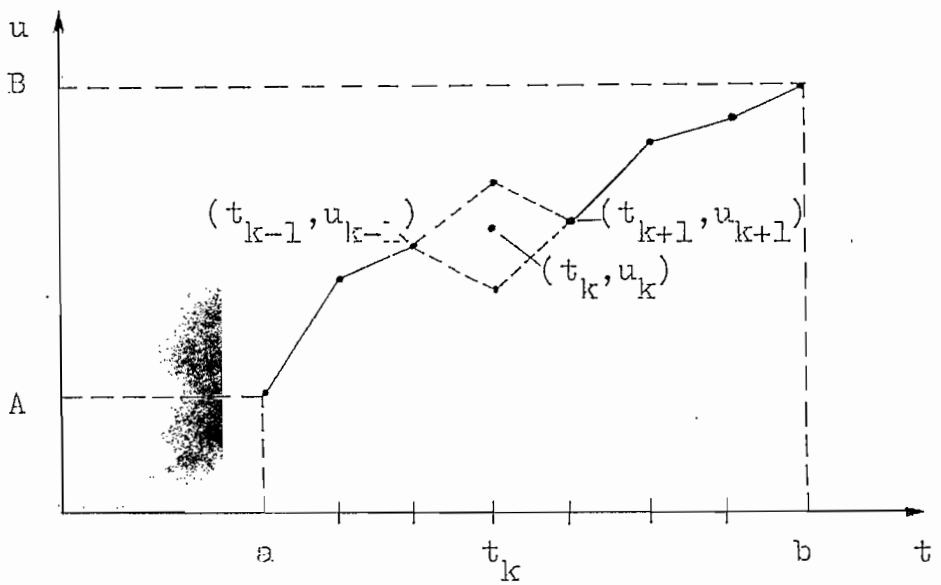


Figura 12. Estados y trayectorias del problema variacional.

Si la condición $h \ll T$ se satisface y la reducción adicional de h no conduce a una reducción de la función I, ecuación (68), entonces debe reducirse T , duplicando N, por ejemplo. Luego se fija h aproximadamente igual a T y se repite el mismo proceso reduciendo h para T fijo. Cuando se han realizado estas reducciones sistemáticas y las cantidades T y h/T son suficientemente pequeñas y ninguna reducción adicional conduce a un significativo cambio en el valor de la función I, el proceso finaliza.

La línea de puntos que se obtiene de los valores de u_k encontrados, aproxima a I al mínimo requerido.

No es necesario examinar los tres caminos de la figura 12. para encontrar el valor más pequeño de las tres cantidades F_k , F_k^+ , F_k^- . Es suficiente estar seguro que :

$$F_k^+ < F_k \quad o \quad F_k^- < F_k \ ,$$

puesto que esto ya determina que el funcional I se pueda reducir.

Los casos en los cuales tanto

$$F_k^+ < F_k \quad \text{como} \quad F_k^- < F_k$$

ocurren en las secciones donde I tiene un máximo y esto ocurre muy rara vez.

Restricciones de la forma $\phi\,(t,u) \geqslant 0$ para el intervalo $a \leqslant t \leqslant b$ aplicadas a los extremos requeridos facilmente se introducen en los modelos de optimización. Se consideran prohibidas aquellas variaciones que pueden conducir a una violación de esas restricciones y en cada paso se debe comparar solo las trayectorias que no entran en la región prohibida.

Este método se puede utilizar para la solución numérica de diversos tipos de problemas variacionales.

3.3. Aplicación del método a la función objetivo de maximización de beneficios obtenidos mediante la apalicación de capacitores paralelo en alimentadores de distribución. El problema variacional para el caso de los capacitores fijos se puede establecer bajo la siguiente forma [9] :

$$\text{Maximizar}_{Ic_1, \ldots, Ic_n} \; F_f(k) = \sum_{i=1}^{n} CRPEi(Ic_i) + CLCA(Ic_i) + CLCS(Ic_1) - \sum_{i=1}^{n} \left\{ \sqrt{3}\, V\, e'\, ic_i + a\, d' \right\} \qquad (70)$$

sujeta a restricciones de elevación de voltaje en horas de mínima demanda G, en cada nodo del alimentador, es decir,

$$G(Ic_i) \leqslant 0 \quad i = 1, 2, \ldots, n \qquad (71)$$

y además restricciones en el modelo de costos de los bancos de capacitores,

$$Ic_i \geqslant Ic_{i+1} \quad , \quad i = 1, 2, \ldots, n-1 \qquad (72)$$

$$\left.\begin{array}{ll} a = 1 \text{ para } ic_i \text{ mayor que } 0 & (73) \\ a = 0 \text{ para } ic_i \text{ igual a } 0 & (74) \end{array}\right\} i = 1, \ldots, n$$

Los nodos se enumeran desde la fuente, subestación de distribución, hacia el punto más alejado del alimentador.

Para el caso de los capacitores conectables el problema variacional puede establecerse bajo la forma :

$$\text{Maximizar}_{Ic_1, \ldots, Ic_n} \; F_c(k) = \sum_{i=1}^{n} CRPEi'(Ic_i') + CLCA(Ic_i'+Ic_i) - CLCA(Ic_i) + CLCS(Ic_1'+Ic_1) - CLCS(Ic_1) - \sum_{i=1}^{n} \left\{ \sqrt{3}\, V\, e'\, ic_i' + a\, d' \right\} \qquad (75)$$

sujeta a restricciones en el modelo de costos de los bancos de capacitores, dadas por :

$$Ic'_i \geq Ic'_{i+1} \quad , \quad i = 1, \ldots, (n-1) \tag{76}$$

$$\left.\begin{array}{l} a = 1 \quad \text{para} \quad ic_i' \quad \text{mayor que} \quad 0 \\ a = 0 \quad \text{para} \quad ic_i' \quad \text{igual a} \quad 0 \end{array}\right\} \tag{77}$$

$$\text{para} \quad i = 1, \ldots, n \tag{78}$$

3.4. Algoritmo de solución

Los terminales de los segmentos de línea se identifican como los diferentes estados del problema y en cada uno de ellos la corriente capacitiva que fluye del nodo debida al capacitor conectado ic_i , se considera como la variable de estado. El flujo de corriente acumulada en cada segmento del alimentador es la variable de decisión. Un cambio en la variable de decisión se alcanza variando el tamaño de los bancos de capacitores conectados a los nodos, en pasos dados por el mínimo tamaño del capacitor disponible.

Dada una trayectoria inicial de unidades capacitivas conectadas a todos los nodos, elegida dando cualquier valor a k, comprendido entre cero y el número máximo de unidades capacitivas NCM que pueden conectarse a un nodo. Esto da como resultado, un flujo de corriente Ic_i ($i = 1, \ldots, n$) en todas las secciones del alimentador, ecuaciones (71) a (74) para los capacitores fijos y ecuaciones (76) a (78) para los capacitores conectables.

Luego comenzando desde el estado i-ésimo (i = 1, . . , n+1) se cambia la trayectoria de estado inicial instalando una unidad adicional del número de capacitores conectados al i-ésimo nodo, lo cual da como resultado un cambio en Ic_j , (j = 1, . . . , i-1) en un valor $\triangle$ Ic .

Como un primer paso se añade una unidad capacitiva al i-ésimo nodo asignando al estado anterior k, el nuevo estado k+1, conservando todos los otros estados inva - riables.

La corriente capacitiva resultante esta dada por :

$$Ic_j = Ic_j + \triangle ic \qquad , \qquad j = 1, \ldots , (i - 1) \tag{79}$$

Luego se realizan comprobaciones para examinar si :

a. Este cambio en el valor de estado satisface las restricciones :

a.1. Para capacitores fijos

$$G(Ic_i) \leqslant 0 \qquad \text{para } i = 1, \ldots , n$$

$$Ic_i \geqslant Ic_{i+1} \qquad \text{para } i = 1, \ldots , n-1$$

$$\left.\begin{array}{l} a = 1 \quad \text{para} \quad ic_i \quad \text{mayor que} \quad 0 \\ a = 0 \quad \text{para} \quad ic_i \quad \text{igual a} \quad 0 \end{array}\right\}$$

$$i = 1, \ldots , n$$

a.2. Para capacitores conectables

$$Ic'_i \geqslant Ic'_{i+1} \qquad \text{para } i = 1, \ldots , n-1$$

$$\left.\begin{array}{l} a = 1 \quad \text{para} \quad ic_i' > 0 \\ a = 0 \quad \text{para} \quad ic_i' = 0 \end{array}\right\} \; i = 1, \ldots, n$$

y

b. Si el valor de la función objetivo F(k+1) para el nuevo estado es mayor que el valor de la función objetivo F(k) para el valor anterior en el i-ésimo nodo, calculando la variación de la función objetivo en las secciones $j = 1, \ldots, (i-1)$, en las cuales el flujo de corriente capacitiva cambió.

Si las respuestas a estas preguntas son afirmativas, el valor del i-ésimo estado, se coloca en el nuevo valor. Si las respuestas son negativas, k se asigna al estado k-1, removiendo una unidad capacitiva en el i-ésimo nodo. Este cambio en el valor de estado resulta en una disminución de las corrientes capacitivas Ic_j dada por

$$Ic_j = Ic_j - \triangle ic \qquad , j = 1, \ldots, i-1 \qquad (80)$$

Si esto se comprueba positivamente, el i-ésimo estado se cambia del valor de trayectoria inicial a este nuevo valor de estado. De otro modo, el valor anterior se mantiene y la operación variacional se desarrolla en el (i+1)-ésimo estado.

En esta forma la operación de variaciones locales se aplica sucesivamente hasta el (n+1) estado, hasta completar una iteración. La trayectoria resultante al final de una iteración constituye la trayectoria inicial para la próxima iteración.

Este proceso continúa hasta cuando se alcance un incremento en el valor de la función objetivo en cada iteración.

Si se alcanza una mejora en la función objetivo mediante un cambio en el valor de un estado particular, el proceso variacional se traslada inmediatamente al próximo estado manteniéndose en este nuevo valor.

Si el valor de la función objetivo permanece inalterado en una iteración particular, cuando el cálculo variacional se realiza en todos los estados, termina el proceso alcanzando el mayor valor de la función objetivo y definiendo la instalación óptima de capacitores.

CAPITULO IV

APLICACIONES

El algoritmo descrito en el capítulo anterior se aplica al estudio de dos alimentadores primarios de distribución. En primer lugar, se analiza un alimentador radial tomado de la referencia 8 y posteriormente con el fin de demostrar la aplicabilidad del estudio a nuestro medio se realiza un ejemplo práctico analizando el alimentador C de la Subestación Epiclachima, del sistema de distribución de la Empresa Eléctrica Quito.

4.1. Ejemplo No. 1 En la figura 13 se presenta la configuración de un alimentador de distribución que sirve a una área rural con carga no uniforme y a un voltaje de servicio de 11 KV.

4.1.1. Datos generales del sistema

Los datos requeridos por el programa digital son :

1. Mínimo tamaño de la unidad capacitiva : 50 KVAR
2. Costo fijo por instalación del banco : S/ 500
3. Costo variable del banco de capacitores : S/ 100/KVAR
4. Cargas anuales por mantenimiento de los bancos (p.u. sobre el capital) : 0.05
5. Costo de capacidad de la subestación : S/ 60.38/KVA

6. Costo actual de energía : S/. 0.3/kwh
7. Taza de crecimiento del costo de energía : 1%
8. Taza de actualización : 1%
9. Factor de potencia : 0.7
10. Factor de carga presente : 0.2
11. Factor de carga futuro : 0.45
12. Taza de crecimiento de la carga : 10%
13. Período de crecimiento de la carga : 7 años
14. Relación de carga mínima a máxima : 0.2

En el apéndice A se detalla la hoja de codificación de los datos requeridos para analizar este ejemplo.

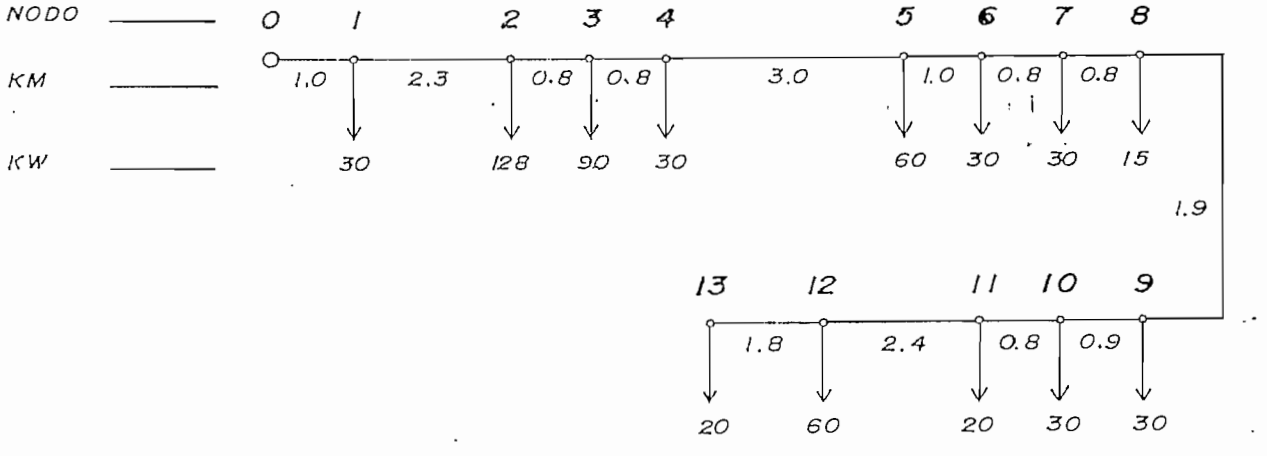


Figura 13. Alimentador de distribución de una área rural

4.1.2. Resultados de la instalación de capacitores fijos

Con los datos descritos anteriormente, se corre el programa para obtener resultados con las condiciones iniciales impuestas. Para el cálculo de los beneficios económicos por reducción de pérdidas de energía y liberación de capacidad de la subestación se analiza el alimentador en la condición de máxima demanda y la restricción de elevación de voltaje se considera aplicando la relación de demanda mínima a máxima a los valores de carga suministrados en cada nodo del alimentador.

Los resultados obtenidos mediante la aplicación del método propuesto se detallan en la tabla 1.

Pérdidas de energía sin capacitores :	S/ 263321
Beneficios por reducción de pérdidas de energía :	S/ 65470
Beneficios por liberación de capacidad de la S/E:	S/ 5993
Costo de los bancos de capacitores :	S/ 24314
Beneficio neto por instalación de los bancos :	S/ 47149
Localización y capacidad de los bancos de capacitores, nodo(tamaño) :	8(50), 10(50), 12(50)
Número de bancos de capacitores :	3
Capacidad total instalada en el alimentador :	150 KVAR

Tabla 1. Pérdidas, beneficios e instalación óptima de capacitores para el alimentador del Ejemplo 1.

Se observa que la relación de ahorros por reducción de pérdidas de energía mediante la instalación de capacitores a la pérdida de energía sin capacitores, alcanza un valor del 25% y la relación de beneficios a costos de instalación de los bancos de capacitores es aproximadamente 3 y por lo tanto el proyecto de instalación de capacitores está justificado económicamente.

La instalación óptima de capacitores a lo largo del alimentador de distribución está dada principalmente por la reducción de pérdidas de energía. Si el costo de incrementar la capacidad de la subestación (S/KVA) es bajo, la influencia de este parámetro no es pronunciada.

En la tabla 2. , se presentan los niveles de voltaje en los nodos del alimentador, antes y después de la instalación de capacitores paralelo fijos para condiciones de máxima y mínima demanda.

Nodo	MAXIMA DEMANDA		MINIMA DEMANDA
	Voltaje sin capacitores (p.u.)	Voltaje con capacitores (p.u.)	Voltaje con capacitores (p.u.)
0	1.	1.	1.
1	0.995	0.996	0.999
2	0.987	0.988	0.998
3	0.984	0.986	0.998
4	0.983	0.985	0.998
5	0.974	0.977	0.998
6	0.972	0.975	0.998
7	0.969	0.973	0.998
8	0.967	0.972	0.998
9	0.963	0.968	0.997
10	0.962	0.967	0.997
11	0.961	0.966	0.997
12	0.958	0.964	0.997
13	0.957	0.963	0.997

TABLA 2. Niveles de voltaje antes y después de instalar capacitores fijos en demanda máxima y mínima.

Se observa que la instalación de capacitores, eleva los niveles de voltaje en todos los nodos a lo largo del alimentador, lo que puede apreciarse en la figura 14. Así mismo, los niveles de voltaje en las horas de mínima demanda en ningún caso exceden el voltaje nominal de servicio del alimentador, debido a la restricción de voltaje, que limita el grado de compensación con capacitores fijos.

Para determinar los efectos del crecimiento de la carga, crecimiento del factor de carga, incremento del costo de energía, y cambio en el costo de capacidad de la subestación, cada uno de estos parámetros se variará independientemente desde un mí-

nimo hasta un valor máximo, conservando los parámetros restantes constantes. Los resultados se tabulan en las tablas 3,4,5 y 6.

En la tabla 3., se observa que el efecto del crecimiento de la carga sobre el alimentador a lo largo de la vida útil de los capacitores es el factor que más influye sobre la instalación de los capacitores en lo que se refiere a número, tamaño y localización de los mismos. A medida que la taza de crecimiento de la carga aumenta, en la misma forma varía el número de bancos instalados, esto tiene su explicación en el hecho de que la función objetivo alcanza valores más altos debido al aumento de la taza de crecimiento de la carga, de manera que la adición de un banco permite obtener beneficios que justifican la inversión de capital en dicha instalación adicional.

En la tabla 4., se aprecia que el cambio en el valor del factor de carga presente no afecta de manera pronunciada la instalación de bancos de capacitores y para una gran variación de este parámetro los resultados muestran la tendencia a mantener el mismo número, localización y tamaño de los bancos a lo largo del alimentador.

En la tabla 5., se observa que la variación de la taza de crecimiento del costo de energía no influye de manera pronunciada sobre la instalación de bancos. Esto se debe a que esta variación es de pequeña magnitud lo cual no afecta de manera notable en el valor de la función objetivo, haciendo que los resultados no cambien para los diferentes valores de taza de incremento del costo de energía.

En la tabla 6., la variación del costo de capacidad de la subestación afecta de manera pronunciada a la instalación de capacitores, manifestándose en una tendencia a ubicar bancos adicionales más próximos a la fuente.

En la figura 15. se aprecia la curva de reducción de pérdidas de energía alcanzada mediante la instalación de un banco de capacitores de 150 KVAR de capacidad en todos los nodos del alimentador, observándose que la localización que aproxima la reducción de pérdidas a su máximo valor se encuentra aproximadamente a una distancia de 12 kilómetros, es decir a los 2/3 de la longitud del alimentador medidos desde la S/E.

Sin embargo, mediante la aplicación del método de variaciones locales se determina que la instalación óptima de capacitores que permite obtener la mayor reducción de pérdidas de energía se alcanza instalando tres bancos de capacitores de 50 KVAR de capacidad cada uno distribuídos en tres nodos del alimentador, lo cual demuestra la bondad del método.

En las figuras 16. y 17. se presentan familias de curvas que resultan de evaluar la reducción de pérdidas de energía para diferentes valores de los factores de crecimiento de la carga, del factor de carga e incrementos anuales del costo de energía.

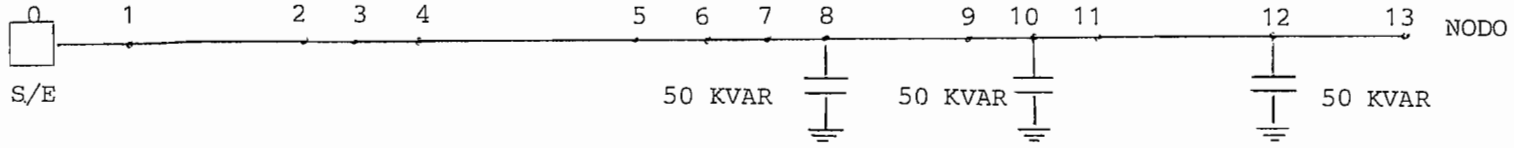
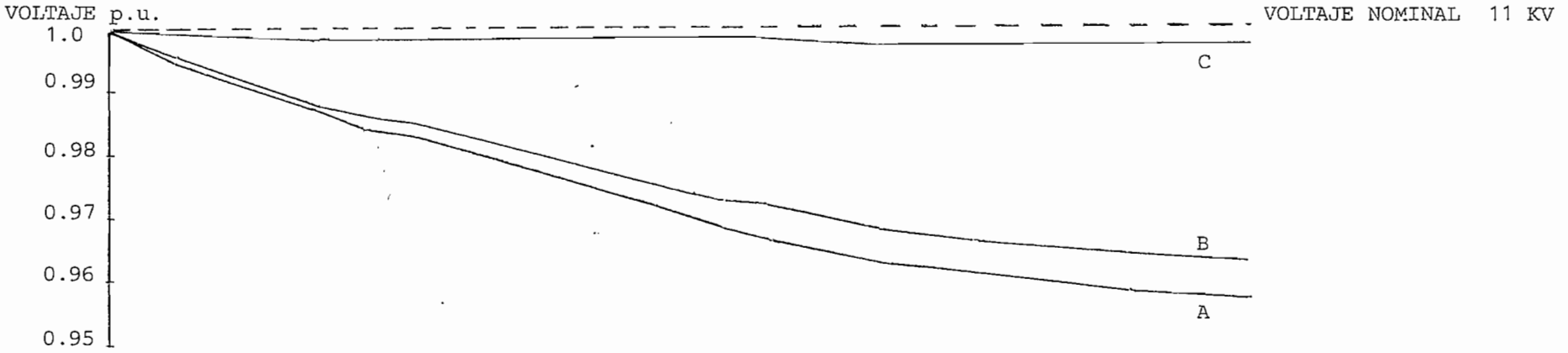


FIGURA 14. (a) Ubicación óptima de capacitores



CURVA A : perfil de voltaje sin capacitores (carga máxima)

CURVA B : perfilde voltaje con capacitores (carga máxima)

CURVA C : perfil de voltaje con capacitores (carga mínima)

FIGURA 14. (b) Influencia de los capacitores paralelo sobre el perfil de voltaje en un alimentador primario de distribución.

Taza de crecimiento de la carga %	Perdidas de energia sin capacitores $	BENEFICIOS Reduccion de perdidas de energia $	BENEFICIOS Liberacion de capacidad $	Costo de capacitores $	Beneficio neto $	INSTALACION DE CAPACITORES Localizacion y capacidad Nodo(KVAR)	INSTALACION DE CAPACITORES Capacidad instalada total KVAR	INSTALACION DE CAPACITORES Numero de bancos
0	86874	23513	4111	16209	11414	7(50),12(50)	100	2
5	167389	38672	4111	16209	26573	10(50),12(50)	100	2
10	263321	65470	5993	24314	47149	8(50),10(50),12(50)	150	3
15	307281	82685	7739	32418	58006	3(50),8(50),10(50),12(50)	200	4
20	338872	90442	7739	32418	65763	3(50),8(50),10(50),12(50)	200	4

Factor de carga presente : 0.2
Taza de crecimiento del costo de energia : 10%
Costo de capacidad de la subestacion : 60.38 $/KVA

TABLA 3. Efecto del crecimiento de la carga sobre la instalacion de capacitores fijos en el alimentador rural del Ejemplo No. 1 .

Factor de carga presente p.u.	Perdidas de energia sin capacitores $	BENEFICIOS		Costo de capacitores $	Beneficio neto $	INSTALACION DE CAPACITORES		
		Reduccion de perdidas de energia $	Liberacion de capacidad $			Localizacion y capacidad Nodo(KVAR)	Capacidad instalada total KVAR	Numero de bancos
0.1	232140	52338	5993	24314	34017	8(50),10(50),12(50)	150	3
0.15	247577	58904	5993	24314	40583	8(50),10(50),12(50)	150	3
0.25	281040	78756	7739	32148	54077	3(50),8(50),10(50),12(50)	200	4
0.30	299066	86122	7739	32148	61443	3(50),8(50),10(50),12(50)	200	4
0.35	317955	93489	7739	32148	68810	3(50),8(50),10(50),12(50)	200	4
0.4	337707	100855	7739	32148	76176	3(50),8(50),10(50),12(50)	200	4

Taza de crecimiento de la carga : 10%
Taza de crecimiento del costo de energia : 1 %
Costo de capacidad de la subestacion : 60.38 $/KVA

TABLA 4. Efecto del cambio del factor de carga presente sobre la instalacion de capacitores fijos en el alimentador rural del Ejemplo No. 1 .

Taza de crecimiento de costo de energia %	Perdidas de energia sin capacitores $	BENEFICIOS Reduccion de perdidas de energia $	Liberacion de capacidad $	Costo de capacitores $	Beneficio neto $	INSTALACION DE CAPACITORES Localizacion y capacidad Nodo(KVAR)	Capacidad instalada total KVAR	Numero de bancos
0	245794	60821	5993	24314	42500	8(50),10(50),12(50)	150	3
1	263321	65470	5993	24314	47149	8(50),10(50),12(50)	150	3
2	283251	76865	7739	32148	52186	3(50),8(50),10(50),12(50)	200	4
3	304000	82734	7739	32148	58055	3(50),8(50),10(50),12(50)	200	4
4	326215	89022	7739	32148	64343	3(50),8(50),10(50),12(50)	200	4
5	349992	95756	7739	32148	71077	3(50),8(50),10(50),12(50)	200	4

Taza de crecimiento de la carga : 10%
Factor de carga presente : 0.2 p.u.
Costo de capacidad de la subestacion : 60.38 $/KVA

TABLA 5. Efecto del incremento anual del costo de energia sobre la instalacion de capacitores fijos en el alimentador rural del Ejemplo No. 1 .

Costo de capacidad de la S/E $/KVA	Perdidas de energia sin capacitores $	BENEFICIOS Reduccion de perdidas de energia $	Liberacion de capacidad $	Costo de capacitores $	Beneficio neto $	INSTALACION DE CAPACITORES Localizacion y capacidad Nodo(KVAR)	Capacidad instalada total KVAR	Numero de bancos
0	263321	65470	0	24314	41156	8(50),10(50),12(50)	150	3
50	263321	65470	4963	24314	46119	8(50),10(50),12(50)	150	3
100	263321	71389	12818	32148	51788	3(50),8(50),10(50),12(50)	200	4
500	263321	74847	77263	40523	111586	2(50),3(50),8(50),10(50),12(50)	250	5
1000	263321	74847	154526	40523	188849	2(50),3(50),8(50),10(50),12(50)	250	5
1500	263321	74847	231789	40523	266112	2(50),3(50),8(50),10(50),12(50)	250	5
2000	263321	74847	309051	40523	343375	2(50),3(50),8(50),10(50),12(50)	250	5

Taza de crecimiento de la carga : 10%
Factor de carga presente : 0.2 p.u.
Taza de incremento del costo de energia : 1 %

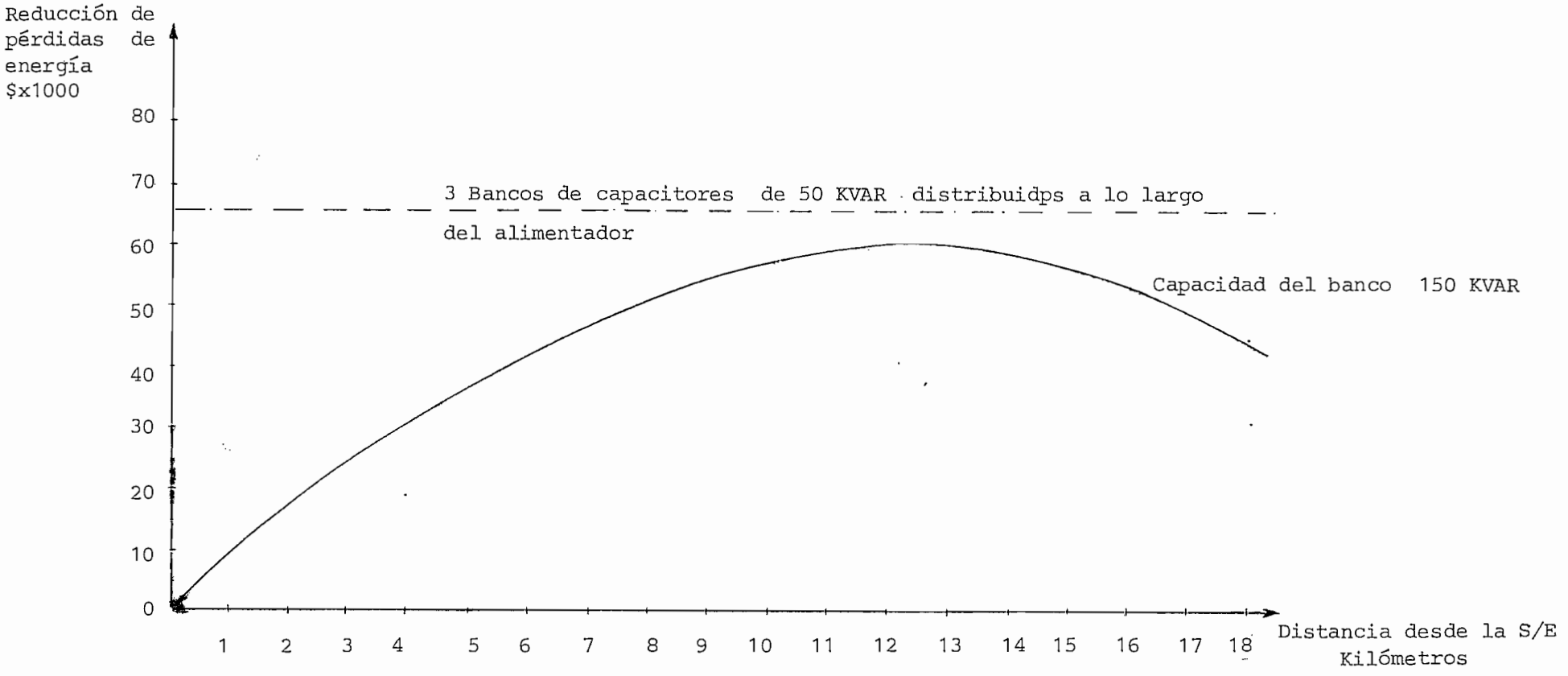


Figura 15. Reducción de pérdidas de energía mediante la instalación de un banco de capacitores de 150 KVAR en los diferentes nodos del alimentador y comparación con la distribución de bancos de 50 KVAR instalados aplicando el Método de las Variaciones Locales.

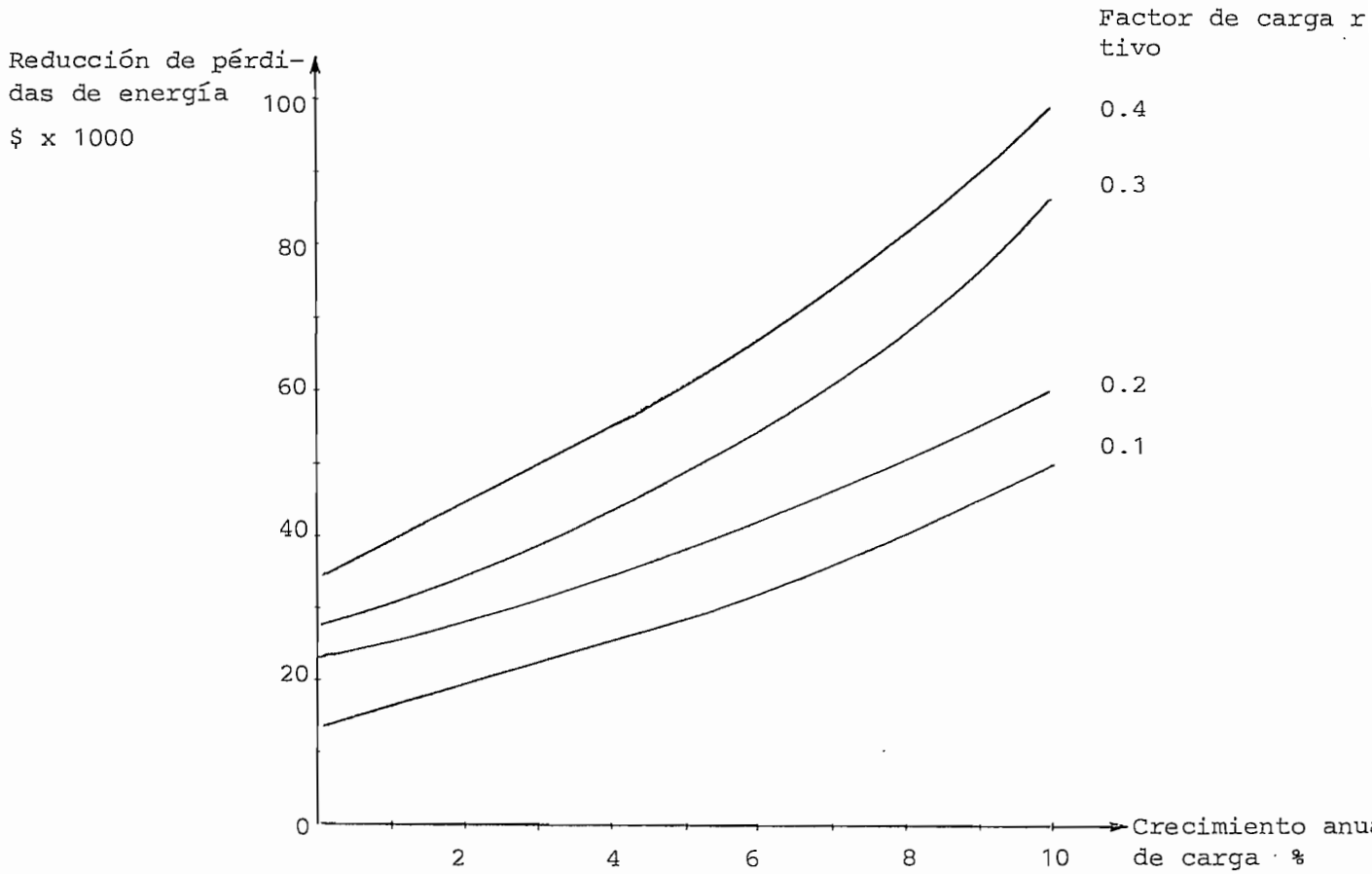


Fig. 16 Reducción de pérdidas en función del crecimiento de la carga y el factor de carga reactivo.

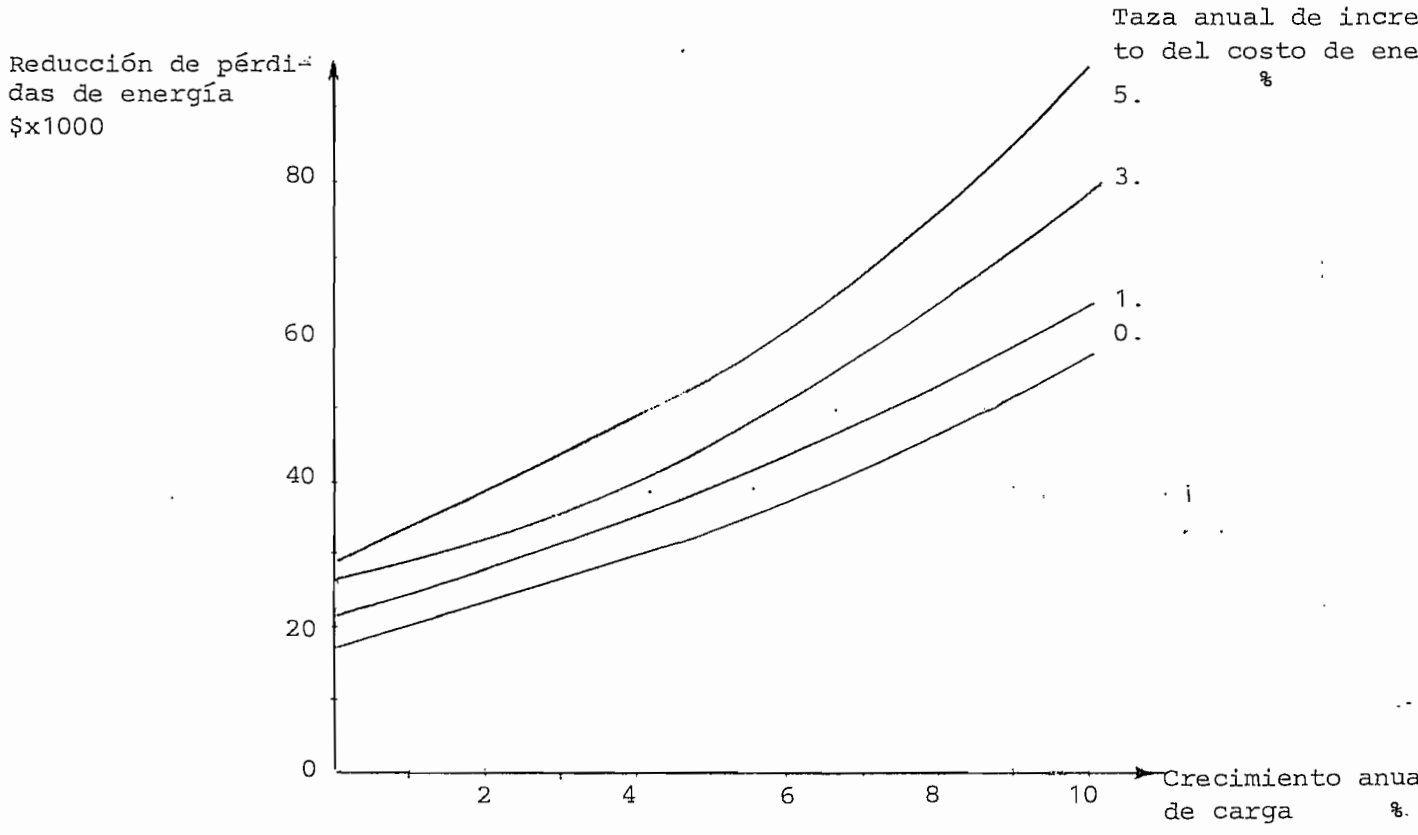


Fig. 17 Reducción de pérdidas en función del crecimiento de la carga e incremento del costo de energía.

4.2. Ejemplo No. 2 Alimentador C, servido de la Subestación Epiclachima del Sistema de Distribución de la Empresa Eléctrica Quito.

La realización de esta aplicación ha sido posible gracias a la ayuda suministrada por las diferentes áreas que comprende la Empresa Eléctrica Quito, y que tienen relación con la información requerida, cuyos funcionarios han prestado todas las facilidades tanto en el campo de la asesoría técnica como en el acceso a los archivos de los cuales se han recopilado los datos.

Así, los datos referentes a la proyección de la demanda, taza de crecimiento de la carga, políticas tarifarias de la empresa, configuración del alimentador, cargas y características de los conductores de cada segmento del alimentador han sido recopilados de los archivos existentes en la División de Asesoría y Planificación(9)

Las curvas de carga para años pasados se obtuvieron en la División de Despacho de Carga y la Curva de Carga para el presente año se obtuvo de medidas realizadas en la subestación Epiclachima a nivel de alimentador.

La información referente a costos unitarios de subestaciones se recopiló en la División de Diseño de Líneas y Subestaciones(11).

Los costos de instalación y mantenimiento de capacitores se obtuvieron de conversaciones directas en la Dirección de Operación y Mantenimiento y en la Dirección de Construcciones(12).

La información adicional ha sido recopilada de los estudios realizados para la empresa por parte de firmas consultoras y de la experiencia actual de la empresa .

4.2.1. Descripción y características del alimentador

El alimentador C es servido desde la Subestación Epiclachima, ubicada al sur de la Ciudad de Quito, una de las zonas con más alto índice de crecimiento de la carga en el área urbana.

El área de servicio de la Subestación Epiclachima tiene la mayor superficie de todas las subestaciones existentes en el área de concesión de la Empresa Electrica Quito y sirve a una carga industrial y residencial, siendo sus redes aéreas en su totalidad.

El voltaje nominal de servicio del alimentador C es de 22800 voltios, la configuración del alimentador, ruta, disposición, sección de los conductores, capacidad nominal y localización de transformadores de distribución consideradas, corresponden a aquellas establecidas del levantamiento de campo efectuado en el período Febrero 6 - Marzo 30 de 1984.

En la figura 18 se observa la configuración del alimentador y en el apéndice A se presenta la hoja de codificación para analizar este ejemplo.

4.2.2. Datos generales del sistema

La presentación de esta información guarda relación con el orden en el cual se requiere en el programa digital implementado.

1. Número de unidades capacitivas a instalarse en un nodo (NCM) y mínima capacidad de una unidad trifásica (KRU) (16)

   Existen en el mercado tamaños normalizados de bancos de capacitores trifásicos para montaje sobre postes con capacidades de 150, 300, 450, 600, 750, 900 1050 y 1200 KVAR para ser instalados en sistemas

con voltaje entre líneas de 2.4, 4.2, 4.8, 12.5, 13.2, 13.8, 16.5, 23.0, 24.9, 34.5 KV.

Por lo tanto y para efectos de realizar el análisis del ejemplo se especifica los valores siguientes :

NCM = 8 unidades

KRU = 150 KVAR

2. Costos de capacitores

Con el objeto de determinar el costo unitario por KVAR, el costo de instalación de los bancos y las cargas anuales sobre el capital invertido en los capacitores se procede a continuación al análisis de cada uno de estos rubros.

3. Costo variable

El análisis se lo realiza tanto para capacitores fijos como conectables, y considera el costo de equipo, materiales y otros gastos adicionales tomados como porcentaje del costo FOB (costo del equipo en el puerto de embarque) y que son : flete marítimo hasta puerto ecuatoriano (15%), nacionalización y transporte (10%), impuestos y seguros (15%)[17].

El resumen de costos de capacitores fijos es[18]:

Descripción	Cantidad	U$
. Equipos y materiales		
Banco de capacitores, 150 KVAR	1	940
Seccionadores fusibles monopolares	3	360
Costo total FOB		1300
. Costos adicionales		520
Costo total CIF en el lugar de instalación		1820

Luego, el costo unitario por KVAR de capacitores fijos (E) es :

$$\text{Costo unitario por KVAR} = \frac{1820\ \text{U\$}}{150\ \text{KVAR}} = 12.13\ \text{U\$/KVAR}$$

El cálculo del costo unitario por KVAR de capacitores conectables, considera iguales criterios económicos descritos anteriormente.

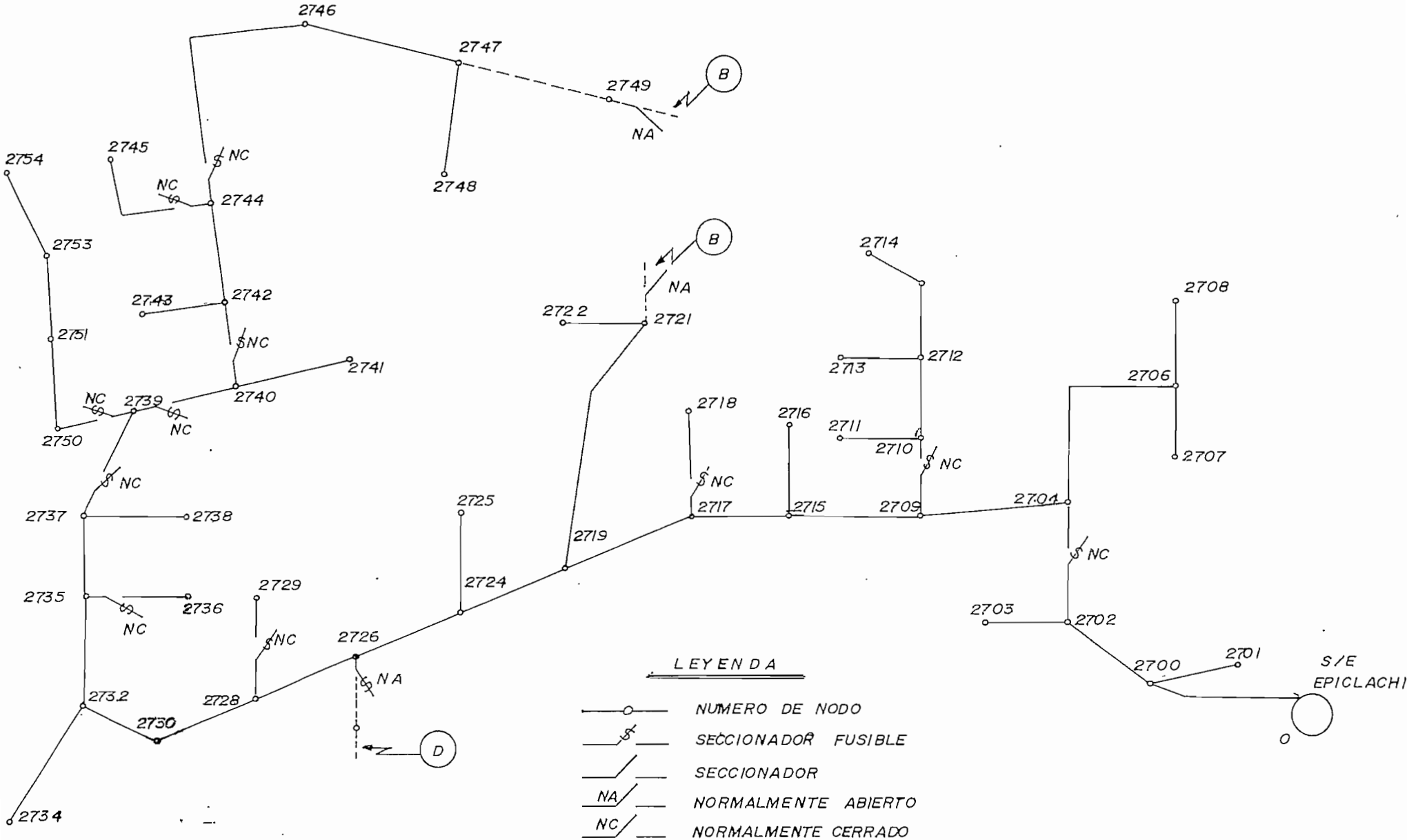
Descripción	Cantidad	U$
. Equipos y materiales		
Banco de capacitores, 150 KVAR	1	940
Seccionador fusible monopolar	3	360
Seccionador tripolar tipo CSL tripolar automático	1	2192
Control de voltaje - tiempo	1	1034
Transformador de potencial	1	1998
Costo total FOB		6524
. Costos adicionales		2609
Costo total CIF en el lugar de instalación		9133

Luego, el costo unitario por KVAR de capacitores conectables (ECON) es:

$$\text{Costo unitario por KVAR} = \frac{9133\ \text{U\$}}{150\ \text{KVAR}} = 60.7\ \text{U\$/KVAR}$$

Como puede observarse, el costo unitario de capacitores conectables es mayor que el de los capacitores fijos, debido a los costos del equipo de control necesario para sensar los requerimientos de potencia reactiva.
La relación de costos unitarios de capacitores conectables a capacitores fijos es por lo tanto :

$$\frac{\text{Costo por KVAR de capacitores conectables}}{\text{Costo por KVAR de capacitores fijos}} = \frac{60.7}{12.1} \cong 5$$



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
QUITO ECUADOR

SECCIONES Y NODOS

ALIMENTADOR C.
SUBESTACION EPICLACHIMA

FECHA:

FIGURA N°- 1

4. Costo de instalación de los bancos de capacitores

La instalación de los bancos de capacitores requiere el concurso de mano de obra calificada. El equipo está diseñado para montaje en postes. Se provee agarraderas para fijar el banco y se usa una grúa de adecuada resistencia para elevar el banco, tratando de evitar hacer fuerza excesiva sobre los terminales de porcelana, conexiones y partes no diseñadas para soportarla.

Después de remover la grúa, los cables de conexión deberán ser arreglados donde sea necesario y deberá realizarse una prueba para evitar falsos contactos.

Para determinar este rubro, se consideran dos casos (12)

a) La estructura en donde se va a ubicar el banco permite su instalación (no existe transformador de distribución instalado en la estructura).

Los costos de instalación en este caso serán :

Costo de la estructura para fijación del banco, costo de mano de obra tomado en porcentaje del costo de los materiales (40%), costo de dirección técnica tomado como porcentaje del costo de materiales (15%) y costo de transporte y equipo (valor fijo determinado por la empresa).

En resumen :	sucres
Costo de la estructura	8696
Costo de mano de obra	3479
Costo de dirección técnica	1305
Costo de transporte y equipo	9945
Costo total (D)	23445

b) La estructura en donde se va a ubicar el banco, no permite su instalación (existe un transformador de distribución en la estructura).

En este caso se considera la instalación de una estructura tipo RVA1 y de la estructura para fijación

del banco.

En este caso el resumen de costos es : sucres

Costo de la estructura para fijación del banco:	8696
Costo de estructura RVA1 (incluído poste):	23274
Costo de mano de obra :	12788
Costo de dirección técnica :	4796
Costo de transporte y equipo :	9945
Costo total (D) :	59499

5. Costos de mantenimiento

La aceptación de los capacitores se ha debido a las siguientes razones :

- Reducción del precio de venta
- Mejora en el diseño y métodos de fabricación que han dado como resultado tamaños y pesos pequeños.
- El consumo de potencia no es muy significativo, para capacitores con voltajes nominales desde 1200 voltios y superiores, las pérdidas a voltaje y frecuencia nominal y una temperatura en el capacitor de 25°C, no exceden de 0.0033 KW por KVAR .
- Reducida taza de fallas. Se ha alcanzado una vida útil de alrededor de 25 años[13] .

La vida a preveer de los capacitores depende ampliamente de la naturaleza del dieléctrico, del gradiente de potencial en el dieléctrico y de la temperatura en el punto más caliente del mismo[14].

Los capacitores se construyen en forma de rollo, empleándose generalmente como dieléctrico el papel impregnado y como electródos el aluminio en hojas finísimas, el líquido de relleno suele ser el aceite clorado.

El equipo de capacitores requiere por lo general de poco mantenimiento.

Se deben efectuar inspecciones programadas para comprobar que el equipo esté operando adecuadamente.

En el caso de capacitores conectables la frecuencia de inspección depende en gran medida de la frecuencia de las operaciones de conexión y de la importancia de la instalación en particular.

Generalmente una inspección visual a las unidades capacitivas y a las conexiones es suficiente.

Los daños mecánicos deben repararse o los elementos reemplazarse especialmente si el daño ha afectado el aislante del capacitor. En los aparatos de conexión se debe revisar los contactos y el estado del aceite.

De la experiencia relativamente reducida (aproximadamente 5 años) que se tiene en nuestro medio, respecto a la instalación de bancos de capacitores sobre alimentadores primarios de distribución se desprende que los gastos de mantenimiento anual aproximadamente alcanzan inversiones en [12]:

	sucres
. Reposición de fusibles y otros accesorios de control	1215
. 1 hora de operadores	900

Este mantenimiento se lo realiza dos veces por año y por lo tanto estos valores se multiplican por dos.

Para el mantenimiento de bancos de capacitores conectables se asume que se requiere una hora adicional de tiempo de mantenimiento.

Un resumen de costos se realiza en la tabla 7

6. Curvas diarias de carga

En la tabla 8 se presentan los valores de corriente de las curvas de carga diaria para cinco años del alimentador C con el fin de determinar el factor de carga presente, así como también la curva de tendencia de creci-

miento del factor de carga y el factor de carga futuro Las medidas corresponden al mes de Junio, considerado como el mes promedio del año en cuanto a requerimien - tos de carga y al día Jueves considerado de máxima de manda en la semana. Para el año de 1985 las medidas fue ron tomadas en la semana comprendida entre el 12 y 19 de Julio de este año [10]:

El crecimiento del factor de carga se puede aproximar por mínimos cuadrados a una recta de la forma :

$$Y = a_o + a_1 X$$

partiendo del conjunto de puntos (X,Y) siguiente :

X	Y		
0	0.7447		
1	0.6973		
2	0.7356		
3	0.7383	LFm	
4	0.7245	LFp	

La recta de aproximación por mínimos cuadrados del con junto de puntos dado tiene la ecuación :

$$Y = 0.7296 + 0.00006\ X$$

Luego, dado un factor de carga presente (FC) de 0.7245 el factor de carga futuro (FCF) en el año 25 de la vi- da útil de los capacitores será :

$$FCF = FC + 0.00006 \times 25 = 0.7245 + 0.0015 = 0.726$$

7. Costo actual de energía

La Empresa Eléctrica Quito con el fin de suministrar la energía a sus clientes, genera su propia energía con u nidades hidráulicas y para cubrir el déficit de reque- rimientos de generación eléctrica compra energía al Sis tema Nacional Interconectado.

El costo de venta de energía a nivel de usuario varía dependiendo del tipo de consumidor. El costo a Junio de 1985 para un usuario tipo residencial-industrial es de 3.3 S/kwh, siendo esta la clase de consumidor que sirve el alimentador en estudio.

La política tarifaria de la Empresa Eléctrica Quito de acuerdo a regulaciones de INECEL, ha definido incre - mentos en el costo de energía para los años futuros , así : incrementos mensuales del 2% hasta alcanzar un costo de 4S/kwh, luego de lo cual se estima que se de berán dar los siguientes incrementos : 12% anual durante 5 años e incrementos del 6% anual para los años siguientes, lo que permitirá financiar la expansión del sistema programada por la empresa (9).

8. Taza de actualización R

Los beneficios y costos anuales deberán ser ubicados en valor presente al primer año en que entren en operación los bancos de capacitores con una taza de ac - tualización del 12% (9).

9. Costo unitario de capacidad de la subestación

Con el fin de determinar el valor que representa para la empresa la instalación de un KVA adicional de capa cidad instalada en las subestaciones de distribución se ha recopilado información referente a instalaciones programadas por la empresa (11)

En el programa de expansión de la empresa consta la ampliación de la subestación 19 con niveles de voltaje de 46/23 KV con el fin de cubrir el incremento de la demanda en 23 KV y mejorar la confiabilidad del sis tema por interconexión con la subestación 18 a 46 KV. Con este propósito se requiere la instalación de un transformador con capacidad de 15/20 MVA y equipo de

seccionamiento adicional.

El resumen de costos es el siguiente :

	U$
. Costo FOB estimado de materiales:	916000
. Transporte hasta puerto marítimo ecuatoriano:	109220
. Seguros,nacionalización, transporte local:	98928
Costo total CIF en el lugar de instalación :	1124148
Gastos en Ingeniería y administración montaje, obras civiles, supervisión extranjera:	281000
Costo Total :	1405148

El tipo de cambio (Junio 1985) para traer a moneda local es de 110 S/./U$. Además debe considerarse un costo adicional en moneda local en materiales nacionales de 220000 sucres, obteniéndose un costo total del proyecto de : 1.5479×10^8 sucres

Luego el costo unitario por KVA de la subestación(CPO) es :

$$\text{Costo unitario por KVA} = \frac{\text{S/. } 1.5479 \times 10^8}{20000 \text{ KVA}} = 7740 \text{ S/./KVA}$$

10. Taza de crecimiento de la carga

Los sistemas eléctricos de potencia se diseñan para abastecer los requerimientos presentes y futuros de la carga. La determinación de la taza de crecimiento de la carga es de primordial importancia en el diseño eléctrico y mecánico de un sistema, lo que a su vez influye en el diseño económico.

La taza de crecimiento de la carga a nivel de alimentador se determina considerando : el tipo de usuario,crecimiento demográfico del área a ser servida por el alimentador, regulaciones municipales respecto al uso del suelo.

De los estudios realizados para la empresa[15], se estima para el alimentador en estudio una taza de crecimiento del 9% anual (G).

11. De la tabla 9 , que corresponde a los valores de carga horaria para los días de máxima y mínima demanda en la semana considerada del 12 al 19 de Julio de 1985, se obtiene la relación de mínima carga reactiva a la máxima carga reactiva FRD, con el fin de considerar los requerimientos de KVAR en la hora de mínima demanda y así tener en cuenta la restricción de elevación de voltaje

Los valores utilizados son :

máxima demanda KVAR = 3188
mínima demanda KVAR = 157
Relación FRD = 0.0492

12. Período planificado de crecimiento de la carga sobre el alimentador.

Este parámetro se puede determinar considerando la carga actual, la taza de crecimiento de la carga, la capacidad de transporte del alimentador (KVA) y el voltaje de servicio.

De la figura 19 , que presenta la curva de carga del día 18 de Julio de 1985, la máxima carga en KVA sobre el alimentador tiene un valor de 6713 KVA. La taza de crecimiento de la carga previamente definida es del 9% y el nivel de voltaje de servicio 22.8 KV.

El conductor a la salida de la subestación Epiclachima es el 3/0 AWG con una capacidad de transporte de corriente de 300 amperios, luego la máxima carga permitida en este conductor sin sobrepasar el 75% de la capacidad de límite térmico es :

$KVA_m = 1.732\ I\ KV = 1.732 \times 300 \times 22.8 = 11848\ KVA$

El período planificado M, en el cual el alimentador puede aceptar el crecimiento de la carga será entonces calculado mediante la expresión :

$$\text{Carga proyectada} = \text{carga actual } (1 + g)^{M}$$

de donde :

$$M = \frac{\log \frac{\text{carga proyectada}}{\text{carga actual}}}{\log (1 + g)} = \frac{\log \frac{11848}{6713}}{\log 1.09} \simeq 7 \text{ años}$$

13. De la tabla 9, en la que se presenta los valores de carga para los días de máxima y mínima demanda pueden obtenerse los valores de las siguientes variables :

Factor de potencia en demanda máxima FPMAX	:	0.88
Factor de potencia en demanda mínima FP	:	0.98
Factor de carga reactivo presente LFI	:	0.66

Asumiendo que el factor de carga reactivo crece en la forma dada por la recta de tendencia del factor de carga de la potencia aparente, el factor de carga reactivo futuro en el año 25 de vida de los capacitores será :

$$LFF = 0.66 + 0.00006 \times 25 = 0.6615$$

En el apéndice A se detalla la hoja de codificación de los datos requeridos para analizar este ejemplo.

4.2.3. Resultados de la instalación de capacitores fijos

Con los datos descritos se corre el programa de Ubicación óptima de capacitores fijos. Para el cálculo de los beneficios económicos por reducción de pérdidas de energía y liberación de capacidad de la subestación y cálculo de las pérdidas de energía en el alimentador sin capacitores se analiza el alimentador en la condición de máxima demanda y la restricción de voltaje se conside-

ra aplicando la relación de demanda mínima a máxima FRD, a los valores de carga máxima.

Los resultados obtenidos mediante la aplicación del método propuesto se detallan en la tabla 10.

Pérdidas de energía sin capacitores :	S/. 45207240
Beneficios por reducción de pérdidas de energía :	S/. 3820590
Beneficios por liberación de capacidad de la S/E :	S/. 3331316
Beneficio neto por instalación de capacitores:	S/. 5109191
Localización y capacidad de los bancos de capacitores instalados :	2702(150), 2707(150), 2708(150), 2710(150) 2719(150), 2726(150), 2734(150)
Número de bancos de capacitores :	7
Capacidad total instalada en el alimentador:	1050 KVAR
Costo de los bancos de capacitores instalados:	S/. 2042715

Tabla 10. Pérdidas, beneficios y óptima localización de capacitores. para el alimentador del Ejemplo 2.

En la figura 20 se aprecia la localización de los bancos de capacitores a lo largo del alimentador C.

En la tabla 10., se observa que la relación de beneficios por reducción de pérdidas de energía mediante la instalación de capacitores alcanza un valor de 8.5% y la relación de beneficios a costos de instalación de los bancos es aproximadamente 3.5. Por lo tanto el proyecto de instalación de capacitores está justificado económicamente.

Los beneficios alcanzados por reducción de pérdidas de energía constituyen el rubro más importante que se puede lograr mediante la instalación de capacitores, aunque los beneficios por liberación de capacidad constituyen un rubro también importante y esto se debe al alto costo que

implica para la empresa la instalación de un KVA adicional que le permita abastecer el crecimiento de la demanda.
En lo que se refiere a los niveles de voltaje presentes en la operación del alimentador antes y después de la instalación de los capacitores se observa en el apéndice A que el perfil mejora luego de la instalación de los bancos en todos los nodos a lo largo del alimentador y para la condición de mínima demanda el voltaje en ningún caso supera el valor nominal de servicio, debido a la restricción de voltaje que controla el grado de compensación.
Para determinar los efectos del crecimiento de la carga, crecimiento del factor de carga, incremento del costo de energía y cambio en el costo de capacidad de la subestación, se varía independientemente cada uno de estos parámetros desde un mínimo hasta un valor máximo conservando los parámetros restantes constantes. Los resultados se tabulan en las tablas 11, 12, 13 y 14, en las cuales además de presentar los resultados más importantes de la corrida del programa se indican los parámetros que varían y aquellos que se mantienen constantes.
En las figuras 21. y 22. se presentan familias de curvas que resultan de evaluar la reducción de pérdidas de energía alcanzadas mediante la instalación de capacitores paralelo en el alimentador primario considerado para diferentes valores de los factores de crecimiento de carga, del factor de carga reactivo e incremento anual del costo de energía.

TIPO DE BANCO DE CAPACITORES	COSTO VARIABLE ($/KVAR) (1)	CAPACIDAD DEL BANCO KVAR	COSTO DEL BANCO $	COSTO DE INSTALACION $	COSTO TOTAL DE INSTALACION $	COSTO ANUAL DE MANTENIMIENTO $	RELACION COSTOS DE MANTENIMIENTO / COSTO TOTAL DE INSTALACION %
FIJO	1331	150	199650	23245 59499(2)	222845	4230	1.9
CONECTABLE	6667	150	1001550	23245 59499(2)	1024795	6030	.6

(1) Tipo de cambio Junio 1985 : 1U$/110 Sucres.
(2) Incluye el costo de instalación del poste y estructura adicional.

TABLA 7. Resumen de costos unitarios, costos fijos de instalación y costos de mantenimiento de capacitores fijos y conectables.

AÑO	1981	1982	1983	1984	1985
MES	JUNIO	JUNIO	JUNIO	JUNIO	JULIO
DIA	18-Jueves	24-Jueves	23-Jueves	21-Jueves	18-Jueves
HORA					
1	80	70	80	100	90
2	80	70	80	100	85
3	80	70	80	100	95
4	90	90	100	100	95
5	90	100	100	105	90
6	100	110	110	110	90
7	100	120	130	130	110
8	160	160	170	175	160
9	160	175	175	180	166
10	160	185	180	189	165
11	155	180	180	185	160
12	160	190	165	165	170
13	135	155	160	175	145
14	155	155	160	170	150
15	130	145	135	155	145
16	130	150	148	155	145
17	115	145	135	140	130
18	110	135	135	140	120
19	115	145	130	140	120
20	120	145	145	145	125
21	130	150	140	140	125
22	115	130	120	130	100
23	95	105	105	110	95
24	90	100	105	110	80
factor de carga :	0.7447	0.6973	0.7356	0.7333	0.7245

VALORES DE CARGA EN AMPERIOS

TABLA 8. CARGA DIARIA DEL ALIMENTADOR C, S/E EPICLACHIMA y FACTOR DE CARGA. PERIODO 1981 - 1985

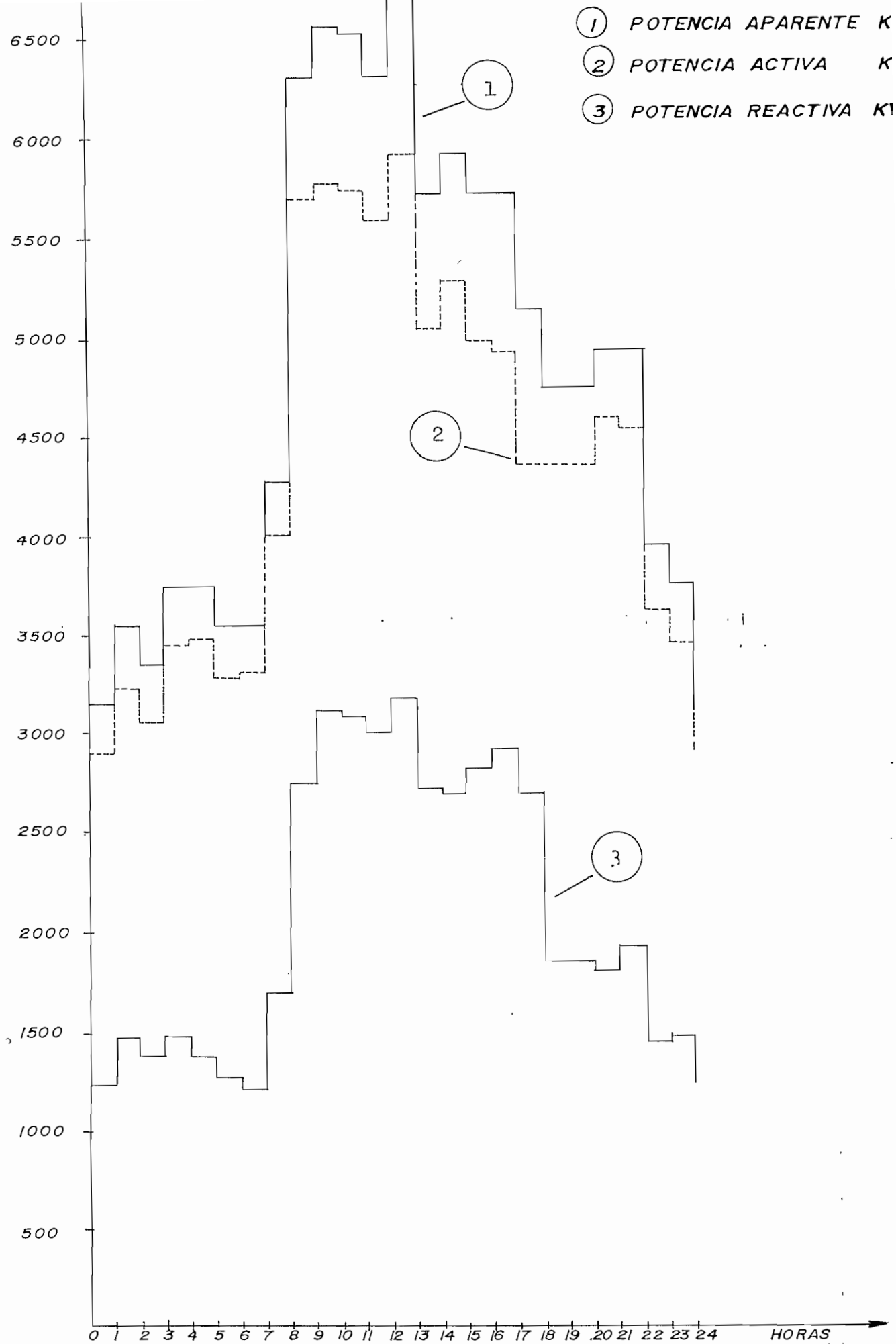
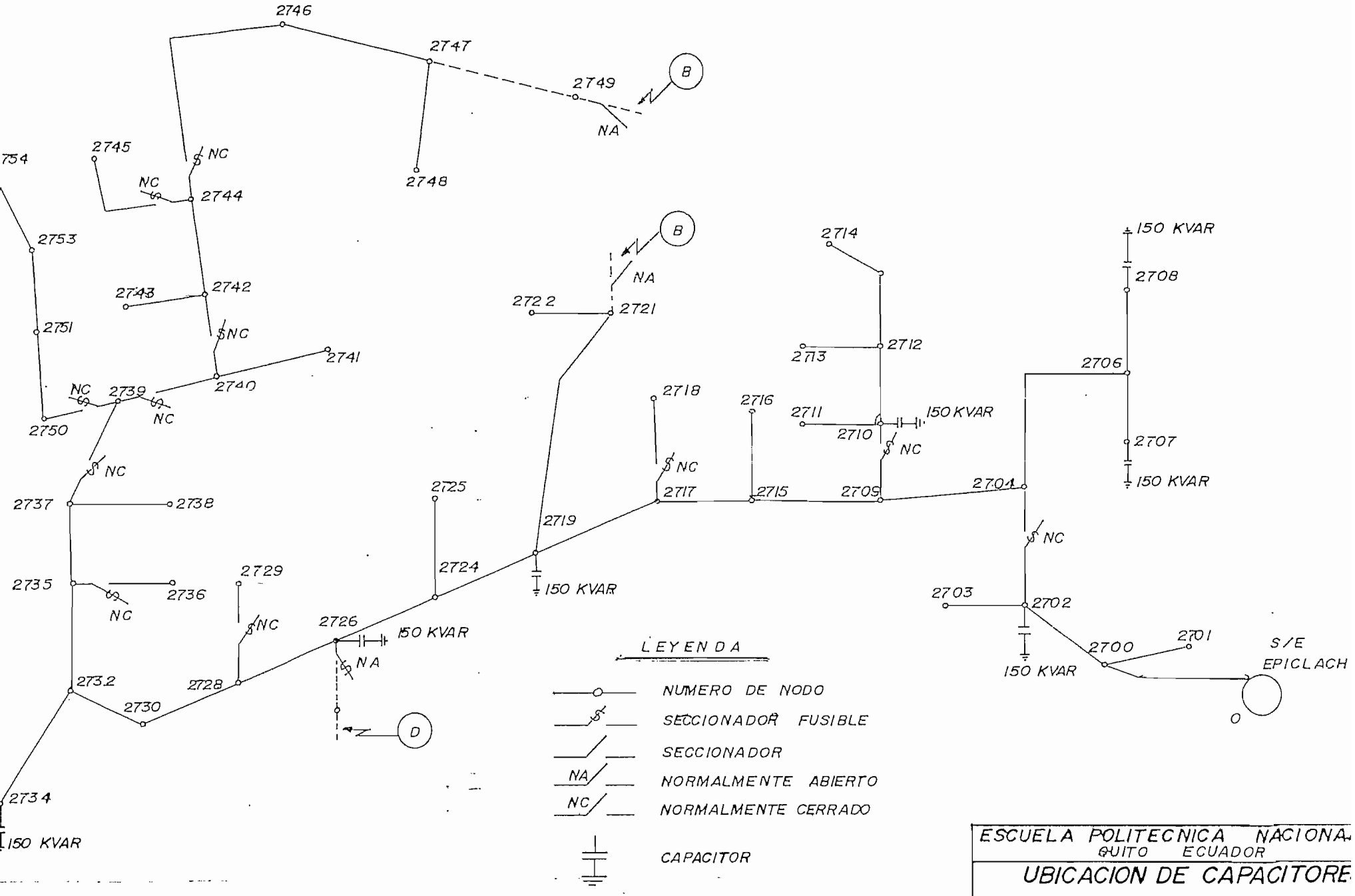


FIG 19. CURVA DE CARGA DIARIA

DIA 18 DE JULIO DE 1985 — ALIMENTADOR C S/E EPICLACHIMA

	DIA DE MAXIMA DEMANDA				DIA DE MINIMA DEMANDA			
	18 de Julio				14 de Julio			
HORA	KVA	cosØ	KW	KVAR	KVA	cosØ	KW	KVAR
1	3554	.91	3234	1473	2369	.93	2203	870
2	3356	.91	3053	1391	1974	.94	1855	673
3	3751	.92	3450	1470	1974	.94	2203	673
4	3751	.93	3488	1378	1974	.93	1835	725
5	3554	.93	3305	1306	1974	.94	1855	673
6	3554	.94	3340	1212	1777	.95	1688	554
7	4343	.92	3995	1702	1184	.97	1148	287
8	6318	.90	5686	2753	1974	.95	1875	616
9	6555	.88	5768	3112	1974	.94	1855	673
10	6515	.88	5733	3093	1974	.95	1875	616
11	6318	.88	5559	3000	1579	.94	1484	538
12	6713	.88	5907	3188	1579	.96	1115	442
13	5726	.88	5038	2719	2369	.94	2226	808
14	5923	.89	5271	2700	1184	.98	1160	235
15	5726	.87	4891	2822	987	.98	967	196
16	5726	.86	4924	2921	987	.97	957	240
17	5133	.85	4363	2703	789	.95	749	246
18	4738	.92	4358	1856	789	.98	773	157
19	4738	.92	4358	1856	1579	.98	1547	314
20	4936	.93	4590	1813	1579	.97	1531	383
21	4936	.92	4541	1934	1579	.97	1537	383
22	3949	.93	3672	1451	1184	.98	1160	235
23	3751	.92	3450	1470	789	.97	765	240
24	3159	.92	2906	1238	789	.96	758	220

TABLA 9. CARGA DIARIA DE LOS DIAS DEMAXIMA Y MINIMA DEMANDA EN LA SEMANA DEL 12 AL 19 DE JULIO DE 1985



ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
QUITO ECUADOR

UBICACION DE CAPACITORES

ALIMENTADOR C.

SUBESTACION EPICLACHIMA

FECHA: FIGURA N°: 2

Taza de crecimiento de la carga %	Perdidas de energia sin capacitores $	BENEFICIOS Reduccion de perdidas de energia $	Liberacion de capaci-dad $	Costo de capacitores $	Beneficio neto $	INSTALACION DE CAPACITORES Localizacion y capacidad Nodo(KVAR)	Capacidad instalada total KVAR	Numero de bancos
0	15863860	2027196	3331316	2042715	3315798	2702(150),2707(150),2708(150) 2710(150),2719(150),2726(150) 2734(150)	1050	7
5	38197680	3438287	3331316	2042715	4727888	2702(150),2707(150),2708(150) 2710(150),2719(150),2726(150) 2734(150)	1050	7
9	45207240	3820590	3331316	2042715	5109191	2702(150),2707(150),2708(150) 2710(150),2719(150),2726(150) 2734(150)	1050	7
11	41022040	3630094	3331316	2042715	4918696	2702(150),2707(150),2708(150) 2710(150),2719(150),2726(150) 2734(150)	1050	7

Factor de carga presente : 0.66
Taza de crecimiento del costo de energia : 24%(1 anio), 12%(5 anios), 6%(19 anios)
Costo de capacidad de la subestacion : 7740 $/KVA

TABLA 11. Efecto del crecimiento de la carga sobre la instalacion de capacitores fijos en el alimentador C de la subestacion Epiclachima.

Factor de carga presente %	Perdidas de energia sin capacitores $	BENEFICIOS Reduccion de perdidas de energia $	Liberacion de capacidad $	Costo de capacitores $	Beneficio neto $	INSTALACION DE CAPACITORES Localizacion y capacidad Nodo(KVAR)	Capacidad instalada total KVAR	Numero de bancos
0.1	20385674	1756928	3331316	2042715	3045530	2702(150),2707(150),2708(150) 2710(150),2719(150),2726(150) 2734(150)	1050	7
0.2	23747873	2125440	3331316	2042715	3414042	2702(150),2707(150),2708(150) 2710(150),2719(150),2726(150) 2734(150)	1050	7
0.4	31626256	2862461	3331316	2042715	4151063	2702(150),2707(150),2708(150) 2710(150),2719(150),2726(150) 2734(150)	1050	7
0.66	45207240	3820590	3331316	2042715	5109191	2702(150),2707(150),2708(150) 2710(150),2719(150),2726(150) 2734(150)	1050	7

Taza de crecimiento de la carga : 9%
Taza de crecimiento del costo de energia : 24%(1 anio), 12%(5 anios), 6%(19 anios)
Costo de capacidad de la subestacion : 7740 $/KVA

TABLA 12. Efecto del cambio del factor de carga presente sobre la instalacion de capacitores fijos en el alimentador C de la subestacion Epiclachima

Taza de crecimiento del costo de energia%	Perdidas de energia sin capacitores $	BENEFICIOS		Costo de capacitores $	Beneficio neto $	INSTALACION DE CAPACITORES		
		Reduccion de perdidas de energia $	Liberacion de capacidad $			Localizacion y capacidad Nodo(KVAR)	Capacidad instalada total KVAR	Numero de bancos
0	16315580	1437408	3331316	2042715	2726009	2702(150),2707(150),2708(150) 2710(150),2719(150),2726(150) 2734(150)	1050	7
4	24307440	2092410	3331316	2042715	3381012	2702(150),2707(150),2708(150) 2710(150),2719(150),2726(150) 2734(150)	1050	7
8	37851590	3193499	3331316	2042715	4482101	2702(150),2707(150),2708(150) 2710(150),2719(150),2726(150) 2734(150)	1050	7
10	48012700	4015984	3331316	2042715	5304585	2702(150),2707(150),2708(150) 2710(150),2719(150),2726(150) 2734(150)	1050	7

Taza de crecimiento de la carga : 9%
Factor de carga presente : 0.66
Costo de capacidad de la subestacion : 7740 $/KVA

TABLA 13. Efecto del incremento anual en el costo de energia sobre la instalacion de capacitores fijos en el alimentador C de la subestacion Epiclachima

Costo de capacidad de la S/E $/KVA	Perdidas de energia sin capacitores $	BENEFICIOS Reduccion de perdidas de energia $	Liberacion de capacidad $	Costo de capacitores $	Beneficio neto $	INSTALACION DE CAPACITORES Localizacion y capacidad Nodo(KVAR)	Capacidad instalada total KVAR	Numero de bancos
0	45207240	3566224	0	1786604	1779639	2707(150),2708(150),2710(150) 2719(150),2726(150),2734(150)	900	6
3000	45207240	3820590	3331316	2042715	3069083	2702(150),2707(150),2708(150) 2710(150),2719(150),2726(150) 2734(150)	1050	7
7740	45207240	3820590	3331316	2042715	4482101	2702(150),2707(150),2708(150) 2710(150),2719(150),2726(150) 2734(150)	1050	7
9000	45207240	3820590	3331316	2042715	5304585	2702(150),2707(150),2708(150) 2710(150),2719(150),2726(150) 2734(150)	1050	7

Taza de crecimiento de la carga : 9%
Factor de carga presente : 0.66
Taza de incremento del costo de energia : 24%(1 año),12%(5 años),6%(19 años)

TABLA 14. Efecto del cambio en el costo de capacidad de la subestacion sobre la instalacion de capacitores fijos en el alimentador C de la subestacion Epiclachima

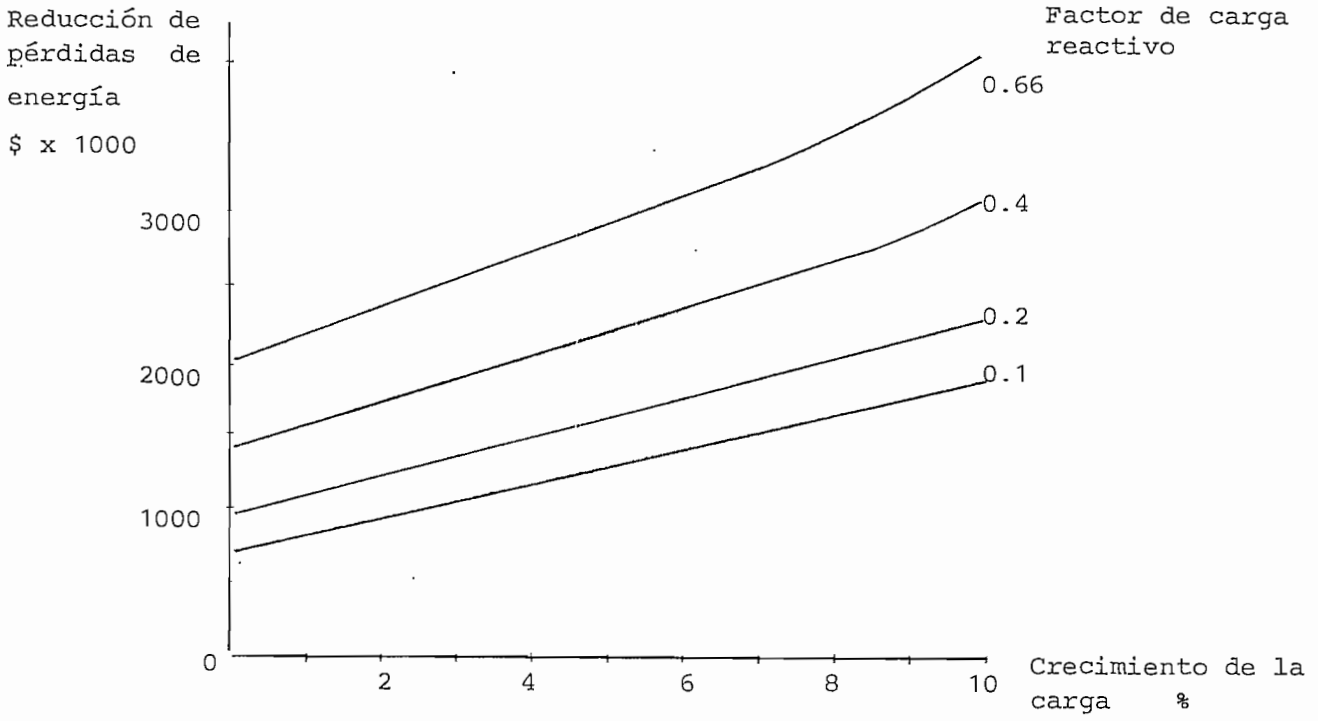


Fig. 21 Reducción de pérdidas de energía en función del crecimiento de la carga y del factor de carga reactivo.

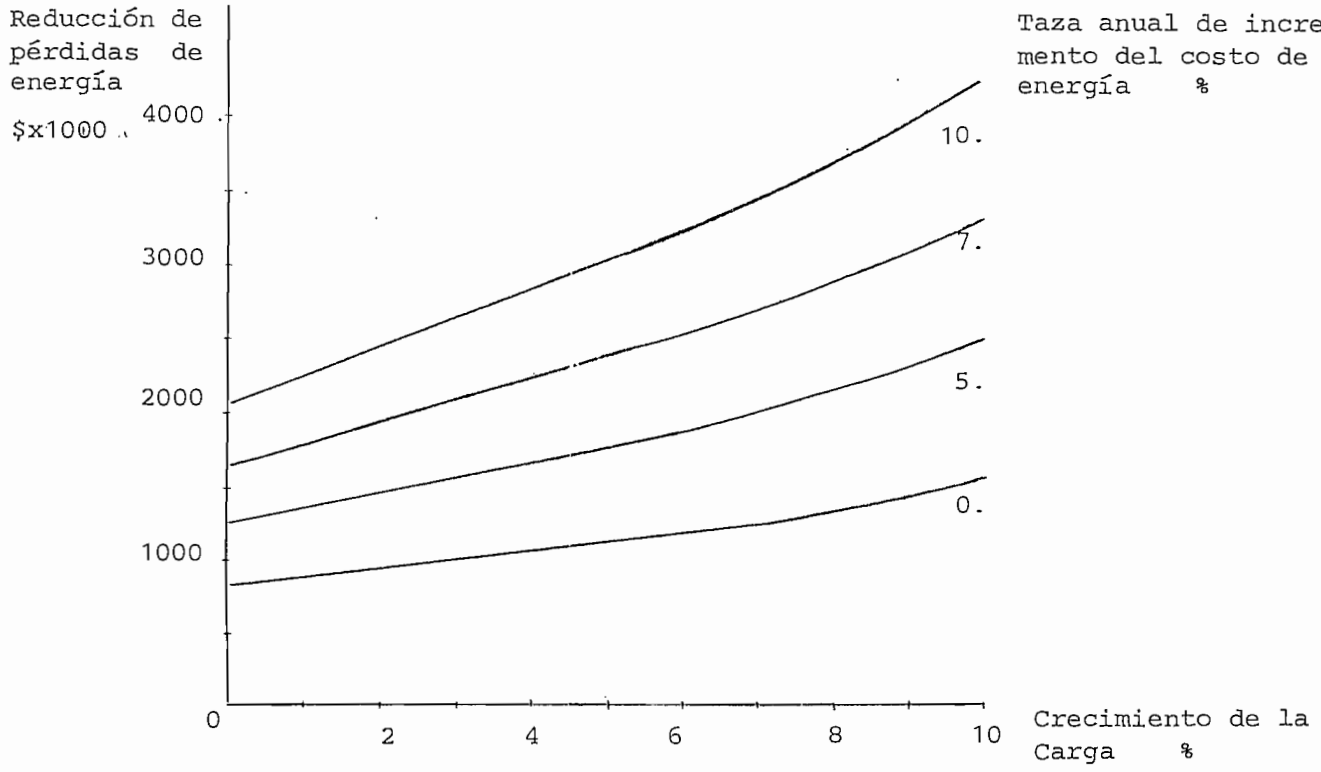


Fig. 22 Reducción de pérdidas en función del crecimiento de carga e incremento del costo de energía.

De las tablas 11, 12 y 13, se concluye que el efecto del crecimiento de carga, crecimiento del factor de carga y el incremento del costo de energía para los rangos de variación considerados no influyen de manera alguna sobre la instalación de capacitores fijos en lo que se refiere a su tamaño, localización y número de bancos a lo largo del alimentador. Se observa que la trayectoria óptima de instalación de capacitores no varía con el cambio de cualquiera de estos parámetros, aunque el valor de la función objetivo si varía para cada caso analizado.

De la tabla 14., se observa que si no se toma en cuenta los beneficios de capacidad de la subestación, el número de bancos instalados disminuye, mientras que con este parámetro el número de bancos aumenta, aunque su ubicación no varía.

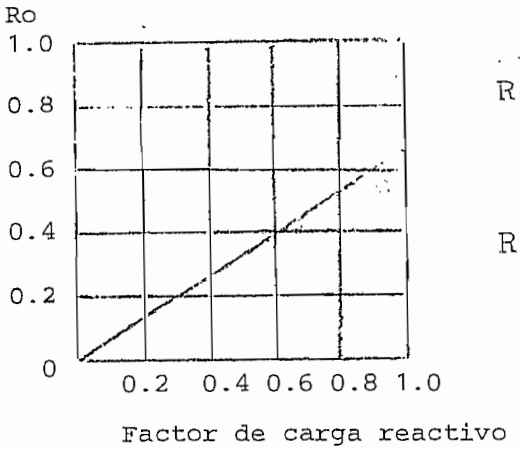
Para cualquier caso analizado, el proyecto de instalación de capacitores fijos se justifica económicamente, puesto que el monto positivo de los beneficios netos así lo determina.

Luego el efecto de los factores de crecimiento considerados y el costo de la capacidad de la subestación, varía dependiendo en cada caso del tipo de alimentador analizado, consecuentemente en un caso su influencia sobre la instalación de capacitores fijos será más pronunciada que en otro caso.

En el apéndice A se presentan los resultados generales de los ejemplos analizados.

Con el objeto de determinar el grado de aproximación a la instalación óptima de capacitores fijos ya definida anteriormente mediante la aplicación del método de variaciones locales, se corre el programa digital con la trayectoria y tamaño de un banco dados por la Regla de Neagle la misma

que señala que los mayores beneficios de la instalación de capacitores fijos sobre un alimentador con carga uniforme se alcanza ubicando un capacitor localizado a 2/3 de la longitud del alimentador medidos desde la fuente y con una capacidad determinada mediante la figura 23. Para el alimentador C se determinó anteriormente que el factor de carga reactivo era 0.66 p.u. y por lo tanto la óptima relación de corrección obtenida de la figura es aproximadamente 0.43 y la capacidad del banco a instalarse es de 1350 KVAR, supuesta una carga reactiva de 3188 KVAR dada por la tabla 9 .



Ro = óptima relación de corrección

$$Ro = \frac{\text{KVAR de capacitores}}{\text{KVAR de carga máxima}}$$

Figura 23. Tamaño del capacitor para una máxima reducción de pérdidas en un alimentador con carga uniforme, según la Regla de Neagle.

Con esta información, se simula la instalación de un banco situado en el nodo 2742 localizado aproximadamente a 2/3 de la longitud del alimentador medidos desde la subestación.

Los resultados obtenidos introduciendo esta trayectoria y calculando los beneficios mediante los modelos definidos anteriormente son los siguientes :

Reducción de pérdidas de energía	: S/ 2390639
Liberación de capacidad de la subestación	: S/ 4071888
Costo del banco de capacitores	: S/ 2091325
Beneficio neto por instalación del banco	: S/ 4371202
Localización y capacidad del banco	2742(1350 KVAR)

Por lo tanto se observa que si bien se obtienen beneficios al instalar este banco en la ubicación indicada, estos beneficios no son los máximos determinados anteriormente mediante el método de las variaciones locales. Una comparación de los beneficios por reducción de pérdidas alcanzados mediante la aplicación de estos dos métodos se resume a continuación:

Método de variaciones locales :	S/ 3820590
Aplicación de la Regla de Neagle :	S/ 2390639

4.2.4. Análisis de la instalación de capacitores conectables

Una vez encontrada la instalación óptima de los bancos de capacitores fijos y en base a estos resultados se procede a determinar la instalación de los capacitores conectables.

En la figura 24. se presenta la curva de carga diaria de los requerimientos de potencia reactiva del alimentador C de la subestación Epiclachima y la cantidad de potencia reactiva correspondiente a los capacitores fijos determinados anteriormente.

Se asume que el período de conexión de los capacitores conectables es de 24 horas con la finalidad de lograr los máximos beneficios por reducción de pérdidas de energía y por lo tanto justificar las elevadas inversiones a realizarse en la instalación de estos capacitores.

Las variaciones de requerimientos de reactivos pueden relacionarse a cambios en cualquiera de los siguientes paráme - tros : voltaje del sistema, corriente en el sistema, tiempo

y temperatura.

En alguna aplicación particular puede ser ventajoso usar una combinación de dos tipos de señales con el fin de lograr mayor precisión al determinar los requerimientos de reactivos. Así por ejemplo, el control de voltaje está disponible con un resistor que se usa para modificar la señal sensada por el elemento de voltaje. Un control de corriente, tiempo o temperatura se utiliza para realizar la operación automática de conexión o desconexión del resistor.

El factor de carga reactivo se determina a partir de los requerimientos horarios de potencia reactiva en el alimentador disminuidos en una cantidad de KVAR dada por los capacitores fijos ya conocidos.

En la tabla 15 se resume el cálculo del factor de carga reactivo para el período de conexión de los capacitores conectables y se obtiene un valor de 0.4992 .

4.2.5. Instalación de capacitores conectables

De la corrida del programa se determina que para las condiciones impuestas, la instalación de capacitores conectables a lo largo del alimentador considerado no es económicamente recomendable. Esto es, los altos costos de instalación de los capacitores conectables no pueden ser financiados a partir de los beneficios por reducción de pérdidas de energía y liberación de capacidad de la subestación.

Se realizaron corridas del programa simulando condiciones diferentes a las verdaderas, así en la tabla 16. , literales a. y b. , se analiza la instalación de capacitores fijos y conectables asumiendo un costo actual de energía de :

$$CK = 6.6 \text{ S/kwh}$$

igual a dos veces el costo real. En este caso la función objetivo de capacitores conectables ya alcanza un valor mayor que cero haciendo que para este costo de energía se justifi-

que la instalación de este tipo de capacitores.

En la tabla 16. , literales c. y d. , se analiza la instalación de capacitores fijos y conectables con un costo de energía igual al real, esto es, 3.3 S/.kwh y se asume un costo unitario por KVAR de capacitores conectables igual a la mitad del verdadero, es decir, S/ 3330 /KVAR.

En este caso se realiza la instalación de capacitores fijos detallada en la tabla 16. y en cuanto a los capacitores conectables se consigue la instalación de un mayor número que en el caso anterior y por lo tanto se observa que un menor costo unitario por KVAR de capacitores conectables es determinante para su instalación.

HORA	Requerimientos de KVAR antes de instalar los capacitores fijos (1)	Capacidad instalada de capacitores fijos KVAR (2)	Requerimientos de KVAR luego de instalar los capacitores fijos (1)-(2)
1	1473	1050	423
2	1391	1050	341
3	1470	1050	420
4	1378	1050	328
5	1306	1050	256
6	1212	1050	162
7	1702	1050	652
8	2753	1050	1703
9	3112	1050	2062
10	3093	1050	2043
11	3000	1050	1950
12	3188	1050	2138
13	2719	1050	1669
14	2700	1050	1650
15	2822	1050	1772
16	2921	1050	1872
17	2703	1050	1871
18	1856	1050	1653
19	1856	1050	806
20	1813	1050	763
21	1394	1050	884
22	1451	1050	401
23	1470	1050	420
24	1238	1050	188
		Factor de carga reactivo:	.4992

TABLA 15. REQUERIMIENTOS DE POTENCIA REACTIVA ANTES Y LUEGO DE INSTALAR LOS CAPACITORES FIJOS EN EL ALIMENTADOR C

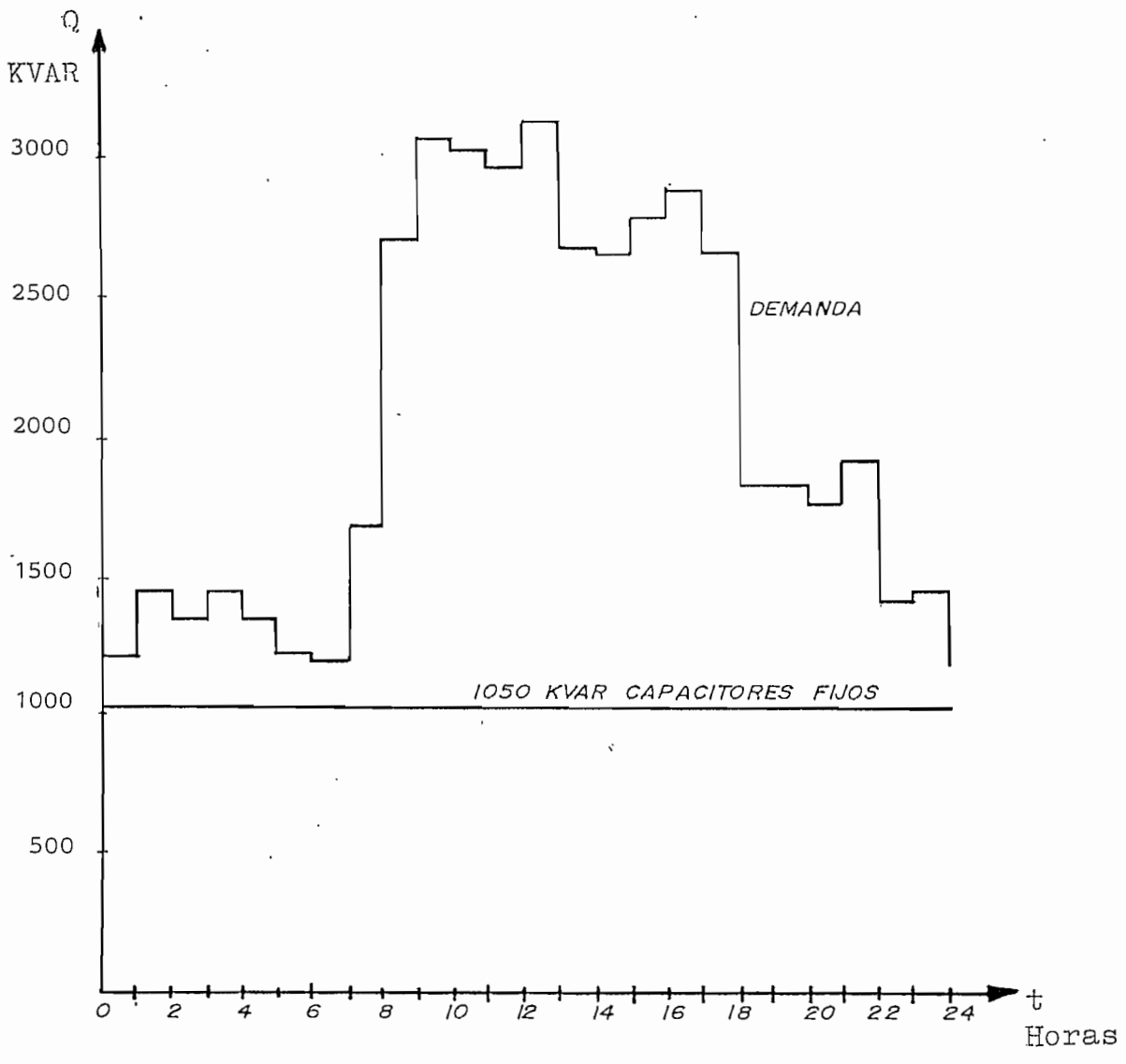


FIG. 24

Fig. 24. Requerimientos de potencia reactiva y capacidad instalada de capacitores fijos para el alimentador C de la Subestación Epiclachima.

erdidas sin apacitores $	BENEFICIOS Reduccion de perdidas de energia $	Liberacion de capacidad $	Costo de capacitores $	Beneficio neto $	INSTALACION DE CAPACITORES Localizacion y capacidad Nodo(KVAR)	Capacidad instalada total KVAR	Numero de bancos
. Capacitores fijos							
90414480	7641179	3331316	2042715	8929781	2702(150),2707(150),2708(150) 2710(150),2719(150),2726(150) 2734(150)	1050	7
. Capacitores conectables							
	3325594	1378522	4362139	341977	2708(150),2734(150),2748(150) 2754(150)	600	4

osto actual de energia = 6.6 $/kwh
osto por KVAR de capacitores conectables = 6667 $/KVAR

. Capacitores fijos							
45207240	3820590	3331316	2042715	5109191	2702(150),2707(150),2708(150) 2710(150),2719(150),2726(150) 2734(150)	1050	7
Capacitores conectables							
	1967565	1909656	3360616	516605	2708(150),2722(150),2737(150) 2748(150),2753(150),2754(150)	900	6

sto actual de energia = 3.3 $/kwh
sto por KVAR de capacitores conectables = 3330 $/KVAR

TABLA 16. Instalacion de capacitores fijos y conectables en el alimentador C de la subestacion Epiclachima

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La aplicación de capacitores paralelo conduce a la disminución de la componente reactiva de la corriente de carga, dando como resultado una apreciable reducción de pérdidas de energía del sistema, así como también significativos beneficios por liberación de capacidad del sistema.

Se produce mejoramiento de los niveles de voltaje a lo largo del alimentador, lo cual da como resultado un incremento de los ingresos de la empresa gracias al mayor consumo de usuarios satisfechos con el servicio.

El método de variaciones locales optimiza el número, localización y tamaño de bancos de capacitores a instalarse sobre un alimentador primario, encontrando el máximo de la función objetivo descrita por los beneficios alcanzados mediante la instalación de capacitores, es decir, por reducción de pérdidas de energía y liberación de capacidad del sistema, tomando en cuenta los costos de instalación de los bancos. La función objetivo está sujeta a restricciones de elevación de voltaje en las horas de mínima demanda, lo cual restringe el grado de compensación con capacitores fijos.

Los beneficios logrados con la aplicación del método de variaciones locales son mayores a aquellos conseguidos con la regla de Neagle o regla de los 2/3 .

La instalación de capacitores conectables en alimentadores primarios de distribución no se justifica económicamente en nuestro medio, puesto que los beneficios alcanzados por reducción de pérdidas de energía y liberación de capacidad del sistema, no pueden financiar el costo de instalación de este tipo de capacitores, debido al costo elevado

del equipo de control necesario para sensar los requerimientos de potencia reactiva.

La instalación de capacitores conectables en alimentadores primarios de distribución puede justificarse económicamente en sistemas con altos costos de energía o en regiones donde la instalación de estos capacitores no requiera una excesiva inversión de capital.

El efecto de los factores de crecimiento de la carga, del factor de carga y el incremento del costo de energía varía para cada caso, dependiendo de las características del alimantador analizado.

La relación entre el factor de pérdidas y el factor de carga

$$FPER = 0.3\ FC + 0.7\ FC^2$$

utilizada en los países desarrollados no se cumple en nuestro medio. Se debe utilizar la expresión

$$FPER = m\ FC + (1 - m)FC^2$$

para determinar la relación entre los dos factores y en donde m depende de los valores de la curva de carga.

Una revisión de los resultados obtenidos permite concluir que la implementación del método de variaciones locales puede ser realizada para el estudio de compensación de reactivos por medio de capacitores paralelo en alimentadores primarios de distribución con miras tendientes a mejorar la eficiencia de los sistemas eléctricos.

APENDICE A

PROGRAMA DIGITAL

Título : MINIMIZACION DE PERDIDAS DE ENERGIA MEDIANTE LA INSTALACION DE CAPACITORES PARALELO EN ALIMENTADORES PRIMARIOS DE DISTRIBUCION.

Objetivo : El programa tiene como objetivo, determinar la óptima localización de capacitores paralelo tanto fijos como conectables sobre un alimentador primario de distribución, mediante la maximización de una función objetivo de beneficios y costos, que considera la reducción de pérdidas de energía, liberación de capacidad del sistema y los costos de capacitores instalados. La función objetivo considerada está sujeta a restricciones tanto lineales y de tipo no lineal.

Método de solución : La función objetivo de beneficios y costos se maximiza utilizando una técnica de búsqueda directa denominada Método de las variaciones locales. El método es aplicable a la localización de capacitores fijos y conectables.

- Optima instalación de capacitores fijos

El método inicia asignando una trayectoria de cero capacitores en todos los nodos del alimentador, luego se procede a incrementar un banco, cuya capacidad está dada por la mínima capacidad disponible en el mercado, en el primer nodo (ec. 79), realizado esto se evalúa la función objetivo (ec. 70) y pregunta si el valor calculado de dicha función es mayor que el valor de la función sin capacitores instalados y además si la restricción de voltaje (ec. 61) no ha sido violada.

Si las respuestas son afirmativas a las dos preguntas anteriores, el banco instalado es asignando al nodo considerado y se procede a realizar la misma operación en el siguiente nodo.

Si las respuestas han sido negativas a cualquiera de las preguntas realizadas, el banco asignado es removido (ec. 80) y se procede a realizar la operación en el nodo siguiente.

De esta forma se cumple la primera iteración, la trayectoria final al término de la primera iteración realizada, constituye la trayectoria inicial para la próxima iteración.

Al final de todas las iteraciones, la trayectoria que determina el máximo valor de la función objetivo y no viola la restricción de voltaje constituye la solución óptima del problema.

- Optima instalación de capacitores conectables

Se inicia asignando una trayectoria de cero bancos de capacitores en cada nodo del alimentador. Se incrementa un banco en el primer nodo del alimentador (ec.79) y se procede a evaluar la función objetivo para el caso de los capacitores conectables (ec. 75), luego se pregunta si el valor calculado de la función luego de la instalación del primer banco es mayor que el valor de la función sin capacitores.

Si la respuesta es afirmativa el banco asignado es entonces instalado en el nodo considerado, en caso contrario el banco es removido (ec. 80) y se procede a asignar un banco en el nodo siguiente. Así se cumple la primera iteración, la trayectoria al final de esta iteración constituye la trayectoria inicial para la próxima iteración. Al final de todas las iteraciones, la trayectoria que determina el máximo valor de la función objetivo constituye la solución óptima para el caso de los capacitores conectables.

La restricción de voltaje no es considerada en este análisis.

Descripción del programa digital.

El programa consta del programa principal y las subrutinas detalladas a continuación:

. Subrutina INPUT

Lee los datos requeridos por el programa y que constan en la sección nomenclatura de este apéndice.

. Subrutina VERIFY

Verifica si los datos han sido proporcionados al programa de una manera correcta. En caso de que la información sea suministrada incorrectamente se detiene la

ejecución del programa y se entrega el respectivo aviso de error.

. Subrutina REOR

Reenumera los datos de los nodos del alimentador, lo cual permitirá acumular las corrientes inductivas y capacitivas en cada segmento del alimentador, mediante la subrutina SUMAX.

. Subrutina SUMAX

Utiliza los resultados de la subrutina REOR y calcula las corrientes acumuladas en cada uno de los segmentos del alimentador.

. Subrutina IINDU

Calcula las corrientes inductivas en cada uno de los nodos del alimentador y mediante la subrutina SUMAX, calcula las corrientes en cada segmento.

. Subrutina OUTPU

Imprime los títulos con información referente al alimentador analizado, y al sistema de distribución que alimenta la carga servida por dicho alimentador.

. Subrutina VECTO

Calcula y almacena en vectores los valores de incremento anual de la carga, del factor de carga, del factor de pérdidas, el crecimiento del costo de la energía y costos de mantenimiento de los capacitores. Traslada además las cantidades a valor presente de los beneficios y costos del proyecto, en por unidad, para luego ser aplicados sobre la función objetivo en las subrutinas OBJEC y OBCON.

. Subrutina ICAPA

Calcula las corrientes capacitivas en cada nodo del

alimentador mediante los datos de capacidad mínima del banco, voltaje y asignación de bancos realizada por la subrutina MLVFI. Luego mediante la subrutina SUMAX, calcula las corrientes capacitivas acumuladas en cada uno de los segmentos del alimentador.

. Subrutina OBJEC

Calcula la función objetivo para el caso de los capacitores fijos en base a las corrientes inductivas, capacitivas y vectores de incrementos anuales calculados previamente en las subrutinas IINDU, ICAPA y VECTO respectivamente, además de los datos proporcionados al programa. Evalúa los beneficios por reducción de pérdidas de energía (ec. 25), liberación de capacidad de la subestación (ec. 43) y los costos de los capacitores fijos (ec. 47) y evalúa los beneficios netos de la instalación de capacitores.

. Subrutina GANAN

Calcula la ganancia de voltaje en cada uno de los nodos del alimentador en horas de mínima demanda, lo cual representa una restricción a ser tomada en cuenta en la determinación de la óptima instalación de capacitores fijos (ec. 61).

. Subrutina MLVFI

Calcula la trayectoria de instalación de bancos de capacitores fijos en el alimentador que determina el máximo valor de la función objetivo y que no viola la restricción de voltaje en horas de mínima demanda, este cálculo se lo realiza en base al algoritmo que describe el método de las variaciones locales analizado en el capítulo IV.

. Subrutina PERF1

Calcula el perfil de voltaje en el alimentador antes de la instalación de capacitores fijos.

. Subrutina PERF2

Calcula el perfil de voltaje luego de la instalación de capacitores fijos, en la hora de máxima demanda.

. Subrutina PSINCA

Calcula las pérdidas en energía imputables a las pérdidas I^2R en el alimentador, antes de la instalación de capacitores (ec. 10).

. Subrutina SALID

Imprime los resultados referentes a la óptima instalación de capacitores fijos. Se da un listado que indica los beneficios alcanzados mediante la instalación de capacitores fijos debidos a la reducción de pérdidas en energía, liberación de capacidad de la subestación, costos de los capacitores y beneficio neto. Además se presenta los resultados de ubicación tamaño y número de bancos a ser instalados, así como también la ganancia de voltaje en cada uno de los nodos del alimentador en horas de mínima demanda. Por último se presenta un listado de los perfiles de voltaje sin capacitores, con capacitores fijos en las horas de máxima y mínima demanda.

. Subrutina CONEC

Calcula la óptima instalación de capacitores conectables, utilizando el método de las variaciones locales aplicado al caso de este tipo de capacitores.
Una vez calculada la óptima trayectoria de capacitores conectables a ser instalados en el alimentador , imprime los resultados obtenidos.

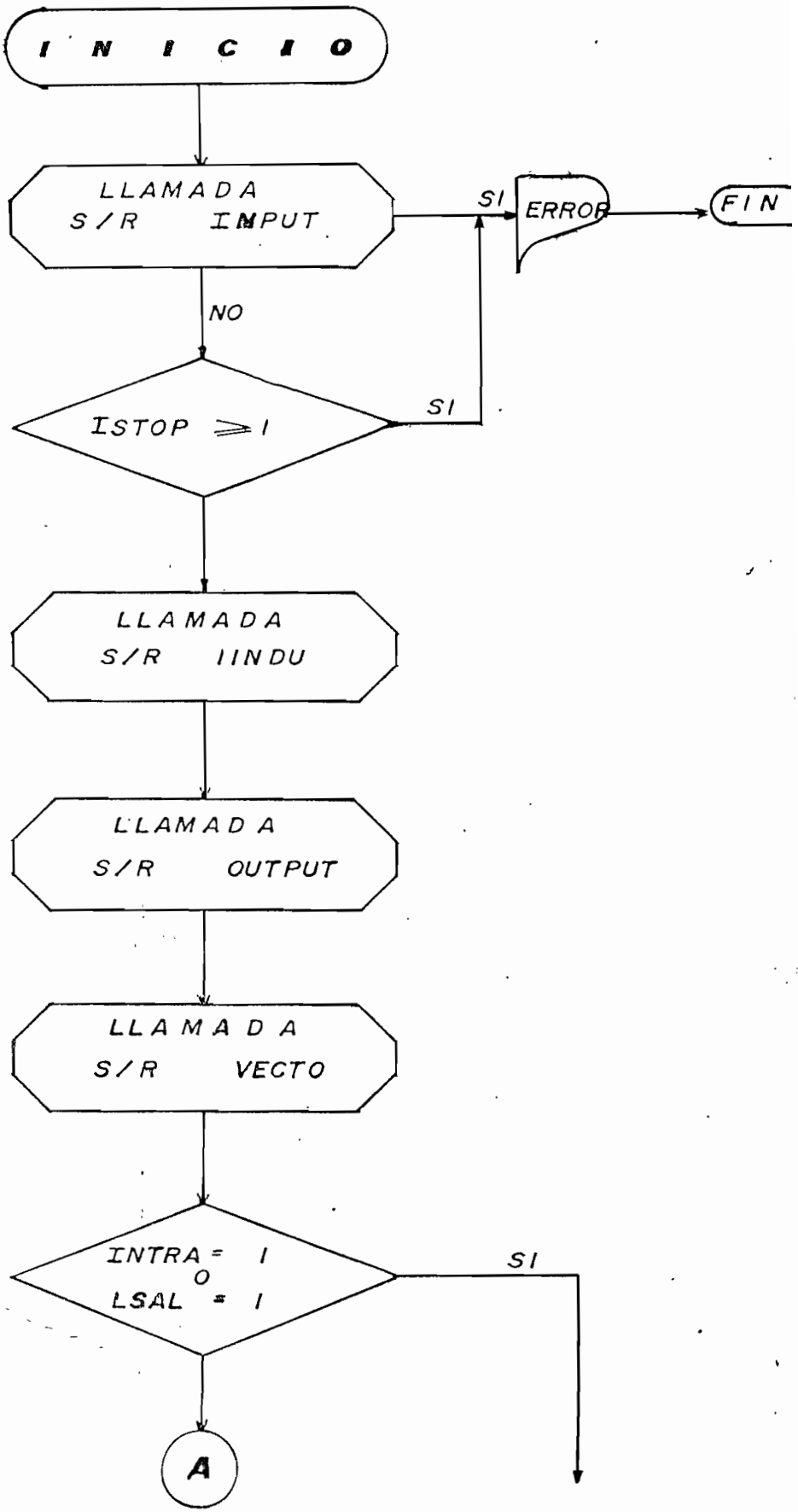
. Subrutina OBCON

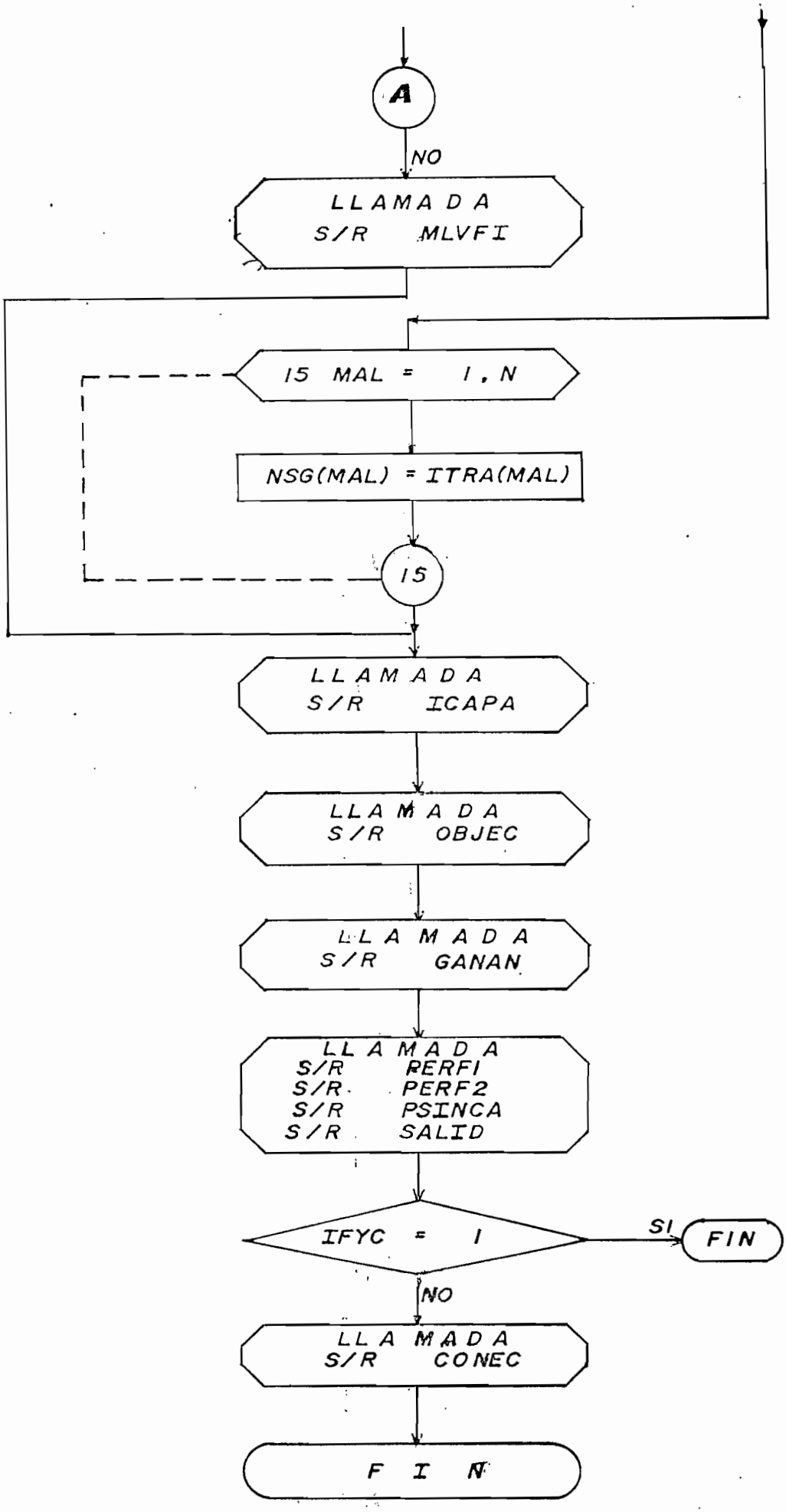
Calcula la función objetivo para el caso de los capacitores conectables (ec. 65) . Evalúa los beneficios alcanzados por reducción de pérdidas de energía mediante la ec. 31, liberación de capacidad de la subestación (ec. 43) y costos de los capacitores conectables (ec. 47) y por último evalúa el beneficio neto alcanzado mediante la aplicación de capacitores conectables.

Diagramas de flujo

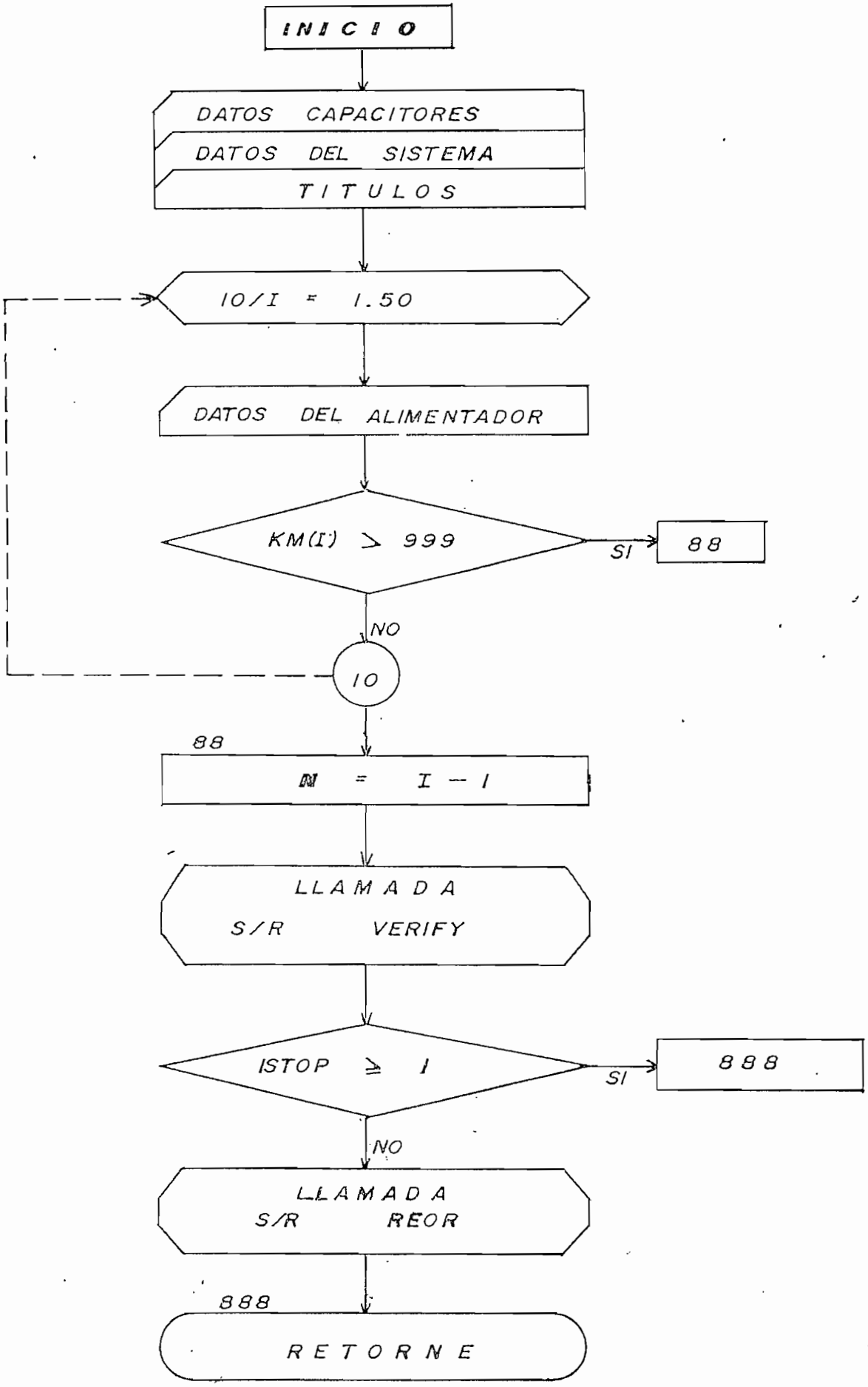
A continuación se presentan los diagramas de flujo, tanto del programa principal, como de las subrutinas desarrolladas en esta tesis, lo cual permite visualizar , en mejor forma los pasos seguidos en el programa digital.

PROGRAMA PRINCIPAL

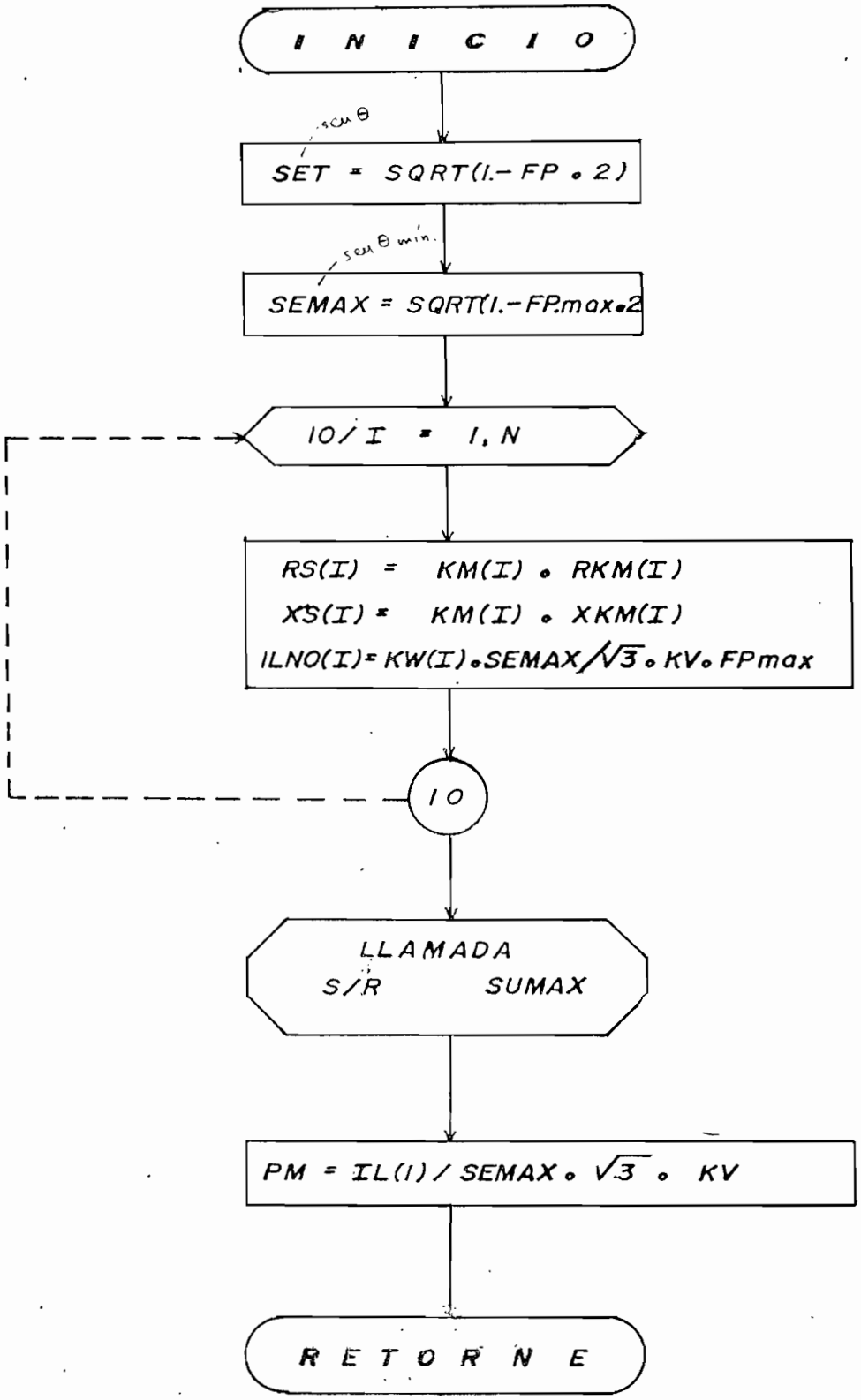


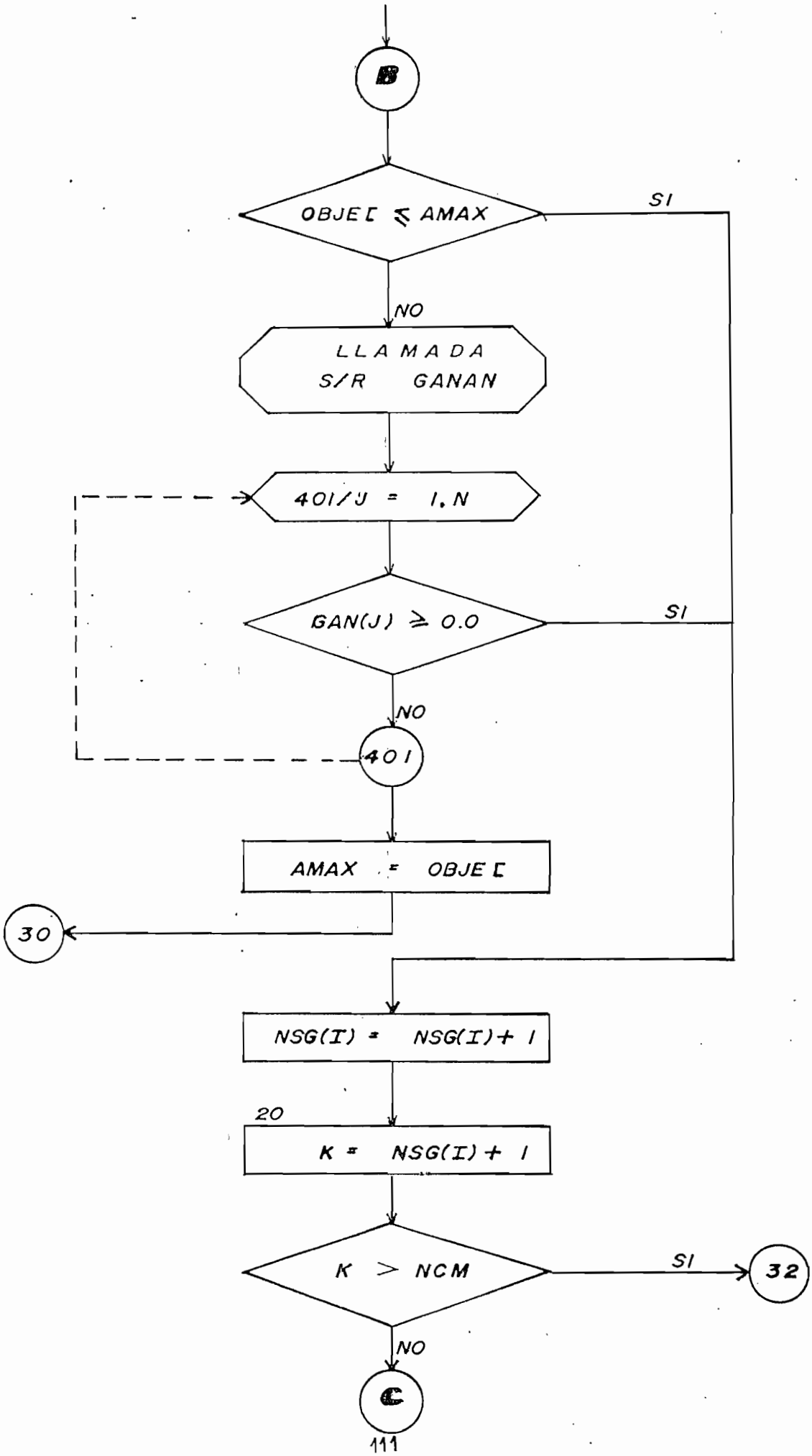

A
NO
LLAMADA
S/R MLVFI
15 MAL = 1, N
NSG(MAL) = ITRA(MAL)
15
LLAMADA
S/R ICAPA
LLAMADA
S/R OBJEC
LLAMADA
S/R GANAN
LLAMADA
S/R PERFI
S/R PERF2
S/R PSINCA
S/R SALID
IFYC = 1
SI
FIN
NO
LLAMADA
S/R CONEC
FIN

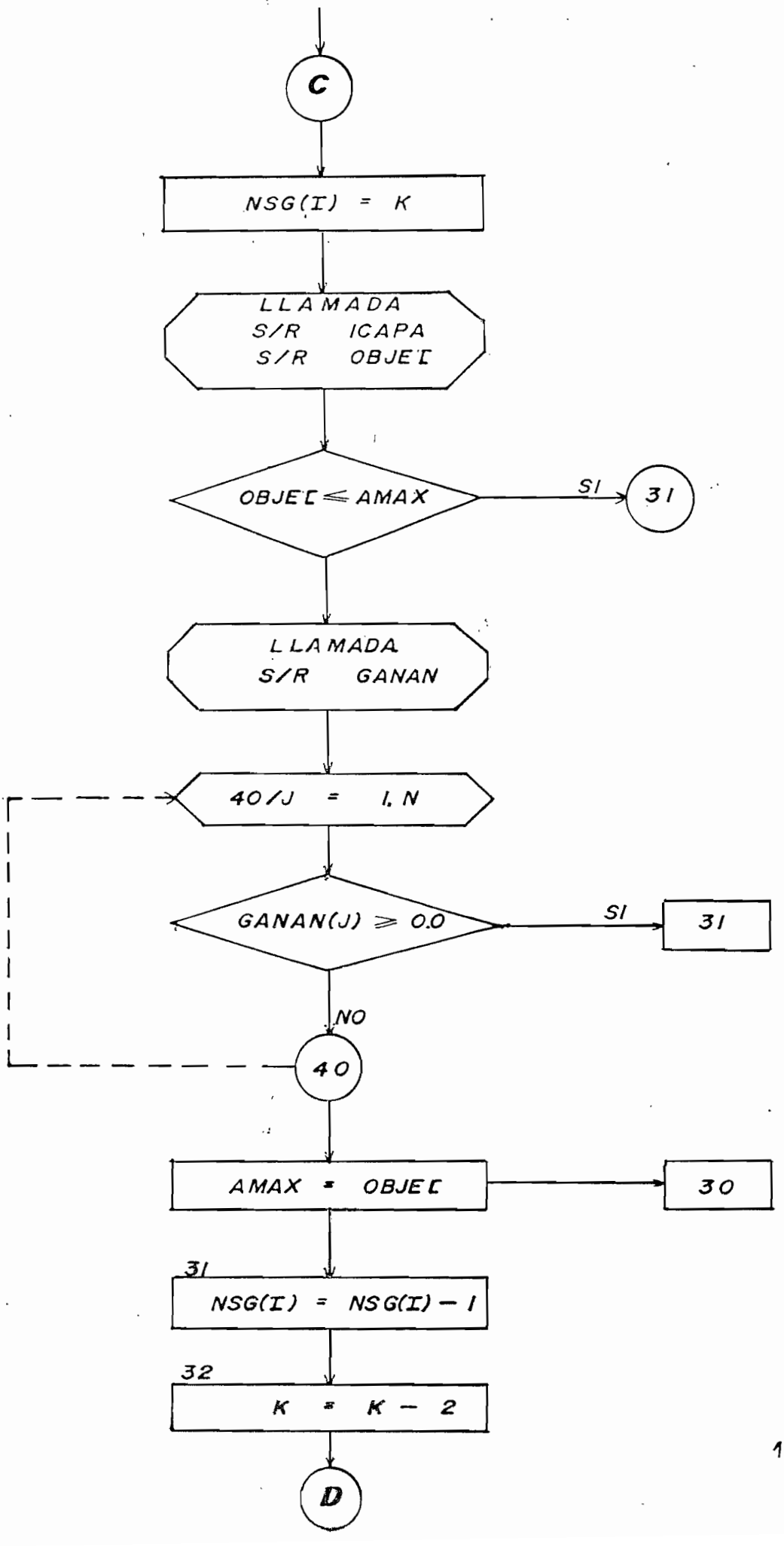
SUBROUTINE INPUT

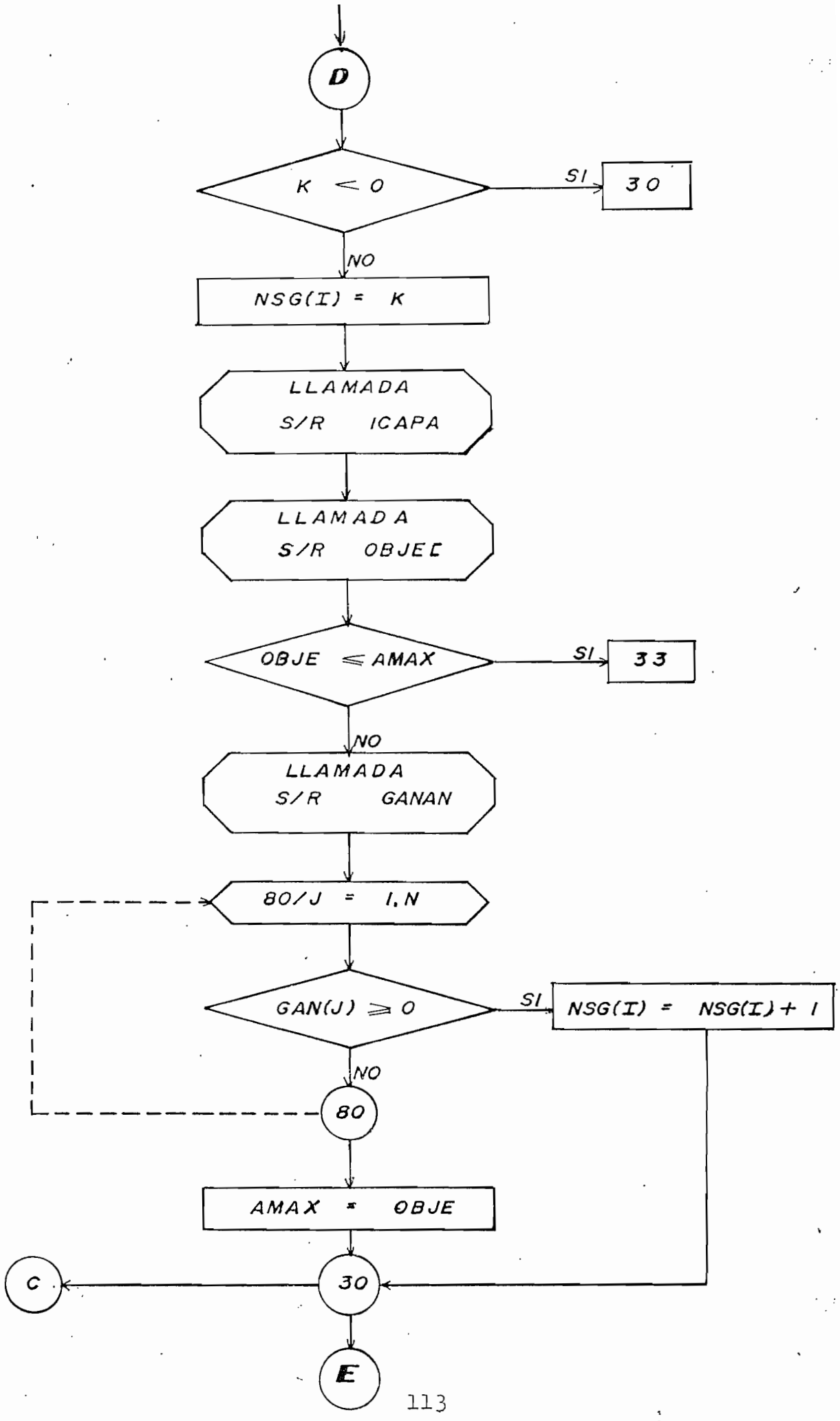


SUBRUTINA IINDU

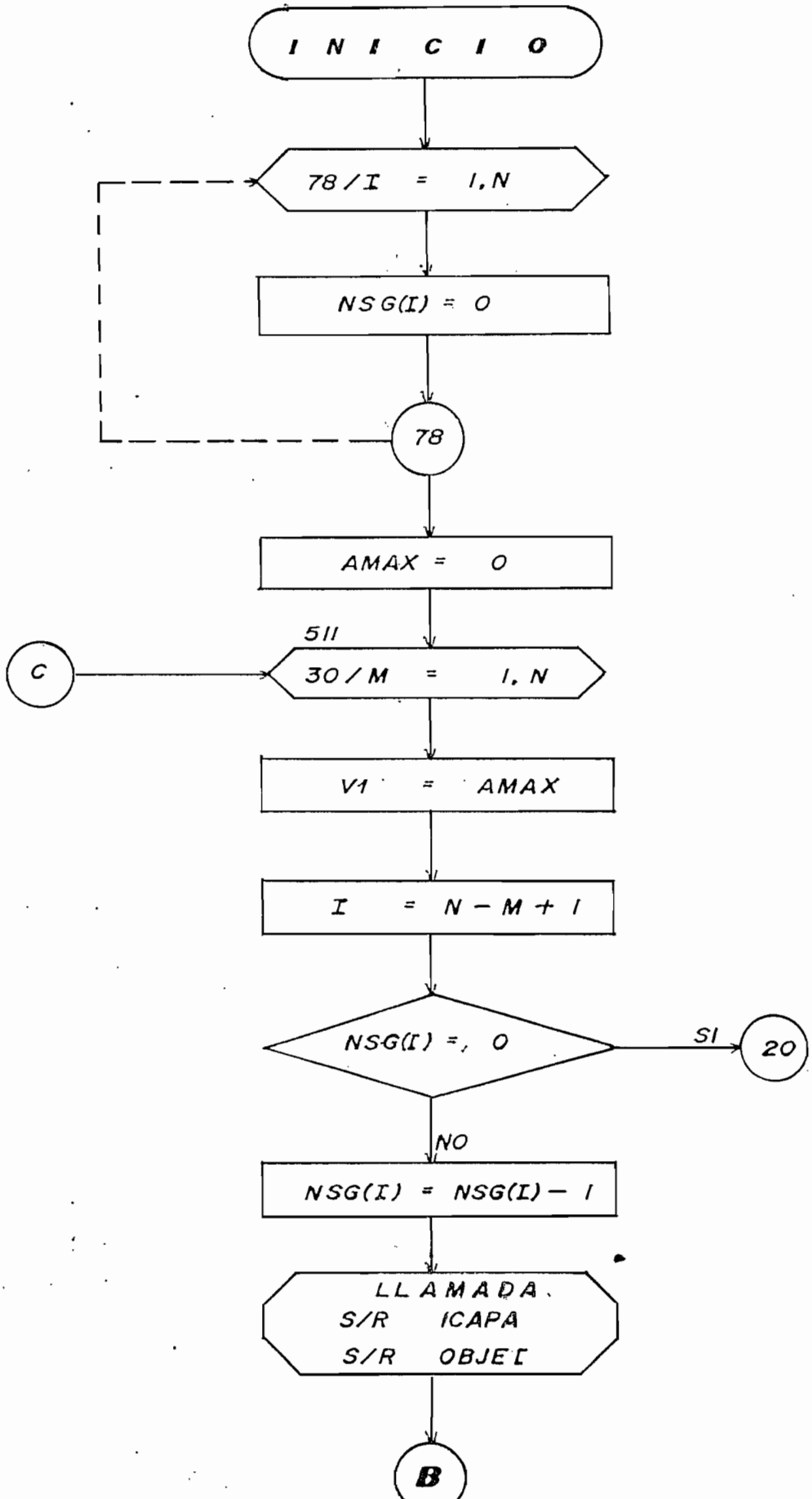


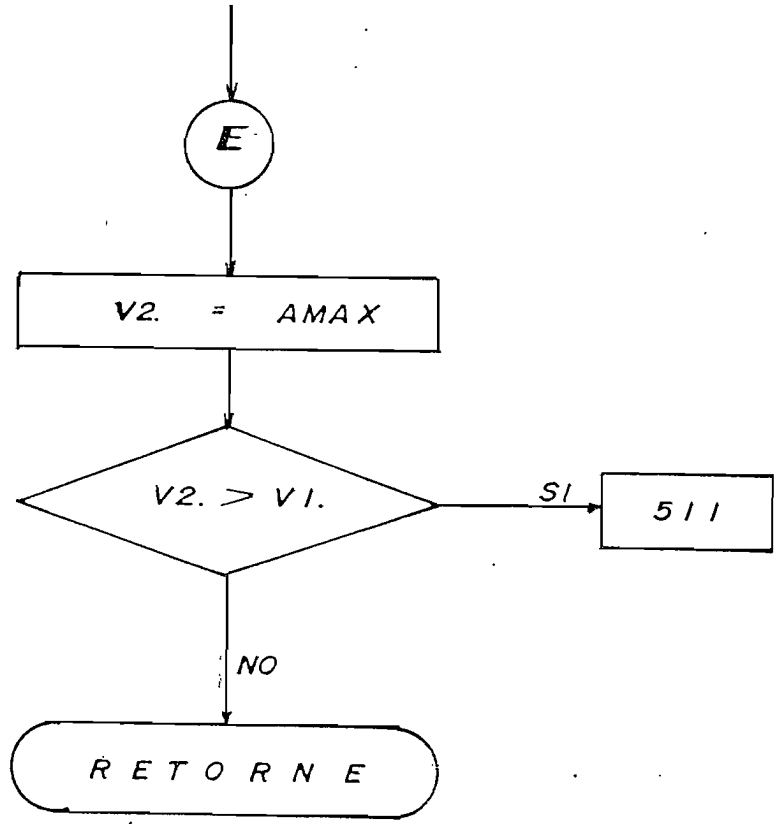

B
OBJET ≤ AMAX
SI
NO
LLAMADA S/R GANAN
401 J = 1, N
GAN(J) ≥ 0.0
SI
NO
401
AMAX = OBJET
30
NSG(I) = NSG(I) + 1
20
K = NSG(I) + 1
K > NCM
SI
32
NO
C


C
NSG(I) = K
LLAMADA
S/R ICAPA
S/R OBJET
OBJET ≤ AMAX
SI
31
LLAMADA
S/R GANAN
40 J = 1, N
GANAN(J) ≥ 0.0
SI
31
NO
40
AMAX = OBJET
30
31
NSG(I) = NSG(I) - 1
32
K = K - 2
D

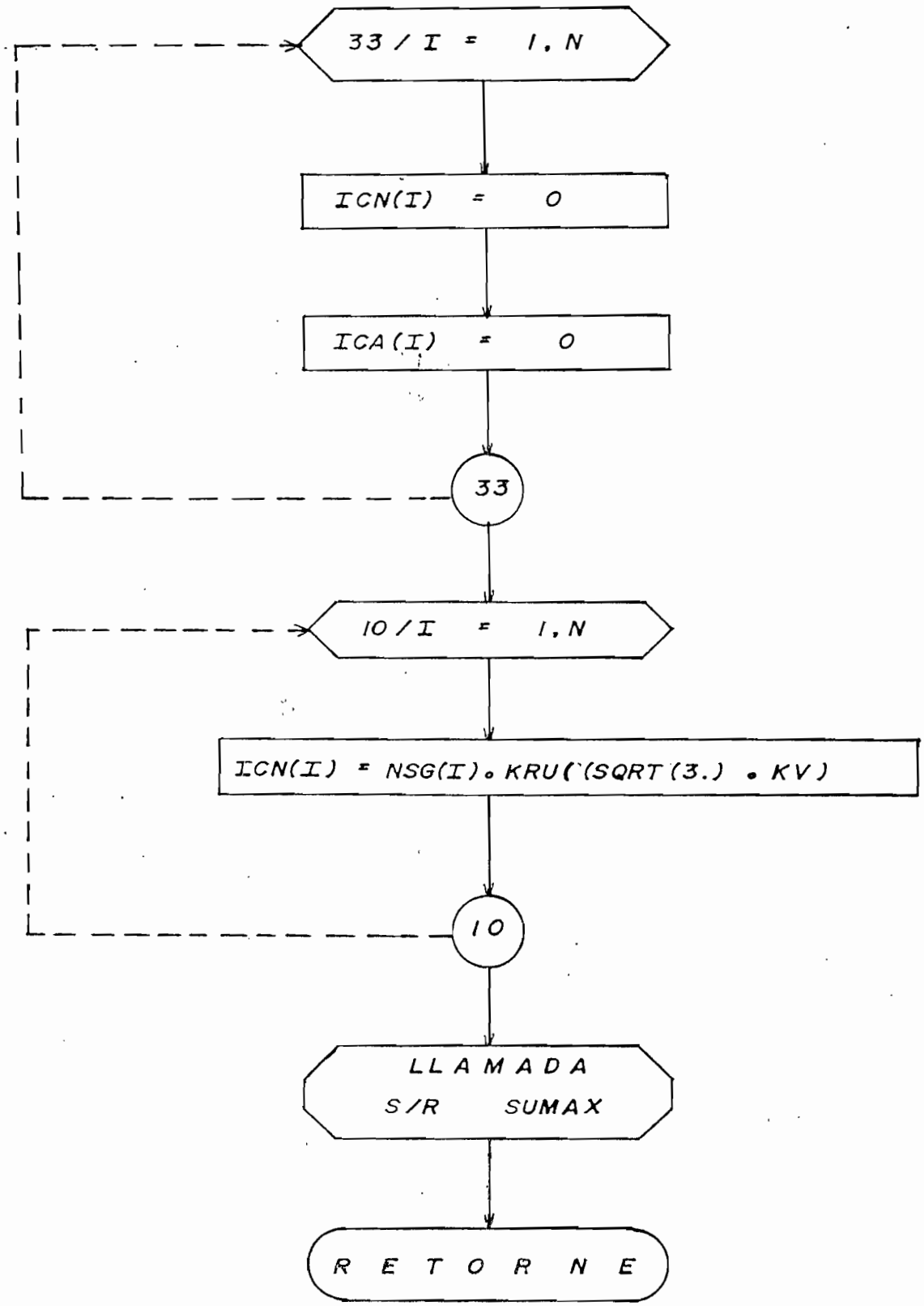

D
K < 0
SI
30
NO
NSG(I) = K
LLAMADA
S/R ICAPA
LLAMADA
S/R OBJEC
OBJE ≤ AMAX
SI
33
NO
LLAMADA
S/R GANAN
80/J = 1,N
GAN(J) ≥ 0
SI
NSG(I) = NSG(I) + 1
NO
80
AMAX = OBJE
C
30
E

SUBRUTINA MLVFI

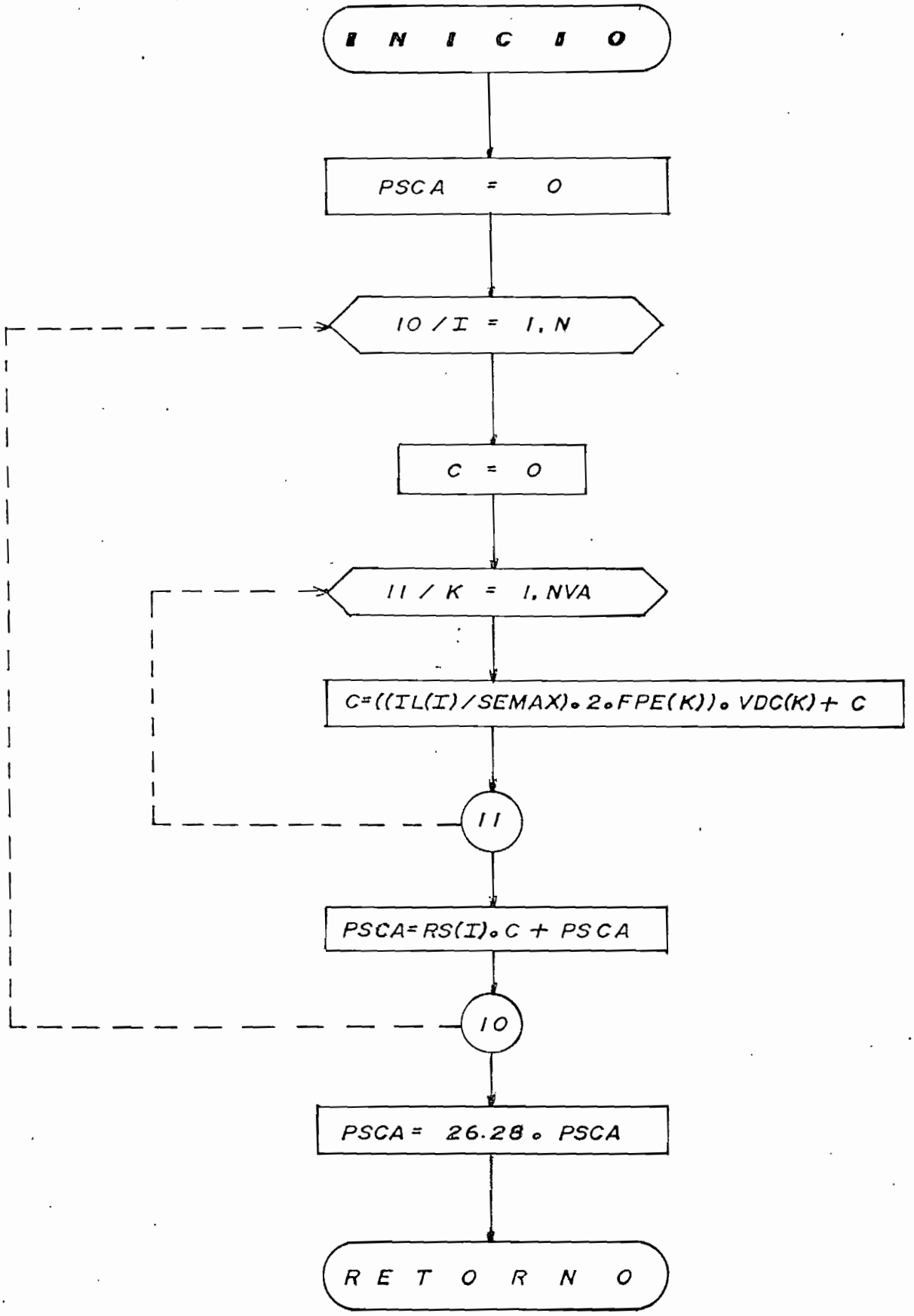



E
V2. = AMAX
V2. > V1.
SI
511
NO
RETORNE

SUBRUTINA ICAPA



SUBRUTINA PSINCA



Nomenclatura

Variables de entrada :

SIMBOLO	FORMATO	DESCRIPCION
TIT	80A1	Cualquier información en cuatro tarjetas que se desee introducir respecto al caso analizado. Si no se suministra esta información, deberá proporcionarse cuatro tarjetas en blanco.
NCM	I10	Número máximo de unidades de capacitores trifásicas que pueden instalarse en una estructura.
KRU	F10.2	Mínima capacidad del banco de capacitores trifásico disponible en el mercado (KVAR)
E	F10.3	Costo unitario por KVAR de capacitores fijos, en miles de sucres/ KVAR.
D	F10.3	Costo de instalación de un banco de capacitores en miles de sucres.
H	F9.3	Cargas anuales sobre el capital invertido en los capacitores fijos, por concepto de mantenimiento, en tanto por ciento.
NVA	I3	Número de años de vida útil de los capacitores.
CACF	F7.4	Costo requerido para suplir un KVA adicional en A/P en miles de sucres.
FCF	F7.4	Factor de carga en el último año de vida de los capacitores en por unidad.

SIMBOLO	FORMATO	DESCRIPCION
CK	F10.4	Costo actual de la energía en miles de sucres.
CPO	F10.4	Costo requerido para suplir un KVA adicional en subestaciones en miles de sucres.
TCE	F10.4	Taza anual de incremento del costo de la energía, en porcentaje del costo actual.
R	F10.4	Taza de actualización de los beneficios y costos obtenidos a través de los NVA años de vida de los capacitores, en tanto por ciento.
G	F10.4	Taza anual de incremento de la carga en el alimentador, en tanto por ciento.
FRD	F10.4	Relación entre la mínima demanda y la demanda pico en el alimentador, en por unidad.
M	I10	Período sobre el cual el alimentador puede aceptar incremento de carga, en años.
KV	F10.4	Voltaje nominal de trabajo del alimentador, en kilovoltios.
KVI	F10.4	Voltaje mínimo permitido en el alimentador, en voltios.
KVS	F10.4	Voltaje máximo permitido en el alimentador, en voltios.

SIMBOLO	FORMATO	DESCRIPCION
FP	F10.4	Factor de potencia de la carga en mínima demanda, en p.u.
LFI	F10.4	Factor de carga reactivo actual, p.u.
LFF	F10.4	Factor de carga reactivo en el último año de vida de los capacitores, en p.u
IA,IM,ID	I6,2I2	Fecha de realización del estudio, año, mes y día respectivamente.
IFYC	I10	Indicador, 0 realiza estudio de capacitores fijos y conectables, 1 solo capacitores fijos.
INTRA	I5	Indicador, 0 se aplica método de variaciones locales, 1 se analiza una trayectoria dada.
ITICE	I5	Indicador, 0 si la taza de crecimiento del costo de energía es constante, 1 si la taza varía en el tiempo.
LSAL	I10	Indicador, 0 se analiza capacitores fijos y conectables, 1 se analiza solo capacitores conectables y debe darse una trayectoria dada.
TVAR	F7.4	Si el valor de ITICE es 1, se proporcionará el costo proyectado de energía en por unidad del costo actual, para cada uno de los años de vida útil de los capacitores, si el valor de ITICE es 0, se deberá suministrar tres tarjetas en blanco.
IAA	I10	Indicador, si se considera la liberación de capacidad del alimentador su

SIMBOLO	FORMATO	DESCRIPCION
		valor es 1, si no se considera la liberación de capacidad del alimentador, su valor es 0.
FACTOR	F10.4	Relación entre la carga reactiva promedio en el período de conexión de los capacitores conectables, a la máxima carga inductiva recordada en el año, en por unidad.
TCON	F10.4	Período en el cual entran en servicio los capacitores conectables durante el ciclo diario de carga, en horas.
ECON	F10.4	Costo unitario por KVAR de capacitores conectables, en miles de sucres por KVAR.
DCON	F10.4	Costo de instalación de los capacitores conectables, en miles de sucres.
HCON	F10.4	Cargas anuales sobre el capital de los capacitores conectables imputables al mantenimiento ocasional, reemplazo de accesorios, en tanto por ciento del costo total de instalación del banco considerado.
CRU	F10.4	Capacidad mínima de un banco de capacitores conectables en KVAR
NMCON	I2	Número máximo de bancos de capacitores conectables que pueden

SIMBOLO	FORMATO	DESCRIPCION
		instalarse en una estructura.
FPMAX	F10.3	Factor de potencia de la carga en la hora de máxima demanda, en p.u.
NP	I5	Nodo de envío en un segmento del alimentador.
NQ	I5	Nodo de recepción en un segmento del alimentador.
KM	F10.3	longitud del segmento (distancia entre los nodos NP y NQ) en kilómetros.
RKM	F10.5	Resistencia del conductor entre los nodos NP y NQ del segmento considerado del alimentador, en ohmios/kilómetro
XKM	F10.5	Reactancia del conductor entre los nodos NP y NQ del segmento considerado del alimentador, en ohmios/kilómetro.
KW	F9.2	Carga en kilovatios en el nodo NQ del segmento considerado del alimentador.
ITRA	I4	Si el valor del indicador INTRA es 0, este campo irá en blanco, si el valor del indicador INTRA es 1 deberá proporcionarse la trayectoria a ser analizada, lo mismo sucede si LSAL tiene el valor 1 .
DAP	F6.2	Costo adicional de instalación de los capacitores, imputable a la construcción y costo de una estructura. En caso de que la estructura encontrada por el programa sea óptima para la instalación de un banco de capacitores y tuviera instalado un transformador,

SIMBOLO	FORMATO	DESCRIPCION
		en este caso se suministra el costo adicional en estructura; si el nodo no tiene instalado un transformador, el capacitor se instala en la misma estructura y se deja este campo en blanco.
VCCD	F5.1	Valores de potencia de la curva de carga diaria del alimentador en KVA, se suministra doce valores por tarjeta.

Variables de salida :

Para la salida del programa que comprende: encabezamiento del listado de resultados, datos generales del sistema de distribución, datos del alimentador particular y resultados de la instalación óptima de capacitores en lo que se refiere a su ubicación, tamaño y número, pérdidas de energía en el alimentador sin capacitores, beneficios por reducción de pérdidas de energía luego de la instalación de los capacitores, beneficios por liberación de capacidad de la subestación y costos de los bancos de capacitores instalados, corrientes inductivas y capacitivas en los segmentos del alimentador, ganancia de voltaje en las horas de mínima demanda, perfiles de voltaje antes y después de la instalación de capacitores y otras características analizadas, la nomenclatura utilizada es la siguiente :

SIMBOLO	DESCRIPCION
FC	Factor de carga del alimentador
FP	Factor de pérdidas del alimentador
VDEM	Valor de m en la ecuación 4 del capítulo I
PSCA	Pérdidas de energía en el alimentador, antes de la instalación de los capacitores, en miles de sucres.

SIMBOLO	DESCRIPCION
EOBJ	Beneficios alcanzados por la reducción de pérdidas de energía debida a la instala - ción de capacitores fijos, en miles de sucres.
SOBJ	Beneficios alcanzados por la liberación de capacidad de la subestación debida a la - instalación de capacitores fijos, en miles de sucres.
CCAP	Costos de instalación y mantenimiento de los capacitores fijos, en miles de sucres
OBJE	Beneficios netos alcanzados mediante la óptima instalación de capacitores fijos.
IL	Corriente inductiva acumulada en los segmentos del alimentador, en amperios.
NSG	Número de unidades capacitivas a ser instaladas en un nodo.
CKVAR	Capacidad del banco de capacitores fijos, a ser instalados en KVAR.
ICN	Corriente capacitiva en el nodo NQ del segmento considerado, debida a la instalación del banco de capacitores fijos.
ICA	Corriente capacitiva acumulada en cada uno de los segmentos del alimentador, en amperios.
GAN	Ganancia de voltaje en las horas de mínima demanda debida a la instalación de los capacitores fijos.

SIMBOLO	DESCRIPCION
VOL	Voltaje en los nodos del alimentador antes de la instalación de los capacitores fijos en la hora de demanda máxima, en voltios.
VOLDOS	Voltaje en los nodos del alimentador luego de la instalación de los capacitores fijos en la hora de máxima demanda, en voltios.
VOMAX	Voltaje en los nodos del alimentador luego de la instalación de los capacitores fijos en la hora de mínima demanda, en voltios.
EICON	Beneficios alcanzados por reducción de pérdidas de energía durante el período de conexión de los capacitores conectables, en miles de sucres.
SLCON	Beneficios alcanzados por la liberación de capacidad de la subestación en el período de conexión de los capacitores conectables, en miles de sucres.
CCCON	Costos de instalación y mantenimiento de los capacitores conectables, en miles de sucres.
OBCO	Beneficios netos alcanzados mediante la instalación de los capacitores conectables, en miles de sucres.
NCON	Número de unidades capacitivas trifásicas conectables instaladas en un nodo del alimentador.
CCONEC	Capacidad del banco de capacitores conectables trifásico instalado en un nodo del alimentador, en KVAR.

Forma de proporcionar los datos

Para el cálculo de cualquier problema, se deben introducir todos los datos indicados en las variables de entrada y en la forma indicada en el esquema No. 1, con los adecuados formatos.

El nombre ó cualquier información adicional del sistema, se proporciona en las primeras cuatro tarjetas, en caso contrario, se suministra cuatro tarjetas en blanco Los datos generales del sistema de distribución, se introducen en tres tarjetas.

La información referente al tipo de estudio a realizar, deberá definirse en la siguiente tarjeta, esto permitirá el estudio de capacitores fijos y conectables, ó solo fijos ó solo conectables. Además si la taza de incremento del costo de la energía es constante o variable , deberá definirse en esta tarjeta.

En lo referente a los datos de los segmentos del alimentador, se proporcionará en cada tarjeta los datos de un segmento y se suministrará una tarjeta adicional al fin de estos datos, la información entregada en esta tarjeta deberá llevar el nodo final del alimentador, un nodo ficticio y en el campo reservado para la longitud de este segmento ficticio un valor de 1000. kilómetros, esto permitirá determinar el número de segmentos reales del alimentador.

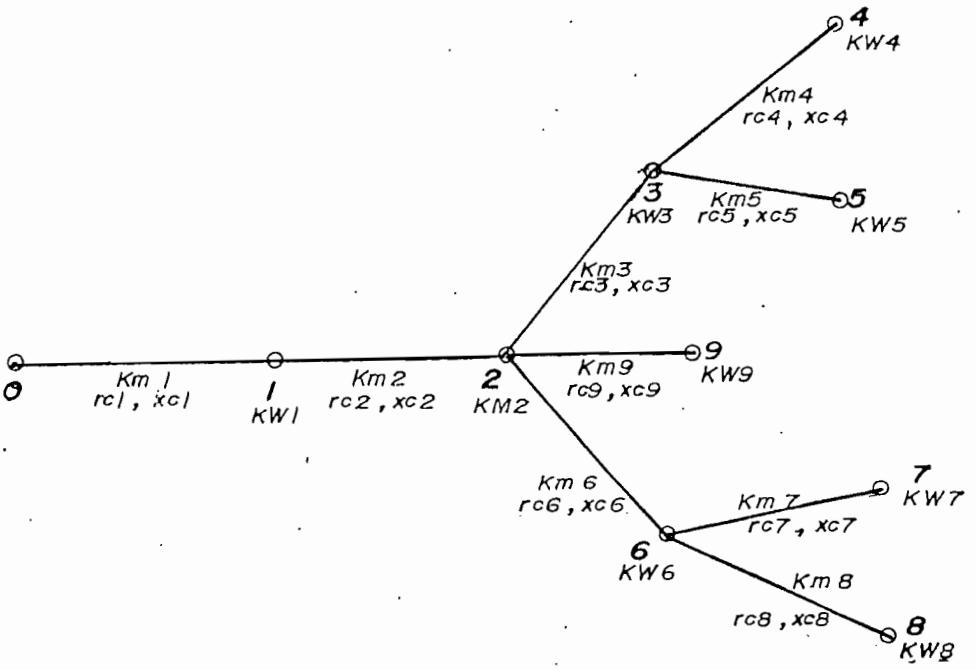
En los esquemas 2 y 3 , se detalla la forma adecuada de proporcionar los datos al programa, para el caso de los dos ejemplos de aplicación.

Restricciones

El programa realizado, permite el estudio de cualquier tipo de alimentador radial, esto es , permite la óptima instalación de capacitores fijos y conectables en ali - mentadores primarios radiales con ramificaciones y sub- ramificaciones. El programa tiene capacidad para anali- zar alimentadores hasta con 50 segmentos, pero esta ca- pacidad puede ser aumentada cambiando los dimensiona - mientos.

La única restricción importante se refiere al hecho que debe proporcionarse la información de los segmentos del alimentador en la forma que detallamos abajo con un ejem plo, esto permite la adecuada acumulación de corrientes inductivas y capacitivas en los segmentos del alimenta- dor, lo cual es básico para alcanzar la óptima solución del problema.

Dado el siguiente alimentador:



Los segmentos cuyos nodos sean terminales del alimenta - dor, es decir refiriéndonos a la figura anterior, nodos

4, 5, 7, 8, y 9 y que no tengan carga conectada en condiciones normales de operación, no entrarán en el estudio y sus datos no deben constar en la lista de variables, puesto que esto ocasionará la existencia de corrientes inductivas nulas en el segmento considerado, lo cual no es aceptado por el algoritmo de solución del método aplicado.

Hechas estas restricciones, los datos para el alimentador de la figura deberán ser proporcionados como indica el siguiente listado.

NP	NQ	KM	RKM	XKM	KW
0	1	km_1	r_{c1}	x_{c1}	kw_1
1	2	km_2	r_{c2}	x_{c2}	kw_2
2	3	k_{m3}	r_{c3}	x_{c3}	kw_3
3	4	k_{m4}	r_{c4}	x_{c4}	kw_4
3	5	k_{m5}	r_{c5}	x_{c5}	kw_5
2	6	k_{m6}	r_{c6}	x_{c6}	kw_6
6	7	k_{m7}	r_{c7}	x_{c7}	kw_7
6	8	k_{m8}	r_{c8}	x_{c8}	kw_8
2	9	k_{m9}	r_{c9}	x_{c9}	kw_9
/					
9	10	1000.			

PROYECTO TESIS DE GRADO FORMATOS DE DATOS ESQUEMA No. 1

MINIMIZACION DE PERDIDAS MEDIANTE LA UTILIZACION DE CAPACITORES

- INFORMACION DEL ESTUDIO A REALIZAR CUATRO TARJETAS

TIT

80 A1

- DATOS GENERALES DEL SISTEMA Y ALIMENTADOR TRES TARJETAS

NCM	KRU	E	D	H	NVA	FCACFFCF
I10	F10.2	F10.3	F10.3	F9.3	I3	F7.4 F7.4

CK	CPO	TCE	R	G	FRD	M
F10.4	F10.4	F10.4	F10.4	F10.4	F10.4	I10

KV	KVI	KVS	FP	LFI	LFF	IA	IMID
F10.4	F10.4	F10.4	F10.4	F10.4	F10.4	I6	I2I2

- INDICADORES DEL TIPO DE ESTUDIO UNA TARJETA

IFYC	INTRAITICE	LSAL	IAA
I10	I5 I5	I10	I10

- DATOS DE COSTOS UNITARIOS PROYECTADOS DEL KWH TRES TARJETAS

TVAR

F7.4 F7.4 F7.4 F7.4 F7.4 F7.4 F7.4 F7.4 F7.4 F7.4

- DATOS DE CAPACITORES CONECTABLES UNA TARJETA

FACTOR	TCON	ECON	DCON	HCON	CRU	NMCON	FPMAX
F10.4	F10.4	F10.4	F10.4	F10.4	F5.1	I5	F10.3

- DATOS DE LOS SEGMENTOS Y NODOS DEL ALIMENTADOR

NP	NQ	KM	RKM	XKM	KW	ITRA	DAP
I5	I5	F10.3	F10.5	F10.5	F9.2	I4	F6.2

- ULTIMO SEGMENTO

I5 I5 1000.

- VALORES DE LA CURVA DE CARGA DIARIA-VCCD- 2 TARJETAS

F5.1 F5.1 F5.1 F5.1 F5.1 F5.1 F5.1 F5.1 F5.1 F5.1 F5.1 F5.1

CODIFICACION DE DATOS EJEMPLO No.1 ESQUEMA No. 2
UBICACION DE CAPACITORES

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
TESIS DE GRADO -EPN-EEQ
EJEMPLO NO. 1 ALIMENTADOR IEEE

5	50.	0.1	0.5	5.	10	0.	0.45	
0.0003	0.06038	1.	1.0	10.	0.2			7
11.	10450.	11550.	0.7	0.2	0.45	850820		
0	0	0	0	0				

0.3	10.	0.2	0.5	1.	50.	5	0.7	
0	1	1.	.53	.3311	30.			
1	2	2.3	.53	.3311	128.			
2	3	0.8	.53	.3311	90.			
3	4	0.8	.53	.3311	30.			
4	5	3.	.88	.35	60.			
5	6	1.	.88	.35	30.			
6	7	0.8	1.34	.3787	30.			
7	8	0.8	1.34	.3787	15.			
8	9	1.9	1.34	.3787	30.			
9	10	0.9	1.34	.3787	30.			
10	11	0.8	1.34	.3787	20.			
11	12	2.4	1.34	.3787	60.			

codificacion de datos EJEMPLO No. 1(cont.) ESQUEMA No. 2

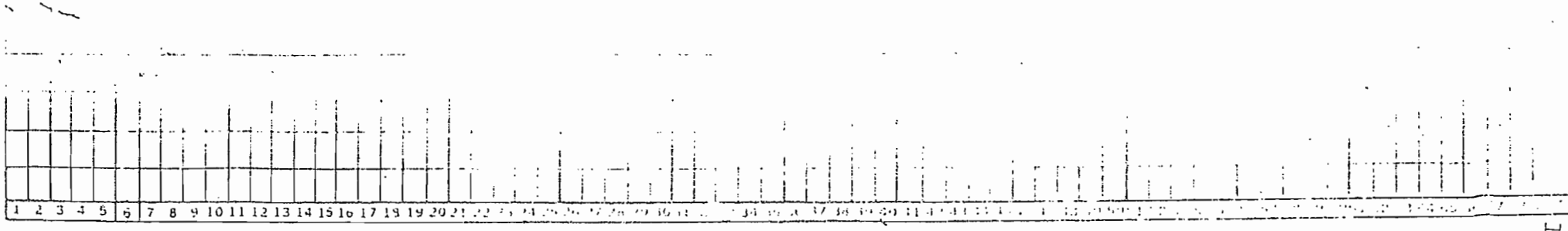
UBICACION DE CAPACITORES

12 13 1.8 1.34 .3787 20.

13 14 1000.

2. 3? 4. 5. 6. 2. 3 4. 5. 6. 7.

8. 9. 2. 3. 4. 5. 6. 7. 8. 2. 5.



PROYECTO CODIFICACION DE DATOS EJEMPLO No.2 ESQUEMA No.3 Hoja 1

UBICACION DE CAPACITORES

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
TESIS DE GRADO -EPN-EEQ
EJEMPLO ALIMENTADOR C -- 22.8KV S/E EPICLACHIMA

```
         8     150.      1.331      23.245      1.9   25    0.0,   0.726,
    .0033     7.74                  12.          9.          .0492
  22.8    21160.     23940.          .98         .66         .6615     850625
         0     0     1          0          0
 1.24    1.3888 1.5554 1.7421 1.9511 2.1853 2.3164 2.4553 2.6027 2.7588
 2.9244 3.0998 3.2858 3.4830 3.6919 3.9135 4.1483 4.3972 4.6610 4.9407
 5.2371 5.5113 5.8844 6.2375 6.6111
    .4922    24.          3.3       23.245       .6    150.      8      0.88
    0 2700        .21       .4094      .3219       .          .
 2700 2701        .15       .4094      .3219      16.6       36.254
 2700 2702        .55       .4094      .3219     542.          .
 2702 2703        .4       1.0338      .3566      31.5       36.254
 2702 2704        .125      .4094      .3219       .          .
 2704 2706        .54      1.0338      .3566     514.4       36.254
 2706 2707        .215     1.0338      .3566     589.1       36.254
 2706 2708        .27      1.0338      .3566    1068.6       36.254
 2704 2709        .365      .4094      .3219       .          .
 2709 2710        .07      1.0338      .3566      41.5       36.254
 2710 2711        .15      1.0338      .3566      83.        36.254
 2710 2712        .05      1.0338      .3566       .          .
```

PROYECTO: CODIFICACION DE DATOS EJEMPLO No. 2

ESQUEMA No. 3 HOJA 2

TEMA: UBICACION DE CAPACITORES

ALIMENTADOR C S/E EPICLACHIMA

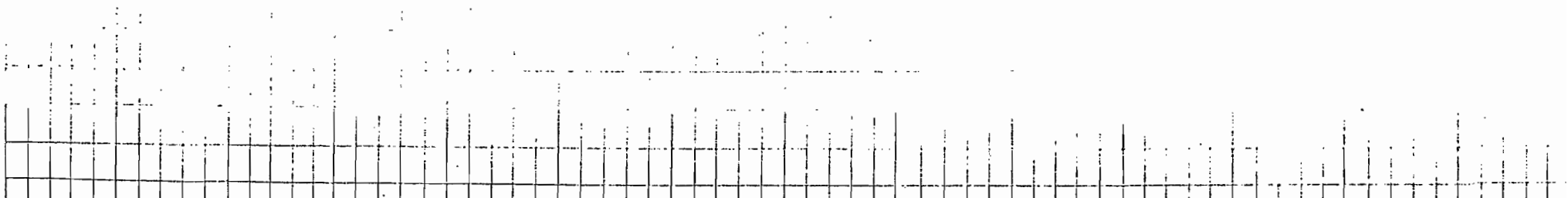
2712	2713	.145	1.0338	.3566	83.	36.254
2712	2714	.355	1.0338	.3566	207.	36.254
2709	2715	.22	.4094	.3219		
2715	2716	.215	.5988	.3566	113.9	36.254
2715	2717	.115	.4094	.3219		
2717	2718	.28	.6499	.3392	41.5	36.254
2717	2719	.39	.4094	.3219	110.6	36.254
2719	2721	.98	.4094	.3219	186.9	36.254
2721	2722	.2	1.0338	.3566	227.9	
2719	2724	.15	.3241	.3123		
2724	2725	.1	1.0338	.3566	130.	
2724	2726	.76	.3241	.3123	912.6	36.254
2726	2728	.055	.3241	.3123		
2728	2729	.37	.5154	.3304	76.3	36.254
2728	2730	.7	.4094	.3219		
2730	2732	.06	.4094	.3219		
2732	2734	.69	.6499	.3392	579.1	36.254
2732	2735	.27	.4094	.3219		
2735	2736	.29	1.0338	.3566	52.	
2735	2737	.54	.4094	.3219		
2737	2738	.1	.6499	.3392	99.	36.254
2737	2739	1.15	.4094	.3219		
2739	2740	.2	.6499	.3392		
2740	2741	.85	1.4849	.3957	11.1	36.254

CODIFICACION DE DATOS EJEMPLO No. 2
UBICACION DE CAPACITORES

ESQUEMA No. 3 hoja 3
ALIMENTADOR C. S/E EPICLACHIMA

2740	2742	.64	.6499	.3392	.	.
2742	2743	.2	1.4849	.3957	8.3	36.254.
2742	2744	.31	.6499	.3392	13.8	36.254
2744	2745	.625	.6499	.3392	55.3	36.254
2744	2746	.8	.6499	.3392	.	.
2746	2747	.98	.6499	.3392	62.2	36.254
2747	2748	.33	1.0338	.3566	41.5	36.254
2739	2750	.7	1.4849	.3957	.	.
2750	2751	.15	1.6427	.374	.	.
2751	2753	.19	1.6427	.374	.	.
2753	2754	.38	1.6427	.374	8.3	36.254
2754	2755	1000.				

3354.3356.3751.3751.3554.3554.4343.6318.6555.6515.6318.6713.
5726.5923.5726.5726.5133.4738.4738.4936.4936.3949.3751.3159.



La unidad elegida será :

5 y 7 para impresión en la consola

6 para impresión en papel, en la explicación anterior se ha elegido la unidad 7 para impresión en la consola.

RESULTADOS DEL PROGRAMA DE UBICACION OPTIMA DE CAPACITORES

--ESCUELA POLITECNICA NACIONAL-----UBICACION OPTIMA DE CAPACITORES----PAG.: 1
--FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA----------FECHA: 85/ 5/30

DATOS GENERALES

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL - QUITO
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
TESIS DE GRADO - EPN-EEQ
EJEMPLO DEL ALIMENTADOR DEL ARTICULO IEEE

NO. MAXIMO DE UNIDADES CAPACITIVAS POR NODO:	5
COSTO FIJO DE CAPACITORES ($X1000):	.500
CAPACIDAD DE UNA UNIDAD CAPACITIVA 3F(KVAR):	50.00
CARGAS ANUALES SOBRE COSTO CAPACITORES (%):	5.000
COSTO VARIABLE DE CAPACITORES ($X1000/KVAR):	.100
VIDA UTIL DE LOS CAPACITORES (ANIOS):	10
COSTO ACTUAL DE ENERGIA ($X1000/KWH):	.0003
TAZA DE CRECIMIENTO DE LA DEMANDA (%):	10.0000
COSTO CAPACIDAD DE SUBESTACION ($X1000/KVA):	.0604
RELACION DEMANDAS MINIMA/MAXIMA(P.U.):	.2000
TAZA DE CRECIMIENTO DE COSTO DE ENERGIA(%):	1.0000
PERIODO DE CRECIMIENTO DE LA DEMANDA(ANIOS):	7
TAZA ANUAL DE ACTUALIZACION (%):	1.0000
VOLTAJE DEL ALIMENTADOR (KV):	11.0000
VOLTAJE MINIMO PERMITIDO (VOLTIOS):	10450.0000
VOLTAJE MAXIMO PERMITIDO (VOLTIOS):	11550.0000
FACTOR DE CARGA ACTUAL (P.U.):	.2000
FACTOR DE CARGA FUTURO (P.U.):	.4500
NUMERO DE TRAMOS DEL ALIMENTADOR:	13
FACTOR DE POTENCIA EN MINIMA DEMANDA (P.U.):	.7000
FACTOR DE POTENCIA EN MAXIMA DEMANDA (P.U.):	.7000

--ESCUELA POLITECNICA NACIONAL-----UBICACION OPTIMA DE CAPACITORES----PAG.: 2
--FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA----------FECHA: 85/ 5/30

DATOS DEL ALIMENTADOR

TRAMO DE	A	LONGITUD TRAMO KM	REST.COND OHM/KM	REAC.COND OHM/KM	REST.TRAMO OHM	REAC.TRAMO OHM	CARGA ACTUALKW
0	1	1.000	.5300	.3311	.5300	.3311	30.00
1	2	2.300	.5300	.3311	1.2190	.7615	128.00
2	3	.800	.5300	.3311	.4240	.2649	90.00
3	4	.800	.5300	.3311	.4240	.2649	30.00
4	5	3.000	.8800	.3500	2.6400	1.0500	60.00
5	6	1.000	.8800	.3500	.8800	.3500	30.00
6	7	.800	1.3400	.3787	1.0720	.3030	30.00
7	8	.800	1.3400	.3787	1.0720	.3030	15.00
8	9	1.900	1.3400	.3787	2.5460	.7195	30.00
9	10	.900	1.3400	.3787	1.2060	.3408	20.00
10	11	.800	1.3400	.3787	1.0720	.3030	20.00
11	12	2.400	1.3400	.3787	3.2160	.9089	60.00
12	13	1.800	1.3400	.3787	2.4120	.6817	20.00

--ESCUELA POLITECNICA NACIONAL-----UBICACION OPTIMA DE CAPACITORES----PAG.: 3
--FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA----------FECHA: 85/ 5/30

RESULTADOS

FC= .220 FP= .087 VDEM= .226

PERDIDAS ECONOMICAS EN ENERGIA SIN CAPACITORES
EN MILES DE SUCRES : 263.321

AHORRO POR REDUCCION DE PERDIDAS DE ENERGIA EN MILES DE $	AHORRO POR LIBERACION DE CAPACIDAD DE LA S/E EN MILES DE $	COSTO DE BANCOS DE CAPACITORES EN MILES DE $	BENEFICIO NETO EN MILES DE $
65.470	5.993	24.314	47.149

INSTALACION DE BANCOS DE CAPACITORES FIJOS SOBRE EL ALIMENTADOR PRIMARIO

LOCALIZACION NODO	NUMERO DE UNIDADES	CAPACIDAD DEL BANCO EN KVAR	I CAPACITIVA EN AMP	GAN V	SEGMENTO DEL ALIMENTADOR DE	A	IL(A)	ICA(A)
1	0	.0	.0	-.8	0	1	39.15	7.87
2	0	.0	.0	-3.6	1	2	38.57	7.87
3	0	.0	.0	.0	2	3	31.69	7.87
4	0	.0	.0	.0	3	4	26.87	7.87
5	0	.0	.0	-2.3	4	5	15.26	7.87
6	0	.0	.0	-.1	5	6	12.05	7.87
7	0	.0	.0	-.2	6	7	10.44	7.87
8	1	50.0	2.6	.0	7	8	8.84	7.87
9	0	.0	.0	-1.1	8	9	3.03	5.25
10	1	50.0	2.6	-.1	9	10	6.43	5.25
11	0	.0	.0	-.4	10	11	5.35	2.62
12	1	50.0	2.6	-.9	11	12	4.28	2.62
13	0	.0	.0	-.6	12	13	1.07	.00

CALCULO DE LOS PERFILES DE VOLTAJE

VOLTAJE MAXIMO PERMITIDO = 11550.00 KV
VOLTAJE MINIMO PERMITIDO = 10450.00 KV

NODO	VOLTAJE SIN CAPACITORES P.U.	VOLTAJE CON CAPACITORES P.U.	VOLTAJE EN DEMANDA MINIMA P.U.
0	1.000	1.000	1.000
1	.996	.996	1.000
2	.987	.989	.999
3	.985	.987	.999
4	.983	.985	.999
5	.974	.978	.996
6	.972	.976	.998
7	.970	.974	.998
8	.968	.972	.998
9	.964	.969	.999
10	.962	.968	.998
11	.961	.967	.998
12	.958	.964	.998
13	.959	.964	.997

--ESCUELA POLITECNICA NACIONAL-----UBICACION OPTIMA DE CAPACITORES----PAG.: 1
--FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA----------FECHA: 86/ 1/10

DATOS GENERALES

ESCUELA POLITECNICA NACIONAL - QUITO
FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
TESIS DE GRADO - EPN-ECQ
EJEMPLO DEL ALIMENTADOR C S/E EPICLACHIMA E.E.Q.S.A.

NO. MAXIMO DE UNIDADES CAPACITIVAS POR NODO:	8
COSTO FIJO DE CAPACITORES ($X1000):	23.245
CAPACIDAD DE UNA UNIDAD CAPACITIVA 3F(KVAR):	150.00
CARGAS ANUALES SOBRE COSTO CAPACITORES (%):	1.900
COSTO VARIABLE DE CAPACITORES ($X1000/KVAR):	1.331
VIDA UTIL DE LOS CAPACITORES (ANIOS):	25
COSTO ACTUAL DE ENERGIA ($X1000/KWH):	.0933
TAZA DE CRECIMIENTO DE LA DEMANDA (%):	9.0000
COSTO CAPACIDAD DE SUBESTACION ($X1000/KVA):	7.7400
RELACION DEMANDAS MINIMA/MAXIMA(P.U.):	.0492
TAZA DE CRECIMIENTO DE COSTO DE ENERGIA(%):	24.0000
PERIODO DE CRECIMIENTO DE LA DEMANDA(ANIOS):	7
TAZA ANUAL DE ACTUALIZACION (%):	12.0000
VOLTAJE DEL ALIMENTADOR (KV):	22.8000
VOLTAJE MINIMO PERMITIDO (VOLTIOS):	22002.0000
VOLTAJE MAXIMO PERMITIDO (VOLTIOS):	23940.0000
FACTOR DE CARGA ACTUAL (P.U.):	.6600
FACTOR DE CARGA FUTURO (P.U.):	.6615
NUMERO DE TRAMOS DEL ALIMENTADOR:	47
FACTOR DE POTENCIA EN MINIMA DEMANDA (P.U.):	.9200
FACTOR DE POTENCIA EN MAXIMA DEMANDA (P.U.):	.8000

DATOS DEL ALIMENTADOR

TRAMO DE	A	LONGITUD TRAMO KM	RESIST.COND OHM/KM	REAC.COND OHM/KM	RESIST.TRAMO OHM	REAC.TRAMO OHM	CARGA ACTUAL KW
0	2700	.210	.3094	.3719	.0649	.0781	.00
2700	2701	.120	.4094	.3219	.0614	.0483	16.60
2700	2702	.550	.4094	.3219	.2252	.1770	542.00
2702	2703	.400	1.0378	.3566	.4135	.1426	31.50
2702	2704	.125	.4094	.3219	.0512	.0402	.00
2704	2706	.540	1.0338	.3566	.5583	.1926	514.40
2706	2707	.215	1.0338	.3566	.2223	.0767	569.10
2706	2708	.270	1.0338	.3566	.2791	.0963	1068.60
2704	2709	.365	.4094	.3219	.1494	.1175	.00
2709	2710	.070	1.0338	.3566	.0724	.0250	41.50
2710	2711	.150	1.0330	.3566	.1551	.0535	83.00
2710	2712	.050	1.0338	.3566	.0517	.0178	.00

DATOS DEL ALIMENTADOR

TRAMO DE	A	LONGITUD TRAMO KM.	REST.COND OHM/KM	REAC.COND OHM/KM	REST.TRAMO. OHM	REAC.TRAMO OHM	CARGA ACTUAL KW
2712	2713	.145	1.0338	.3566	.1499	.0517	83.00
2712	2714	.355	1.0338	.3566	.3670	.1266	207.40
2709	2715	.220	.4094	.3219	.0901	.0708	.00
2715	2716	.215	.5988	.3566	.1287	.0767	113.90
2715	2717	.115	.4094	.3219	.0471	.0370	.00
2717	2718	.280	.6499	.3392	.1820	.0950	41.50
2717	2719	.390	.4094	.3219	.1597	.1255	110.60
2719	2721	.980	.4094	.3219	.4012	.3155	186.90
2721	2722	.200	1.0338	.3566	.2068	.0713	227.90
2719	2724	.150	.3241	.3123	.0486	.0468	.00
2724	2725	.100	1.0338	.3566	.1034	.0357	130.00
2724	2726	.760	.3241	.3123	.2463	.2373	912.60
2726	2728	.055	.3241	.3123	.0178	.0172	.00
2728	2729	.370	.5154	.3304	.1907	.1222	76.30
2728	2730	.700	.4094	.3219	.2866	.2253	.00
2730	2732	.060	.4094	.3219	.0246	.0193	.00
2732	2734	.690	.6499	.3392	.4484	.2340	579.10
2732	2735	.270	.4094	.3219	.1105	.0869	.00
2735	2736	.290	1.0338	.3566	.2998	.1034	52.00
2735	2737	.540	.4094	.3219	.2211	.1738	.00
2737	2738	.100	.6499	.3392	.0650	.0339	99.00
2737	2739	1.150	.4094	.3219	.4708	.3702	.00
2739	2740	.200	.6499	.3392	.1300	.0678	.00
2740	2741	.850	1.4849	.3957	1.2622	.3363	11.10
2740	2742	.640	.6499	.3392	.4159	.2171	.00
2742	2743	.200	1.4849	.3957	.2970	.0791	8.30
2742	2744	.310	.6499	.3392	.2015	.1052	13.80
2744	2745	.625	.6499	.3392	.4062	.2120	55.30
2744	2746	.800	.6499	.3392	.5199	.2714	.00
2746	2747	.980	.6499	.3392	.6369	.3324	62.20
2747	2748	.330	1.0338	.3566	.3412	.1177	41.50
2739	2750	.700	1.4849	.3957	1.0394	.2770	.00
2750	2751	.150	1.6427	.3740	.2464	.0561	.00
2751	2753	.190	1.6427	.3740	.3121	.0711	.00
2753	2754	.380	1.6427	.3740	.6242	.1421	8.30

--ESCUELA POLITECNICA NACIONAL-----UBICACION OPTIMA DE CAPACITORES----PAG.: 4
--FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA----------FECHA: 86/ 1/10

RESULTADOS

FC= .724 FP= .554 VDEM= .148

PERDIDAS ECONOMICAS EN ENERGIA SIN CAPACITORES
EN MILES DE SUCRES : 45207.240

AHORRO POR REDUCCION DE PERDIDAS DE ENERGIA EN MILES DE $ | AHORRO POR LIBERACION DE CAPACIDAD DE LA S/E EN MILES DE $ | COSTO DE BANCOS DE CAPACITORES EN MILES DE $ | BENEFICIO NETO EN MILES DE $

3820.590 3331.316 2042.714 5109.192

INSTALACION DE BANCOS DE CAPACITORES FIJOS SOBRE EL ALIMENTADOR PRIMARIO | I CAPACITIVA EN AMP | GAN V | SEGMENTO DEL ALIMENTADOR

LOCALIZACION NODO	NUMERO DE UNIDADES	CAPACIDAD DEL BANCO EN KVAR			DE	A	IL(A)	ICA(A)
2700	0	.0	.0	-.2	0	2700	80.74	26.59
2701	0	.0	.0	.0	2700	2701	.23	.00
2702	1	150.0	3.8	-.4	2700	2702	80.51	26.59
2703	0	.0	.0	.0	2702	2703	.43	.00
2704	0	.0	.0	-.1	2702	2704	72.67	22.79
2706	0	.0	.0	-2.8	2704	2706	29.69	7.60
2707	1	150.0	3.8	- 2	2706	2707	9.05	3.80
2708	1	150.0	3.8	-.7	2706	2708	14.61	3.80
2709	0	.0	.0	.0	2704	2709	42.99	15.19
2710	1	150.0	3.8	.0	2709	2710	5.67	3.80
2711	0	.0	.0	.0	2710	2711	1.13	.00
2712	0	.0	.0	-.1	2710	2712	3.97	.00
2713	0	.0	.0	.0	2712	2713	1.13	.00
2714	0	.0	.0	-.3	2712	2714	2.83	.00
2715	0	.0	.0	-.1	2709	2715	37.32	11.40
2716	0	.0	.0	-.1	2715	2716	1.56	.00
2717	0	.0	.0	-.1	2715	2717	35.76	11.40
2718	0	.0	.0	.0	2717	2718	.57	.00
2719	1	150.0	3.8	-.1	2717	2719	35.19	11.40
2721	0	.0	.0	-.6	2719	2721	5.67	.00
2722	0	.0	.0	-.2	2721	2722	3.11	.00
2724	0	.0	.0	.0	2719	2724	28.01	7.60
2725	0	.0	.0	.0	2724	2725	1.78	.00

2726	1	150.0	3.8	-.1	2724	2726	26.23	7.60
2728	0	.0	.0	.0	2726	2728	13.76	3.80
2729	0	.0	.0	-.1	2728	2729	1.04	.00
2730	0	.0	.0	-.2	2728	2730	12.72	3.80
2732	0	.0	.0	.0	2730	2732	12.72	3.80
2734	1	150.0	3.8	-.1	2732	2734	7.91	3.80
2735	0	.0	.0	-.1	2732	2735	4.80	.00
2736	0	.0	.0	-.1	2735	2736	.71	.00
2737	0	.0	.0	-.3	2735	2737	4.09	.00
2738	0	.0	.0	.0	2737	2738	1.35	.00
2739	0	.0	.0	-.4	2737	2739	2.74	.00
2740	0	.0	.0	-.1	2739	2740	2.63	.00
2741	0	.0	.0	.0	2740	2741	.15	.00
2742	0	.0	.0	-.3	2740	2742	2.48	.00
2743	0	.0	.0	.0	2742	2743	.11	.00
2744	0	.0	.0	-.1	2742	2744	2.36	.00
2745	0	.0	.0	-.1	2744	2745	.76	.00
2746	0	.0	.0	-.2	2744	2746	1.42	.00
2747	0	.0	.0	-.2	2746	2747	1.42	.00
2748	0	.0	.0	-.1	2747	2748	.57	.00
2750	0	.0	.0	-.0	2739	2750	.11	.00
2751	0	.0	.0	.0	2750	2751	.11	.00
2753	0	.0	.0	.0	2751	2753	.11	.00
2754	0	.0	.0	.0	2753	2754	.11	.00

CALCULO DE LOS PERFILES DE VOLTAJE

VOLTAJE MAXIMO PERMITIDO = 27940.00 KV
VOLTAJE MINIMO PERMITIDO = 22002.00 KV

NODO	VOLTAJE SIN CAPACITORES P.U.	VOLTAJE CON. CAPACITORES P.U.	VOLTAJE EN DEMANDA MINIMA P.U.
0	1.000	1.000	1.000
2700	.999	.999	1.000
2701	.999	.999	1.000
2702	.995	.995	1.000
2703	.995	.995	1.000
2704	.994	.995	1.000
2706	.991	.992	1.000
2707	.991	.992	1.000
2708	.990	.991	1.000
2709	.989	.990	1.000
2710	.989	.990	1.000
2711	.989	.990	1.000
2712	.989	.990	1.000
2713	.989	.990	1.000
2714	.989	.990	1.000
2715	.989	.990	1.000
2716	.988	.989	1.000
2717	.988	.989	1.000
2718	.988	.989	1.000
2719	.987	.988	1.000
2721	.986	.987	1.000
2722	.986	.987	1.000
2724	.986	.987	1.000
2725	.986	.987	1.000
2726	.984	.986	1.000

2728	.984	.986	1.000
2729	.984	.986	1.000
2730	.984	.985	1.000
2732	.983	.985	1.000
2734	.983	.984	1.000
2735	.983	.984	.999
2736	.983	.984	.999
2737	.983	.984	.999
2738	.983	.984	.999
2739	.982	.984	.999
2740	.982	.984	.999
2741	.982	.984	.999
2742	.982	.983	.999
2743	.982	.983	.999
2744	.982	.983	.999
2745	.982	.983	.999
2746	.982	.983	.999
2747	.982	.983	.999
2748	.981	.983	.999
2750	.981	.983	.999
2751	.981	.983	.999
2753	.981	.983	.999
2754	.981	.983	.999

ESTUDIO DE CAPACITORES CONECTABLES

DATOS:

RELACION INDUCTIVA PROMEDIO EN EL PERIODO DE CONEXION Y LA MAXIMA INDUCTIVA EN EL AÑO	:	.4922
PERIODO DE CONEXION DE LOS CAPACITORES CONECTABLES(HORAS):		24.0000
COSTO VARIABLE DE CAPACITORES CONECTABLES ($X1000/KVAR):		3.3300
COSTO FIJO INSTALACION CAPACITORES CONECTABLES ($X1000) :		23.3450
CARGAS ANUALES SOBRE COSTO CAPACITORES CONECTABLES (%):		.6000
CAPACIDAD MINIMA DE UN BANCO CAPACITORES CONECT.(KVAR) :		150.0000
NUMERO MAXIMO DE UNIDADES TRIFASICAS CONECTABLES POR NODO:		8

AHORROS Y COSTOS POR INSTALACION DE CAPACITORES CONECTABLES

POR REDUCCION PERDIDAS DE ENERGIA MILES$	POR LIBERACION DE CAPACIDAD MILES $	COSTO CAPACITORES MILES$	BENEFICIO NETO EN MILES DE $
1967.5660	5240.9730	3360.6170	516.6062

RESULTADOS GENERALES

LOCALIZACION OPTIMA CAPACITORES FIJOS Y CONECTABLES EN EL A/P DE DISTRIBUCION

NODO	CAPACITORES FIJOS	CAPACIDAD EN C.FIJOS KVAR	CAPACITORES CONECTABLES	CAPACIDAD EN C.CONECTABLES KVAR
2700	0	.0	0	.0
2701	0	.0	0	.0
2702	1	150.0	0	.0
2703	0	.0	0	.0
2704	0	.0	0	.0
2706	0	.0	0	.0
2707	1	150.0	0	.0
2708	1	150.0	1	150.0
2709	0	.0	0	.0
2710	1	150.0	0	.0
2711	0	.0	0	.0
2712	0	.0	0	.0
2713	0	.0	0	.0
2714	0	.0	0	.0
2715	0	.0	0	.0
2716	0	.0	0	.0
2717	0	.0	0	.0
2718	0	.0	0	.0
2719	1	150.0	0	.0
2721	0	.0	0	.0
2722	0	.0	1	150.0
2724	0	.0	0	.0
2725	0	.0	0	.0
2726	1	150.0	0	.0
2728	0	.0	0	.0
2729	0	.0	0	.0
2730	0	.0	0	.0
2732	0	.0	0	.0
2734	1	150.0	0	.0
2735	0	.0	0	.0
2736	0	.0	0	.0
2737	0	.0	1	150.0
2738	0	.0	0	.0
2739	0	.0	0	.0
2740	0	.0	0	.0
2741	0	.0	0	.0
2742	0	.0	0	.0
2743	0	.0	0	.0
2744	0	.0	0	.0
2745	0	.0	0	.0
2746	0	.0	0	.0
2747	0	.0	0	.0
2748	0	.0	1	150.0
2750	0	.0	0	.0
2751	0	.0	0	.0
2753	0	.0	1	150.0
2754	0	.0	1	150.0

CALCULO DE LOS PERFILES DE VOLTAJE

NODO	VOLTAJE SIN CAPACITORES P . U .	VOLTAJE CON CAPACITORES FIJOS P . U .	VOLTAJE CON CAPACITORES FIJOS Y CONECTABLES P . U .
0	1.000	1.000	1.000
2700	.999	.999	.999
2701	.999	.999	.999
2702	.995	.995	.996
2703	.995	.995	.996
2704	.994	.995	.995
2706	.991	.992	.993
2707	.991	.992	.992
2708	.990	.991	.992
2709	.989	.990	.991
2710	.989	.990	.991
2711	.989	.990	.991
2712	.989	.990	.991
2713	.989	.990	.991
2714	.989	.990	.990
2715	.988	.989	.990
2716	.988	.989	.990
2717	.988	.989	.990
2718	.988	.989	.990
2719	.987	.988	.989
2721	.986	.987	.988
2722	.986	.987	.988
2724	.986	.987	.988
2725	.986	.987	.988
2726	.984	.986	.987
2728	.984	.986	.987
2729	.984	.986	.987
2730	.984	.985	.987
2732	.983	.985	.987
2734	.983	.984	.986
2735	.983	.984	.986
2736	.983	.984	.986
2737	.983	.984	.986
2738	.983	.984	.986
2739	.982	.984	.986
2740	.982	.984	.986
2741	.982	.984	.986
2742	.982	.983	.986
2743	.982	.983	.986
2744	.982	.983	.985
2745	.982	.983	.986
2746	.982	.983	.986
2747	.982	.983	.986
2748	.981	.983	.986
2750	.981	.983	.986
2751	.981	.983	.986
2753	.981	.983	.986
2754	.981	.983	.986

FIN DEL ESTUDIO

LISTADO DEL PROGRAMA DIGITAL

```
C
C
C    ESCUELA POLITECNICA NACIONAL     FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA
C
C                        DEPARTAMENTO DE POTENCIA
C
C    TESIS DE GRADO ---------VICENTE CHANGORO F. ---------- ENERO 1986
C
C
C    TEMA :
C         MINIMIZACION DE PERDIDAS DE ENERGIA MEDIANTE LA INSTALACION
C         DE CAPACITORES PARALELO EN ALIMENTADORES PRIMARIOS DE
C         DISTRIBUCION.                METODO DE VARIACIONES LOCALES
C
C
C    OBJETIVO : Determinar la optima instalacion de bancos de capaci-
C               tores en alimentadores primarios de distribucion uti-
C               el metodo de variaciones locales.
C
C
C    LISTA DE VARIABLES
C    ------------------
C
C    IL   CORRIENTE INDUCTIVA EN UN SEGMENTO DEL ALIMENTADOR
C    SET  SENO DEL ANGULO DEL FACTOR DE POTENCIA EN DEMANDA MINIMA
C    VDF  VECTOR QUE CONSIDERA EL CRECIMIENTO DE LACARGA Y DEL FAC
C         DE CARGA
C    VDC  VECTOR QUE CONSIDERA EL INCREMENTO EN EL COSTO DE ENERGIA
C    VDR  VECTOR QUE CONSIDERA LAS CARGAS ANUALES SOBRE EL COSTO DE
C         CAPACITORES
C    NCH  NUMERO MAXIMO DE CAPACITORES POR NODO
C    NSG  INDICA EL NUMERO DE CAPACITORES FIJOS EN EL NODO
C    N    NUMERODE SEGMENTOS DEL ALIMENTADOR
C    RS   RESISTENCIA DEL SEGMENTO I
C    XS   REACTANCIA DEL SEMMENTO I
C    ICN  CORRIENTE CAPACITIVA EN EL NODO I
C    ICA  CORRIENTE CAPACITIVA ACUMULADA EN EL SEGMENTO I
C    NP   NODO DE ENVIO
C    NQ   NODO DE RECEPCION
C    VOL  VOLTAJE EN EL NODO ANTES DE LA INSTALACION DE UN BANCO
C    VOLDOS VOLTAJE EN EL NODO DESPUES DE LA INSTALACION DE UN BANCO
C    CILAJ AJUSTE DE CORRIENTE INDUCTIVA LUEGO DE INSTALAR CAPACITORES
C         FIJOS
C    NCON  INDICA EL NUMERO DE CAPACITORES CONECTABLES EN EL NODO
C    ICON  CORRIENTE CAPACITIVA DE LOS CAPACITORES CONECTABLES EN EL
C         EL NODO I
C    ICACON CORRIENTE CAPACITIVA ACUMULADA EN UN SEGMENTO
C
C
C
```

```
      DIMENSION RKM(50),XKM(50),RS(50),XS(50),NSG(50),GAN(50)
      DIMENSION VDF(27),VDC(27),VHR(27),CKVAR(50),CCONEC(50)
      DIMENSION ROL(27),VTD(27),VOL(50),VOLDOS(50),ITRA(50),CTA(50)
      DIMENSION IMP(50),NQ(50),NP1(50),NQI(50),VOMAX(5)),FPE(27)
      DIMENSION TVAR(27),VOL3(50),DAP(50),VCCD(24),PKVA(50)
      CHARACTER*80 TIT(4)
      REAL KM(50),KW(50),IL(50),ICA(50),ICN(50),ICON(50)
      REAL KRU,KV,KVI,KVS,LFI,LFF,ICACON(50)
      CHARACTER*10 FNAME
      DATA FNAME/' '/
        READ(0,55)JR
      OPEN(JR,FILE='DATOS.DAT')
      DO 10 I=5,7
      OPEN(I,FILE=' ')
   10 CONTINUE
      WRITE(*,20)
   20 FORMAT(1X,'INGRESE EL NUMERO de la unidad de salida elegida: ')
      READ(*,'(BN,I2)')JW
      OPEN(JW,FILE=FNAME)
   55   FORMAT(I2)
C     LLAMADA A SUBRUTINA QUE LEE LOS DATOS DEL PROGRAMA
      CALL INPUT(TIT,NCM,KRU,E,D,H,NVA,CK,CPO,TCE,R,G,M,FRD,KV,KVI,
     1           KVS,FP,LFI,LFF,N,NP,NQ,KM,RKM,XKM,KW,JR,IA,IM,ID.ITRA,
     2           FACTOR,TCON,ECON,DCON,HCON,CRU,NNCON,FPMAX,JW,ISTOP,
     3     INERR,NP1,IFYC,INTRA,ITICE,TVAR,DAP,CTA,COSUB,LSAL,FCF,VCCD,
     4     IAA,CACF)
      IF(ISTOP.GE.1)GO TO 777
      IF(INERR.GE.1)GO TO 777
C     LLAMADA A SUBRUTINA QUE CALCULA LA CORRIENTE INDUCTIVA EN CADA
C     SEGMENTO DEL ALIMENTADOR
      CALL IINDU(FPMAX,SCMAX,FP,SET,N,KW,KV,IL,RS,XS,RKM,XKM,KM,PM,NP1,
     1           PKVA)
C     LLAMADA A SUBRUTINA QUE IMPRIME LOS DATOS E INFORMACION
      CALL OUTPU(TIT,NCM,KRU,E,D,H,NVA,CK,CPO,TCE,R,G,M,FRD,KV,KVI,
     2           KVS,FP,LFI,LFF,N,NP,NQ,KM,RKM,XKM,KK,JW,IA,IM,ID,
     3           NG,NLH,NL,IND,RS,XS,ITRA,FPMAX)
C     LLAMADA A SUBRUTINA QUE CALCULA LOS INCREMENTOS DE CARGA,COSTO DE
C     ENERGIA,FACTOR DE CARGA,Y VALOR PRESENTE DE LOS BENEFICIOS Y COS-
C     TOS ANUALES
      CALL VECTO(LFF,LFI,NVA,M,VDF,VDC,G,CK,TCE,R,VHR,H,C1,ITICE,TVAR,
     1          FPE,FCF,VCCD)
      IF(INTRA.EQ.1)GO TO 111
      IF(LSAL.EQ.1)GO TO 111
C     DESARROLLO DEL METODO DE VARIACIONES LOCALES
C
      CALL MLVFI(N,NSG,NCM,KRU,KV,NVA,IL,VDF,VDC,RS,SET,CPO,VHR,E,D,C1,
     1           PM,FRD,XS,SCMAX,NP1,DAP,ICN,ICA,PKVA,IAA,CACF,CLCA)
      GO TO 101
  111 DO 15 MAL=1,N
   15 NSG(MAL)=ITRA(MAL)
C     LLAMADA A SUBRUTINA QUE CALCULA LA CORRIENTE CAPACITIVA EN CADA
C     SEGMENTO DEL ALIMENTADOR
  101 CALL ICAPA(N,ICN,NSG,KRU,KV,ICA,NP1)
C     LLAMADA A SUBRUTINA QUE CALCULA LA FUNCION OBJETIVO DE COSTOS Y
C     BENEFICIOS ALCANZADOS POR INSTALACION DE CAPACITORES FIJOS
      WRITE(7,35)
   35 FORMAT(3X,'VA A CALCULAR OBJEC')
       PAUSE
```

```
      CALL OBJEC(N,NVA,IL,VDF,ICA,VDC,EOBJ,RS,SEMAX,KV,SOBJ,CPO,VHR,
     1           CCAP,ICN,E,D,OBJE,C1,PM,DAP,NSG,KRU,FKVA,IAA,CACF,CLCA)
      WRITE(7,34)
   34 FORMAT(3X,'YA CALCULO OBJEC')
      PAUSE
C     LLAMADA A SUBRUTINA QUE CALCULA EL INCREMENTO DE VOLTAJE EN LAS
C     HORAS DE MINIMA DEMANDA
      WRITE(7,87)
   87 FORMAT(3X,'VA A CALCULAR GANANCIA')
      PAUSE
      CALL GANAN(N,IL,FRD,SET,ICA,XS,RS,GAN,SEMAX)
      WRITE(7,88)
   88 FORMAT(3X,'YA CALCULO GANANCIA')
      PAUSE
C     LLAMADA A SUBRUTINA QUE CALCULA EL PERFIL DE VOLTAJE DEL ALIMEN-
C     TADOR ANTES DE LA INSTALACION DE LOS CAPACITORES FIJOS
      CALL PERF1(FPMAX,SEMAX,N,IL,KV,VOL,RS,XS)
C     LLAMADA A SUBRUTINA QUE CALCULA EL PERFIL DE VOLTAJE EN EL ALIMEN-
C     TADOR LUEGO DE INSTALAR CAPACITORES FIJOS
      CALL PERF2(VOLDOS,KV,N,IL,ICA,RS,XS,SEMAX,FPMAX,GAN,VOMAX,FP,SET,
     1           FRD)
C     LLAMADA A SUBRUTINA QUE CALCULA LAS PERDIDAS ECONOMICAS EN ENERGIA
C     ANTES DE INSTALAR CAPACITORES
      CALL PSINCA(NVA,N,IL,VDF,SEMAX,VDC,RS,XS,PSCA,FPE,M,G)
C     LLAMADA A SUBRUTINA QUE IMPRIME LOS RESULTADOS DE LA OPTIMA LOCALI
C     ZACION DE CAPACITORES FIJOS
      WRITE(7,96)
   96 FORMAT(3X,'VA A REALIZAR LA SALIDA')
      PAUSE
      CALL SALID(JW,EOBJ,SOBJ,CCAP,OBJE,N,NP,NQ,IL,NSG,CKVAR,ICN,ICA,
     1GAN,VOL,VOLDOS,PSCA,VOMAX,KVI,KVS,KRU,NVA)
C
C     SE PREGUNTA SI SE REQUIERE EL ESTUDIO DE  LA OPTIMA INSTALACION
C     DE CAPACITORES CONECTABLES EN EL ALIMENTADOR NIVELIZADO
C
      IF(IFYC.EQ.1)GO TO 777
C
C     LLAMADA A SUBRUTINA QUE CALCULA LA OPTIMA LOCALIZACION DE CAPACI-
C     TORES CONECTABLES.
      CALL CONEC(JW,NSG,CKVAR,IL,ICA,N,M,G,NVA,R,RS,SEMAX,KV,CPO,FACTOR
     1,TCON,ECON,DCON,HCON,CRU,MMCON,MQ,VDC,PM,SOBJ,E1CON,SLCON,CCCON,
     2OBCO,NCON,CCONEC,NP1,XS,FPMAX,VOL,VOLDOS,NP,DAP,FKVA,IAA,CACF,
     3CLCA)
      CLOSE(JR)
      CLOSE(JW)
  777 STOP
      END
C
C     SUBRUTINA QUE CALCULA LA OPTIMA LOCALIZACION Y TAMANIO DE LOS
C     CAPACITORES FIJOS
C
C     ------------------------------------------------------------------
      SUBROUTINE NLVFI(N,NSG,NCM,KRU,KV,NVA,IL,VDF,VDC,RS,SET,CPO,VHR,E,
     1D,C1,PM,FRD,XS,SEMAX,NP1,DAP,ICN,ICA,FKVA,IAA,CACF,CLCA)
C     ------------------------------------------------------------------
      DIMENSION NSG(50),VDF(27),VDC(27),RS(50),VHR(27),XS(50),GAN(50)
      DIMENSION NP1(50),DAP(50),FKVA(50)
      REAL KRU,KV,IL(50),ICA(50),ICN(50)
      DO 78 I=1,N
   78 NSG(I)=0
```

```
      AMAX=0.
  511 DO 30 M=1,N
      V1=AMAX
      I=N-M+1
      K=NSG(I)+1
      IF(K.GT.NCM)GO TO 32
      NSG(I)=K
      CALL ICAPA(N,ICN,NSG,KRU,KV,ICA,NP1)
      CALL OBJEC(N,NVA,IL,VDF,ICA,VDC,EOBJ,RS,SEMAX,KV,SOBJ,CPO,VMR,
     1          CCAP,ICN,E,D,OBJE,C1,FM,DAP,NSG,KRU,FKVA,IAA,CACF,CLCA)
      IF(OBJE.LE.AMAX)GO TO 31
      CALL GANAN(N,IL,FRD,SET,ICA,XS,RS,GAN,SEMAX)
      DO 40 J=1,N
      IF(GAN(J).GE.0.00)GO TO 31
   40 CONTINUE
      AMAX=OBJE
      GO TO 30
   31 NSG(I)=NSG(I)-1
   32 K=K-2
      IF(K.LT.0)GO TO 30
      NSG(I)=K
      CALL ICAPA(N,ICN,NSG,KRU,KV,ICA,NP1)
      CALL OBJEC(N,NVA,IL,VDF,ICA,VDC,EOBJ,RS,SEMAX,KV,SOBJ,CPO,VMR,
     1          CCAP,ICN,E,D,OBJE,C1,FM,DAP,NSG,KRU,FKVA,IAA,CACF,CLCA)
      IF(OBJE.LE.AMAX)GO TO 33
      CALL GANAN(N,IL,FRD,SET,ICA,XS,RS,GAN,SEMAX)
      DO 80 J=1,N
      IF(GAN(J).GE.0.00)GO TO 33
   80 CONTINUE
      AMAX=OBJE
      GO TO 30
   33 NSG(I)=NSG(I)+1
   30 CONTINUE
      V2=AMAX
      IF(V2.GT.V1)GO TO 511
      RETURN
      END
C
C
```

```
C
C     SUBRUTINA QUE CALCULA LA CORRIENTE INDUCTIVA
C
C     ------------------------------------------------------------
      SUBROUTINE IINDU(FPMAX,SEMAX,FP,SET,N,KW,KV,IL,RS,XS,RKM,XKM,KM,
     1PM,NP1,PKVA)
C     ------------------------------------------------------------
      DIMENSION RKM(50),XKM(50),RS(50),XS(50),NP1(50),PKV(50),PKVA(50)
      REAL IL(50),KW(50),KM(50),KV,ILND(50)
      SET=SQRT(1.-FP**2)
      SEMAX=SQRT(1.-FPMAX**2)
      DO 10 I=1,N
      RS(I)=KM(I)*RKM(I)
      XS(I)=KM(I)*XKM(I)
   10 ILND(I)=KW(I)*SEMAX/(SQRT(3.)*KV*FPMAX)
      CALL SUMAX(NP1,ILND,N,IL)
      PM=IL(1)/SEMAX*SQRT(3.)*KV
      DO 37 I=1,N
   37 PKV(I)=KW(I)/FPMAX
      CALL SUMAX(NP1,PKV,N,PKVA)
      RETURN
      END
C
C
C     SUBRUTINA PARA CALCULAR LA FUNCION OBJETIVO
C
C     ------------------------------------------------------------
      SUBROUTINE OBJCC(N,NVA,IL,VDF,ICA,VDC,EOBJ,RS,SEMAX,KV,SOBJ,CFO,
     1      VNR,CCAP,ICN,E,D,OBJE,C1,PM,DAP,NSG,KRU,PKVA,IAA,CACF,CLCA)
C     ------------------------------------------------------------
      DIMENSION VDF(27),VDC(27),VNR(27),RS(50),DAP(50),NSG(50),PKVA(50)
      REAL ICA(50),IL(50),ICN(50),KV,KRU
      EOBJ=0.
      CCAP=0.
      SOBJ=0.
      OBJE=0.
      DO 10 I=1,N
      C=0.
      A=1.
      IF(ICN(I).LE.0.)A=0.
      DO 11 K=1,NVA
   11 C=(IL(I)*VDF(K)*ICA(I)-ICA(I)**2)*VDC(K)+C
      CCAP=CCAP+E*(1.+C1)*ICN(I)*KV*SQRT(3.)+A*(D+DAP(I))*(1.+C1)
   10 EOBJ=RS(I)*C+EOBJ
      EOBJ=26.28*EOBJ
      SOBJ=CFO*PM*(1.-SQRT(1.+(ICA(I)*SEMAX/IL(I))**2-2.*SEMAX**2*ICA(I)
     1     /IL(I)))+SOBJ
      IF(IAA.EQ.0)GO TO 3
      CA=0.
      DO 72 I=1,N
      CA=CA+PKVA(I)*(1.-SQRT(1.+(SQRT(3.)*KV*ICA(I)/PKVA(I))**2-2.*SQRT(
     13.)*KV*ICA(I)*SEMAX/PKVA(I)))
   72 CONTINUE
      CLCA=CA*CACF
      GO TO 4
    3 CLCA=0.
    4 OBJE=EOBJ+SOBJ+OBJE+CLCA-CCAP


      RETURN
      END
```

```
C
C     ------------------------------------------
      SUBROUTINE GANAN(N,IL,FRO,SET,ICA,XS,RS,GAN,SEMAX)
C     ------------------------------------------
      DIMENSION RS(50),XS(50),GAN(50)
      REAL ICA(50),IL(50)
      C=0.
      DO 10 I=1,N
      CID=IL(I)*FRO/SET
      C2=SQRT(CID**2+ICA(I)**2-2.*ICA(I)*CID*SET)
      C3=(ICA(I)-CID*SET)*XS(I)-C2*RS(I)*SQRT(1.-((ICA(I)-CID*SET)/C2)**
     12)
      A=(ICA(I)-CID*SET)/C2
      ALFA=ASIN(A)
      PRO=SQRT(XS(I)**2+RS(I)**2)
      B=XS(I)/PRO
      PHI=ASIN(B)
      C=C3/(C2*PRO)
      EME=ASIN(C)
      FIE=ALFA+PHI
      TAL=COS(FIE)
      SENO=SQRT(1.-TAL**2)
      VSO=C2**2*PRO*SENO/C3
      VAC=COS(EME)
      VRE=VSO*VAC+C3
      DELTAV=VRE-VSO
      GAN(I)=DELTAV
   10 CONTINUE
      RETURN
      END
C
C
C     SUBRUTINA QUE ALMACENA EN LOS VECTORES:
C               VDF:INCREMENTO DEL FACTOR DE CARGA Y DE LA CARGA
C               VDC:INCREMENTO EN EL COSTO DE ENERGIA
C               VMR:CARGAS ANUALES SOBRE LOS CAPACITORES
C
C     ------------------------------------------------------------------
      SUBROUTINE VECTO(LFF,LFI,NVA,M,VDF,VDC,G,CK,TCE,R,VMR,H,CI,ITICE,
     1                 TVAR,FPE,FCF,VCCD)
C     ------------------------------------------------------------------
      DIMENSION VDF(27),VDC(27),VMR(27),TVAR(27),FPE(27),VCCD(24)
      REAL LFF,LFI
      CI=0.
      VMAX=VCCD(1)
      DO 100 I=2,24
      VM=VCCD(I)
      IF(VM.GE.VMAX)GO TO 5
      GO TO 100
    5 VMAX=VM
  100 CONTINUE
      SUM=0.
      DO 30 I=1,24
      SUM=SUM+VCCD(I)
   30 CONTINUE
      FC=SUM/(VMAX*24.)
      SUR=0.
      DO 40 I=1,21
   40 SUR=SUR+VCCD(I)**2
      FP=SUR/(VMAX**2*21.)
      VDEM=(FP-FC**2)/(FC-FC**2)
      WRITE(6,55)FC,FP,VDEM
   55 FORMAT(3X,'FC= ',F7.3,5X,'FP= ',F7.3,5X,'VDEM= ',F7.3,//)
      C=(LFF-LFI)/NVA
```

```
      DO 10 I=1,NVA
      N=I
      IF(I.GT.M) N=M
      VCF(I)=2.*(I*C+LFI)*(1.+G/100.)**N
      FPE(I)=VDEM*(I*C+FC)+(1.-VDEM)*(I*C+FC)**2
      IF(ITICE.EQ.1)GO TO 111
      VDC(I)=CK*((1.+TCE/100.)**I/(1.+R/100.)**I)
      GO TO 112
  111 VDC(I)=CK*TVAR(I)/(1.+R/100.)**I
  112 VHR(I)=H/100./(1.+R/100.)**I
   10 C1=C1+VHR(I)
      RETURN
      END
C
C     SUBRUTINA QUE CALCULA EL PERFIL DE VOLTAJE ANTES DE LA
C     INSTALACION DE LOS CAPACITORES FIJOS
C
C     ------------------------------------------
      SUBROUTINE PERF1(FPMAX,SEMAX,N,IL,KV,VOL,RS,XS)
C     ------------------------------------------
      DIMENSION VOL(50),RS(50),XS(50)
      REAL KV,IL(50)
      NAL=N+1
      DO 12 I=1,NAL
   12 VOL(I)=0.
      VOL(1)=KV*1000.
      DO 44 I=1,N
      J=I+1
   44 VOL(J)=(SQRT((VOL(I)/SQRT(3.))**2-(XS(I)*FPMAX-RS(I)*SEMAX)**2*
     1(IL(I)/SEMAX)**2)-IL(I)/SEMAX*(RS(I)*FPMAX+XS(I)*SEMAX))*SQRT(3.)
      KOL=N+1
      DO 45 L=1,KOL
   45 VOL(L)=VOL(L)/(KV*1000.)
      RETURN
      END
C
C     SUBROUTINE QUE CALCULA EL PERFIL DE VOLTAJE LUEGO DE LA
C     INSTALACION DE LOS CAPACITORES FIJOS
C
C     ------------------------------------------------------------
      SUBROUTINE PERF2(VOLDOS,KV,N,IL,ICA,RS,XS,SEMAX,FPMAX,GAN,VOMAX,
     1                 FP,SET,FRD)
C     ------------------------------------------------------------
      DIMENSION VOLDOS(50),RS(50),XS(50),GAN(50),VOMAX(50)
      REAL KV,IL(50),ICA(50)
      VOLDOS(1)=KV*1000.
      VOMAX(1)=KV*1000.
      M=N+1
C     CALCULO DEL PERFIL DE VOLTAJE EN CARGA MAXIMA CON CAPACITORES
      DO 50 I=2,M
      K=I-1
   50 VOLDOS(I)=(SQRT((VOLDOS(K)/SQRT(3.))**2-(XS(K)*IL(K)/SEMAX*FPMAX
     1-RS(K)*(IL(K)-ICA(K)))**2)-RS(K)*IL(K)/SEMAX*FPMAX-XS(K)*(IL(K)-IC
     2A(K)))*SQRT(3.)
      DO 51 L=1,M
   51 VOLDOS(L)=VOLDOS(L)/(KV*1000.)
C     CALCULO DEL PERFIL DE VOLTAJE EN CARGA LIVIANA CON CAPACITORES
      DO 40 I=2,M
      K=I-1
   40 VOMAX(I)=(SQRT((VOMAX(K)/SQRT(3.))**2-(XS(K)*IL(K)*FRD/SET*FP-RS(K
     1)*(IL(K)*FRD-ICA(K)))**2)-RS(K)*IL(K)*FRD/SET*FP-XS(K)*(IL(K)*FRD-
     2ICA(K)))*SQRT(3.)
      DO 41 L=1,M
   41 VOMAX(L)=VOMAX(L)/(KV*1000.)
```

```
      RETURN
      END

C
C
C
C     SUBRUTINA PARA CALCULAR LA CORRIENTE CAPACITIVA EN CADA SEGMENTO
C     DEL ALIMENTADOR
C
C     ------------------------------------------
      SUBROUTINE ICAPA(N,ICN,NSG,KRU,KV,ICA,NP1)
C     ------------------------------------------
      DIMENSION NSG(50),NP1(50)
      REAL ICN(50),ICA(50),KRU,KV
      DO 33 I=1,N
      ICN(I)=0.
   33 ICA(I)=0.
C     CALCULAD DE LAS CORRIENTES CAPACITIVAS EN CADA NODO
      DO 10 I=1,N
   10 ICN(I)=NSG(I)*KRU/(SQRT(3.)*KV)
      CALL SUMAX(NP1,ICN,N,ICA)
      RETURN
      END
C
C     SUBRUTINA QUE LEE LOS DATOS PARA EL PROGRAMA
C
C     ------------------------------------------------------------------
      SUBROUTINE INPUT(TIT,NCM,KRU,E,D,H,NVA,CK,CPO,TCE,R,G,M,FRD,KV,KVI
     1      ,KVS,FP,LFI,LFF,N,NP,NQ,KM,RKM,XKM,KW,JR,IA,IM,ID,ITRA,
     2       FACTOR,TCON,ECON,DCON,HCON,CRU,MCON,FPMAX,JW,ISTOP,INERR,
     3   NP1,IFYC,INTRA,ITICE,TVAR,DAP,CTA,COSUB,LSAL,FCF,VCCD,IAA,CACF)
C     ------------------------------------------------------------------
      DIMENSION RKM(50),XKM(50),ITRA(50),NP(50),NQ(50),NP1(50),VCCD(24)
      DIMENSION NQI(50),ERAM(50),SUM(50),IAUX(50),TVAR(27),DAP(50)
      DIMENSION CTA(50)
      CHARACTER*80 TIT(4)
      REAL KM(50),KW(50)
      REAL KRU,KV,KVI,KVS,LFI,LFF
      READ(JR,100) (TIT(J),J=1,4)
      READ(JR,110) NCM,KRU,E,D,H,NVA,CACF,FCF,
     1             CK,CPO,TCE,R,G,FRD,M,
     2             KV,KVI,KVS,FP,LFI,LFF,IA,IM,ID
      READ(JR,111)IFYC,INTRA,ITICE,LSAL,IAA
      READ(JR,222)(TVAR(I),I=1,26)
      READ(JR,333)FACTOR,TCON,ECON,DCON,HCON,CRU,MCON,FPMAX
      DO 10 I=1,50
      READ(JR,120,END=88) NP(I),NQ(I),KM(I),RKM(I),XKM(I),KW(I),ITRA(I),
     1DAP(I),CTA(I)
      IF(KM(I).GT.999)GO TO 88
   10 CONTINUE
   88 N=I-1
      READ(JR,441)(VCCD(I),I=1,24)
C     LLAMADA A SUBRUTINA QUE VERIFICA LOS DATOS
      CALL VERIFY(JW,N,NCM,KRU,E,D,H,NVA,CK,CPO,TCE,R,G,FRD,M,KV,KVI,
     1KVS,FP,LFI,LFF,FACTOR,TCON,ECON,DCON,HCON,CRU,MCON,FPMAX,KM,RKM,
     2XKM,KW,ITRA,ISTOP,NP,NQ)
      IF(ISTOP.GE.1)GO TO 888
C     LLAMADA A SUBRUTINA QUE ASIGNA LA CONEXION DE NODOS
      CALL REOR(JW,N,NP,NQ,NP1,INERR)
  888 RETURN
  100 FORMAT(A80)
```

```
 444 FORMAT(12F5.1,/,12F5.1)
 222 FORMAT(10F7.4,/,10F7.4,/,10F7.4)
 110 FORMAT(I10,F10.2,2F10.3,F9.3,I3,2F7.4,/,6F10.4,I10/,6F10.4,I6,2I2)
 111 FORMAT(I10,2I5,2I10)
 333  FORMAT(5F10.4,F5.1,I5,F10.3)
 120  FORMAT(2I5,F10.3,2F10.5,F9.2,I4,F6.2,F7.1)
      END
C

C     SUBPROGRAMA CON INFORMACION DE NODOS,PARA PERMITIR ACUMULACION DE
C     CORRIENTES
C
C     ------------------------------------
      SUBROUTINE REOR(JW,N,NP,NQ,NP1,INERR)
C     ------------------------------------
      DIMENSION NP1(50),NQ1(50),NP(50),NQ(50)
      INERR=0
      NP1(1)=0
      NQ1(1)=1
      DO 18 I=2,N
      II=I-1
      DO 19 J=1,II
      IF(NQ(I).NE.NQ(J))GO TO 19
      INERR=INERR+1
      GO TO 71
   19 CONTINUE
      NQ1(I)=I
      IF(NP(I).NE.NP(1))GO TO 20
      NP1(I)=0
      GO TO 18
   20 K=0
      DO 21 J=1,II
      IF(NP(I).NE.NQ(J))GO TO 21
      K=1
      NP1(I)=J
C     J=I
   21 CONTINUE
      IF(K.EQ.0)INERR=INERR+1
   18 CONTINUE
      IF(INERR.GE.1)GO TO 71
      GO TO 77
   71 WRITE(JW,226)
  226 FORMAT(/,10X,'ERROR INFORMACION DE LOCALIZACION DE NODOS NO ES LA
     1CORRECTA',/)
   77 RETURN
      END
C
C
C     SUBRUTINA PARA ACUMULAR LAS CORRIENTES EN LOS SEGMENTOS
C
C     ------------------------------
      SUBROUTINE SUMAX(NP1,ERAM,N,SUM)
C     ------------------------------
      DIMENSION NP1(50),ERAM(50),SUM(50),IAUX(50)
      DO 82 I=1,N
      DO 11 J=1,N
   11 IAUX(J)=0
      L1=I
      M=0
      K=0
   15 DO 83 J=1,N
```

```
      IF(NP1(J).EQ.L1)GO TO 84
      GO TO 83
   84 K=K+1
      IAUX(K)=J
   83 CONTINUE
      M=M+1
      L1=IAUX(M)
      IF(L1.GT.0)GO TO 15
      SUX(I)=ERAM(I)
      DO 85 J=1,N
      IF(IAUX(J).GT.0)GO TO 20
      GO TO 85
   20 K=IAUX(J)
      SUM(I)=SUM(I)+ERAM(K)


   85 CONTINUE
   82 CONTINUE
      RETURN
      END
C
C     SUBRUTINA QUE VERIFICA LOS DATOS DEL PROGRAMA
C
C     ------------------------------------------------------------------
      SUBROUTINE VERIFY(JW,N,NCH,ARU,E,D,H,NVA,CK,CPO,TCE,R,G,FRD,M,KV,
     1KV1,KVS,FP,LF1,LFF,FACTOR,TCON,ECON,DCON,HCON,CPU,NWCON,FPMAX,EM,
     2ERAM,XLM,EW,ITRA,ISTOP,NP,ND)
C     ------------------------------------------------------------------
      DIMENSION RAM(50),XLM(50),ITRA(50),NP(50),ND(50)
      REAL MM(50),WM(50),ARU,KV,KV1,KVS,LF1,LFF
      ISTOP=0
      DO 130 I=1,N
      IF(NP(I).NE.ND(I))GO TO 4
      WRITE(JW,321)I,NP(I),I
  321 FORMAT(//,10X,'***ERROR*** NP(',I4,')TIENE EL VALOR:',I4,'IGUAL AL
     1 VALOR DE ND(',I4,')',/)
      ISTOP=ISTOP+1
  130 CONTINUE
    4 IF(NCH.LE.24)GO TO 5
      WRITE(JW,6)NCH
    6 FORMAT(//,10X,'***ERROR*** NCH TIENE EL VALOR:',I3)
      ISTOP=ISTOP+1
    5 IF(E.GE.0.)GO TO 15
      WRITE(JW,16)E
   16 FORMAT(//,10X,'***ERROR*** E TIENE EL VALOR:',F7.2)
      ISTOP=ISTOP+1
   15 IF(D.GE.0.)GO TO 77
      WRITE(JW,78)D
   78 FORMAT(//,10X,'***ERROR*** D TIENE EL VALOR:',F7.2)
      ISTOP=ISTOP+1
   77 IF(H.GE.0.)GO TO 79
      WRITE(JW,80)H
   80 FORMAT(//,10X,'***ERROR*** H TIENE EL VALOR:',F7.2)
      ISTOP=ISTOP+1
   79 IF(NVA.LT.30)GO TO 17
      WRITE(JW,18)NVA
   18 FORMAT(//,10X,'***ERROR*** NVA TIENE EL VALOR:',I4)
      ISTOP=ISTOP+1
   17 IF(CK.GE.0.)GO TO 19
      WRITE(JW,20)CK
   20 FORMAT(//,10X,'***ERROR*** CK TIENE EL VALOR:',F7.3)
```

```
69 IF(N.LE.NVA)GO TO 91
   WRITE(JW,92)N
92 FORMAT(//,10X,'***ERROR*** N TIENE EL VALOR:',I5)
   ISTOP=ISTOP+1
91 IF(NV.GT.0.)GO TO 21
   WRITE(JW,22)NV
22 FORMAT(//,10X,'***ERROR*** NV TIENE EL VALOR:',F9.2)
   ISTOP=ISTOP+1
21 IF(FP.LE.1.)GO TO 23
   WRITE(JW,24)FP
24 FORMAT(//,10X,'***ERROR*** FP TIENE EL VALOR:',F12.4)
   ISTOP=ISTOP+1
23 IF(LFI.GE.0.OR.LFI.LE.LFF)GO TO 25
   WRITE(JW,26)LFI
26 FORMAT(//,10X,'***ERROR*** LFI TIENE EL VALOR:',F7.4)
   ISTOP=ISTOP+1
25 IF(LFF.GT.0..OR.LFF.GE.LFI)GO TO 27
   WRITE(JW,28)LFF
28 FORMAT(//,10X,'***ERROR*** LFF TIENE EL VALOR',F7.4)
   ISTOP=ISTOP+1
27 IF(FACTOR.GE.0..AND.FACTOR.LE.1.)GO TO 29
   WRITE(JW,30)FACTOR
30 FORMAT(//,10X,'***ERROR*** FACTOR TIENE EL VALOR:',F8.4)
   ISTOP=ISTOP+1
29 IF(TCON.LE.24.)GO TO 31
   WRITE(JW,32)TCON
32 FORMAT(//,10X,'***ERROR*** TCON TIENE EL VALOR:',F7.3)
   ISTOP=ISTOP+1
31 IF(ECON.GE.0.)GO TO 33
   WRITE(JW,34)ECON
34 FORMAT(//,10X,'***ERROR*** ECON TIENE EL VALOR:',F9.3)
   ISTOP=ISTOP+1
33 IF(DCON.GE.0.)GO TO 35
   WRITE(JW,36)DCON
36 FORMAT(//,10X,'***ERROR*** DCON TIENE EL VALOR:',F9.3)
   ISTOP=ISTOP+1
35 IF(HCON.GE.0.)GO TO 37
   WRITE(JW,38)HCON
38 FORMAT(//,10X,'***ERROR*** HCON TIENE EL VALOR:',F7.3)
   ISTOP=ISTOP+1
37 IF(NMCON.LE.8)GO TO 39
   WRITE(JW,40)NMCON
40 FORMAT(//,10X,'***ERROR*** NMCON TIENE EL VALOR:',I5)
   ISTOP=ISTOP+1
39 IF(FPMAX.LE.1.)GO TO 41
   WRITE(JW,42)FPMAX
42 FORMAT(//,10X,'***ERROR*** FPMAX TIENE EL VALOR:',F7.3)
   ISTOP=ISTOP+1
41 DO 10 I=1,N
   IF(KN(I).GE.0.OR.RKM(I).GT.0.OR.XKM(I).GT.0.OR.KW(I).GE.0.)GO TO 2
   WRITE(JW,44)I,KN(I),I,RKM(I),I,XKM(I),I,KW(I)
44 FORMAT(//,10X,'***ERROR*** KN(',I2,')TIENE EL VALOR:',F8.3,/,21X,
  1'RKM(',I2,') TIENE EL VALOR:',F8.3,/,21X,'XKM(',I2,') TIENE EL VAL
  2OR:',F8.3,/21X,'KW(',I2,') TIENE EL VALOR:',F8.3)
   ISTOP=ISTOP+1
10 CONTINUE
 2 IF(ISTOP.EQ.0)GO TO 333
   WRITE(JW,45)ISTOP
45 FORMAT(//,10X,'*** EL NUMERO DE ERRORES ES:',I5,//)
333 RETURN
    END
```

```
C
C
C
C     SUBRUTINA PARA ENCABEZAMIENTO DEL PROGRAMA
C
C     ------------------------------------------
      SUBROUTINE ENCAB(JW,IND,NP,NLM,NL,IA,IM,ID)
C     ------------------------------------------
      NL=NL+1
      IF(NL.LE.NLM)GO TO 99
      NP=NP+1
      IF(NP.GT.1) WRITE(JW,199)
      WRITE(JW,100) NP,IA,IM,ID
    8 GO TO (10,20,30,40),IND
   10 WRITE(JW,110)
      NL=10
      GO TO 40
   20 WRITE(JW,120)
      NL=13
      GO TO 40
   30 WRITE(JW,130)
      NL=13
   40 CONTINUE
   99 RETURN
  100 FORMAT(1X,'--ESCUELA POLITECNICA NACIONAL-----UBICACION OPTIMA DE
     1CAPACITORES----PAG.: ',I2,/,1X,'--FACULTAD DE INGENIERIA ELECTRICA'
     2,29('-'),'FECHA: ',I2,2('/',I2),//)
  110 FORMAT(29X,'DATOS GENERALES',/,29X,15('-'),/)
  120 FORMAT(29X,'DATOS DEL ALIMENTADOR',/,29X,20('-'),//,2X,'TRAMO',4X
     1,'LONGITUD',2X,'REST.COND',2X,'REAC.COND',2X,'REST.TRAMO',2X,'REAC
     2.TRAMO',2X,'CARGA',/,2X,'DE  A',4X,'TRAMO KM',4X,'OHM/KM',5X,'OHM/
     3KM',6X,'OHM',9X,'OHM',5X,'POTENCIA',//)
  199 FORMAT(1H1)
  130 FORMAT(35X,'RESULTADOS',/,35X,10('-'),/)
      END
C
C     SUBRUTINA PARA IMPRIMIR INFORMACION Y DATOS GENERALES DEL ALIMENTA
C     DOR EN ESTUDIO
C
C     ------------------------------------------------------------------
      SUBROUTINE OUTPU(TIT,NCK,KRU,E,D,H,NVA,CK,CPO,TCE,R,G,H,FRD,KV,KVI
     1                ,KVS,FP,LFI,LFF,N,NP,NQ,KM,RKM,XKM,KW,JW,IA,IM,ID
     2                ,NG,NLM,NL,IND,RS,XS,ITRA,FPMAX)
C     ------------------------------------------------------------------
      DIMENSION RKM(50),XKM(50),RS(50),XS(50),ITRA(50)
      DIMENSION NP(50),NQ(50)
      CHARACTER*80 TIT(4)
      REAL KM(50),KW(50),KRU,KV,KVI,KVS,LFI,LFF
      NLM=60
      NG=0
      IND=1
      NL=70
      CALL      ENCAB(JW,IND,NG,NLM,NL,IA,IM,ID)
      WRITE(JW,102) (TIT(J),J=1,4)
      WRITE(JW,100) NCK,D,KRU,N,E,NVA,CK,G,CPO,FRD,TCE
      WRITE(JW,7)H,R,KV,KVI,KVS,LFI,LFF,N,FP,FPMAX
      NL=65
      IND=2
      DO 10 I=1,N
      NL=NL+1
      CALL ENCAB(JW,IND,NG,NLM,NL,IA,IM,ID)
   10 WRITE(JW,110) NP(I),NQ(I),KM(I),RKM(I),XKM(I),RS(I),XS(I),ITRA(I)
```

```
      NL=65
      IND=3
      CALL ENCAB(JW,IND,NG,NLM,NL,IA,IM,ID)
      RETURN
  102 FORMAT(4(10X,A80,/))
  100 FORMAT(/,2X,'NO. MAXIMO DE UNIDADES CAPACITIVAS POR NODO:',I10,/
     1,11X,'COSTO FIJO DE CAPACITORES ($X1000):',F10.3,/,2X,'CAPACIDAD D
     2E UNA UNIDAD CAPACITIVA 3F(KVAR):',F10.2,/,3X,'CARGAS ANUALES SOBR
     3E COSTO CAPACITORES (%):',F10.3,/,2X,'COSTO VARIABLE DE CAPACITORE


     4S ($X1000/KVAR):',F10.3,/,9X,'VIDA UTIL DE LOS CAPACITORES (ANIOS)
     5:',I10,/,8X,'COSTO ACTUAL DE ENERGIA  ($X1000/KWH):',F10.4,/,6X,'
     6TAZA DE CRECIMIENTO DE LA DEMANDA (%):',F10.4,/,2X,'COSTO CAPACIDA
     7D DE SUBESTACION ($X1000/KVA):',F10.4,/,8X,'RELACION DEMANDAS MINI
     8MA/MAXIMA(P.U.):',F10.4,/,3X,'TAZA DE CRECIMIENTO DE COSTO DE ENER
     9GIA(%):',F10.4,/)
    7 FORMAT(,2X,'PERIODO DE CRECIMIENTO DE LA DEMANDA(ANIOS):',
     1I10,/,13X,'TAZA ANUAL DE ACTUALIZACION  (%):',F10.4,//,17X,'VOLTAJ
     2E DEL ALIMENTADOR (KV):',F10.4,/,10X,'VOLTAJE MINIMO PERMITIDO  (V
     3OLTIOS):',F10.4,/,11X,'VOLTAJE MAXIMO PERMITIDO (VOLTIOS):',F10.4,
     4/,16X,'FACTOR DE CARGA ACTUAL (P.U.):',F10.4,/,16X,'FACTOR DE CARG
     5A FUTURO (P.U.):',F10.4,/,13X,'NUMERO DE TRAMOS DEL ALIMENTADOR:',
     6I10,/,2X,'FACTOR DE POTENCIA EN MINIMA DEMANDA (P.U.):',F10.4,/,2X
     7,'FACTOR DE POTENCIA EN MAXIMA DEMANDA (P.U.):',F10.4)
  110 FORMAT(,1X,2I5,2X,F5.3,5X,F6.4,5X,F6.4,5X,F6.4,5X,F6.4,5X,F6.4,4X,F7.2)
      END
C
C     SUBRUTINA PARA IMPRIMIR LOS RESULTADOS DE LA OPTIMA LOCALIZACION
C     DE CAPACITORES FIJOS
C
C     ------------------------------------------------------------------
      SUBROUTINE SALID(JW,EOBJ,SOBJ,CCAP,OBJE,N,NP,NQ,IL,NSG,CKVAR,ICN,
     1          ICA,GAN,VOL,VOLDOS,PSCA,VOMAX,KVI,KVS,KRU,NVA)
C     ------------------------------------------------------------------
      DIMENSION GAN(50),NSG(50),CKVAR(50),VOL(50),VOLDOS(50),VOMAX(50)
      DIMENSION NP(50),NQ(50)
      REAL IL(50),ICN(50),ICA(50),KVI,KVS,KRU
      DO 20 I=1,N
   20 CKVAR(I)=KRU*NSG(I)
      WRITE(JW,223)PSCA
      WRITE(JW,100) EOBJ,SOBJ,CCAP,OBJE
      DO 10 J=1,23
   10 WRITE(JW,110) NQ(J),NSG(J),CKVAR(J),ICN(J),GAN(J),NP(J),NQ(J),
     1IL(J),ICA(J)
      DO 111 J=24,N
  111 WRITE(JW,110) NQ(J),NSG(J),CKVAR(J),ICN(J),GAN(J),NP(J),NQ(J),
     1IL(J),ICA(J)
      WRITE(JW,500)KVS,KVI
      WRITE(JW,550) NP(1),VOL(1),VOLDOS(1),VOMAX(1)
      KAL=N+1
      DO 30 J=2,23
      I=J-1
   30 WRITE(JW,550) NP(I),VOL(J),VOLDOS(J),VOMAX(J)
      DO 301 J=24,KAL
      I=J-1
  301 WRITE(JW,550) NQ(I),VOL(J),VOLDOS(J),VOMAX(J)
      WRITE(JW,600)
      RETURN
  223 FORMAT(//,10X,'PERDIDAS ECONOMICAS EN ENERGIA SIN CAPACITORES',
     1/,10X,'EN MILES DE SUCRES',27X,':',F14.3,/,10X,45('='),/)
  100 FORMAT(///,2X,76('-'),//,2X,'AHORRO POR REDUCCION',2X,'AHORRO POR
     1LIBERACION',2X,'COSTO DE BANCOS',2X,'BENEFICIO NETO',/,2X,'DE PERD
```

```
     2IDAS DE ENERG-',2X,'DE CAPACIDAD DE LA',5X,'DE CAPACITORES',3X,'EN
     3 MILES DE  $',/,2X,'GIA EN MILES DE  $',4X,'S/E  EN MILES DE $',5X
     4,'EN  MILES DE  $',//,4X,F14.3,12X,F9.3,11X,F9.3,6X,F14.3,///,
     52X,'INSTALACION DE BANCOS DE CAPACITORES',3X,'I CAPA GAN  SEG
     6MENTO  DEL  ALIMEN',/,2X,'FIJOS SOBRE EL  ALIMENTADOR   PRIMARIO
     7  CITIVA    V',10X,'TADOR',/,2X,39('-'),3X,'EN KVP',8X,21('-'),//,
     82X,'LOCALIZACION  NUMERO DE  CAPACIDAD DEL',17X,'DE  A  IL(A)
     9 ICA(A)',/,5X,'NODO',8X,'UNIDADES  BANCO EN KVAR',//,2X,79('-')/)
  110 FORMAT(5X,I4,9X,I4,8X,F6.1,8X,F5.1,1X,F6.1,2I5,1X,F6.2,2X,F6.2)
  500 FORMAT(/,24X,'CALCULO DE LOS PERFILES DE VOLTAJE',/,24X,34('='),/,
     1/,6X,'VOLTAJE MAXIMO PERMITIDO = ',F9.2,2X,'KV',/,6X,
     2'VOLTAJE MINIMO PERMITIDO = ',F9.2,2X,'KV',//,10X,'NODO',8X,
     3'VOLTAJE   SIN',8X,'VOLTAJE   CON',4X,'VOLTAJE EN DEMANDA',/,21X
     4,'CAPACITORES P.U.',6X,'CAPACITORES P.U.',4X,'MINIMA P.U.',//)

  550 FORMAT(9X,I5,10X,F8.3,10X,F11.3,6X,F13.3)
  600 FORMAT(/,80('-')/)
      END
C
C
C     CALCULO DE PERDIDAS EN EL ALIMENTADOR SIN CAPACITORES
C
C     ------------------------------------------------------------
      SUBROUTINE PSINCA(NVA,N,IL,VDF,SEMAX,VDC,RS,XS,PSCA,FPE,M,G)
C     ------------------------------------------------------------
      DIMENSION VDF(27),VDC(27),RS(50),XS(50),FPE(27)
      REAL IL(50)
      PSCA=0.
      DO 10 I=1,N
      C=0.
      DO 11 K=1,NVA
      LL=K
      IF(K.GT.M)LL=M
      REL=(1.+G/100.)**LL
   11 C=((IL(I)*REL/SEMAX)**2*FPE(K))*VDC(K)+C
   10 PSCA=RS(I)*C+PSCA
      PSCA=26.28*PSCA
      RETURN
      END
C
C
C     CALCULO DE LA OPTIMA INSTALACION DE CAPACITORES CONECTABLES
C
C     ------------------------------------------------------------
      SUBROUTINE CONEC(JW,NSG,CKVAR,IL,ICA,N,M,G,NVA,R,RS,SEMAX,KV,CPO,
     1FACTOR,TCON,ECON,DCON,HCON,CRU,NMCON,NQ,VDC,FM,SOBJ,EICON,SLCON,
     2CCCON,OBCO,NCON,CCONEC,NP1,XS,FPMAX,VOL,VOLDOS,NP,DAP,PKVA,IAA,
     3CACF,CLCA)
C     ------------------------------------------------------------
      DIMENSION NSG(50),CKVAR(50),RS(50),CILAJ(50),ROL(27),VTD(27)
      DIMENSION VOL(50),VDC(27),NCON(50),CCONEC(50),NQ(50),NP1(50)
      DIMENSION XS(50),VOL3(50),VOLDOS(50),NP(50),DAP(50),PKVA(50)
      REAL IL(50),ICA(50),KVI,ICON(50),ICACON(50),KV
      C2=0.
      DO 13 I=1,NVA
      MEL=I
      IF(I.GT.M)MEL=M
      ROL(I)=(1.+G/100.)**MEL
      VTD(I)=HCON/100./(R/100.+1.)**I
   13 C2=C2+VTD(I)
      DO 150 I=1,N
      DO 311 K=1,NVA
```

```
311 CILAJ(I)=IL(I)*ROL(K)-ICA(I)
150 CONTINUE
    DO 79 I=1,N
 79 NCON(I)=0
    AMAY=0.
511 DO 30 M=1,N
    V1=AMAY
    I=N-M+1
    IF(NCON(I).EQ.0)GO TO 20
    NCON(I)=NCON(I)-1
    CALL ICAPA(N,ICON,NCON,CRU,KV,ICACON,NP1)
    CALL OBCON(N,NVA,CILAJ,ICACON,VDC,EICON,RS,SEMAX,KV,SLCON,CPO,
   1ICA,CCCON,ICON,ECON,DCON,OBCO,C2,PM,SOBJ,FACTOR,TCON,IL,NSG,DAP,
   2PKVA,IAA,CACF,CLCA)
    IF(OBCO.LE.AMAY)GO TO 21
    AMAY=OBCO
    GO TO 30
 21 NCON(I)=NCON(I)+1
 20 K=NCON(I)+1

    IF(K.GT.NKCON)GO TO 32
    NCON(I)=K
    CALL ICAPA(N,ICON,NCON,CRU,KV,ICACON,NP1)
    CALL OBCON(N,NVA,CILAJ,ICACON,VDC,EICON,RS,SEMAX,KV,SLCON,CPO,
   1ICA,CCCON,ICON,ECON,DCON,OBCO,C2,PM,SOBJ,FACTOR,TCON,IL,NSG,DAP,
   2PKVA,IAA,CACF,CLCA)
    IF(OBCO.LE.AMAY)GO TO 31
    AMAY=OBCO
    GO TO 30
 31 NCON(I)=NCON(I)-1
 32 K=K-2
    IF(K.LT.0)GO TO 30
    NCON(I)=K
    CALL ICAPA(N,ICON,NCON,CRU,KV,ICACON,NP1)
    CALL OBCON(N,NVA,CILAJ,ICACON,VDC,EICON,RS,SEMAX,KV,SLCON,CPO,
   1ICA,CCCON,ICON,ECON,DCON,OBCO,C2,PM,SOBJ,FACTOR,TCON,IL,NSG,DAP,
   2PKVA,IAA,CACF,CLCA)
    IF(OBCO.LE.AMAY)GO TO 33
    AMAY=OBCO
    GO TO 30
 33 NCON(I)=NCON(I)+1
 30 CONTINUE
    V2=AMAY
    IF(V2.GT.V1)GO TO 511
    CALL ICAPA(N,ICON,NCON,CRU,KV,ICACON,NP1)
    CALL OBCON(N,NVA,CILAJ,ICACON,VDC,EICON,RS,SEMAX,KV,SLCON,CPO,
   1ICA,CCCON,ICON,ECON,DCON,OBCO,C2,PM,SOBJ,FACTOR,TCON,IL,NSG,DAP,
   2PKVA,IAA,CACF,CLCA)
    DO 72 L=1,N
 72 CCONEC(L)=CRU*NCON(L)
C    CALCULO DEL PERFIL DE VOLTAJE AL CONECTARSE LOS CAPACITORES CONEC
C    TABLES
    VOL3(1)=KV*1000.
    M=N+1
    DO 96 I=2,M
    K=I-1
 96 VOL3(I)=(SQRT((VOL3(K)/SQRT(3.))**2-(XS(K)*IL(K)/SEMAX*FPMAX
   1-RS(K)*(IL(K)-(ICA(K)+ICACON(K))))**2)-RS(K)*IL(K)/SEMAX*FPMAX-XS(
   2K)*(IL(K)-(ICA(K)+ICACON(K))))*SQRT(3.)
    DO 779 L=1,M
779 VOL3(L)=VOL3(L)/(KV*1000.)
```

```
      IF(OBCO.LE.0.)GO TO 333
      WRITE(JW,222)FACTOR,TCON,ECON,DCON,HCON,CRU,NHCEN
      WRITE(JW,101)EICON,SLCON,CCCON,OBCO
      DO 37 J=1,23
   37 WRITE(JW,114) NQ(J),NSG(J),CKVAR(J),NCON(J),CCONEC(J)
      DO 337 J=24,N
  337 WRITE(JW,114) NQ(J),NSG(J),CKVAR(J),NCON(J),CCONEC(J)
      WRITE(JW,113)
      WRITE(JW,119) NP(1),VOL(1),VOLOOS(1),VOL3(1)
      KAL=N+1
      DO 115 J=2,23
      I=J-1
  115 WRITE(JW,119) NQ(J),VOL(J),VOLOOS(J),VOL3(J)
      DO 117 J=24,KAL
      I=J-1
  117 WRITE(JW,119) NQ(I),VOL(J),VOLOOS(J),VOL3(J)
      GO TO 123
  333 WRITE(JW,89)OBCO
  123 WRITE(JW,178)
      RETURN
   89 FORMAT(/6X,'LA INSTALACION DE CAPACITORES CONECTABLES NO SE JUSTI
     1FICA ECONOMICAMENTE',/,6X,'VALOR DE LA FUNCION OBJETIVO =:',F6.3)
  222 FORMAT(///,23X,'ESTUDIO DE CAPACITORES CONECTABLES',/,23X,34('-'),
     1//,10X,'DATOS:',/,10X,5('-'),/,10X,'RELACION IINDUCTIVA PROMEDIO E
     2N EL PERIODO DE',/,10X,'CONEXION Y LA MAXIMA IINDUCTIVA EN EL ANIO

     3'15X,':',F10.4,/,10X,'PERIODO DE CONEXION DE LOS CAPACITORES CONEC
     4TABLES(HORAS):',F10.4,/,10X,'COSTO VARIABLE DE CAPACITORES CONECTA
     5BLES   ($X1000/KVAR):',F10.4,/,10X,'COSTO FIJO INSTALACION CAPACIT
     6ORES CONECTABLES  ($X1000) :',F10.4,/,10X,'CARGAS ANUALES SOBRE CO
     7STO CAPACITORES CONECTABLES    (%):',F10.4,/,10X,'CAPACIDAD MINIMA
     8 DE UN BANCO CAPACITORES CONECT.(KVAR)   :',F10.4,/,10X,'NUMERO MA
     9XIMO DE UNIDADES TRIFASICAS CONECTABLES POR NODO:',I10,///)
  101 FORMAT(//,10X,'AHORROS Y COSTOS POR INSTALACION DE CAPACITORES CONE
     1CTABLES',//,2X,
     2'POR REDUCCION',5X,'POR LIBERACION DE',3X,'COSTO CAPACI',6X,'BENEF
     3ICIO NETO',/,2X,'PERDIDAS DE E',5X,'CAPACIDAD MILES $',3X,'TORES M
     4ILES$',6X,'EN MILES DE $',/,2X,'NERGIA MILES$',/,2X,F14.4,6X,F12.4
     5,7X,F12.4,6X,F12.4,/,30X,'RESULTADOS GENERALES',/,30X,20('-'),///,
     62X,'LOCALIZACION OPTIMA: CAPACITORES FIJOS Y CONECTABLES EN EL A/P
     7 DE DISTRIBUCION',//,2X,'NODO',5X,'CAPACITORES',5X,'CAPACIDAD',6X,
     8'CAPACITORES',6X,'CAPACIDAD EN',/,14X,'FIJOS',8X,'EN C.FIJOS',5X
     9,'CONECTABLES',6X,'C.CONECTABLES',/,30X,'KVAR',29X,'KVAR',/)
  114 FORMAT(2X,I4,8X,I3,13X,F6.1,10X,I3,14X,F6.1)
  113 FORMAT(25X,'CALCULO DE LOS PERFILES DE VOLTAGE',/,25X,30('-'),// .
     1,7X,'NODO',5X,'VOLTAJE SIN',4X,'VOLTAJE  CON',4X,'VOLTAJE  CON
     2CAPA',/,16X,'CAPACITORES',4X,'CAPACITORES',4X,'CITORES  FIJOS   Y
     3',/,18X,' P . U .',6X,'FIJOS  P . U .',4X,'CONECTABLES P . U .',/)
  119 FORMAT(7X,I4,6X,F10.3,5X,F10.3,10X,F10.3)
  178 FORMAT(/,60X,' FIN DEL ESTUDIO ',/,69('-'),17('='))
      END
C
```

```
C
C     SUBRUTINA QUE CALCULA LA FUNCION OBJETIVO PARA LOS CAPACITORES
C     CONECTABLES
C     ------------------------------------------------------------------
      SUBROUTINE OBCON(N,NVA,CILAJ,ICACON,VDC,EICON,RS,SEMAX,KV,SLCON,
     1CFO,ICA,CCCON,ICON,ECON,DCON,OBCO,C2,PM,SOBJ,FACTOR,TCON,IL,NSG,
     2DAP,PKVA,IAA,CACF,CLCA)
C     ------------------------------------------------------------------
      DIMENSION CILAJ(50),VDC(27),RS(50),NSG(50),DAP(50),PKVA(50)
      REAL ICACON(50),KV,ICA(50),ICON(50),IL(50)
      EICON=0.
      CCCON=0.
      DO 10 I=1,N
      C=0.
      COST=DAP(I)
      A=1.
      IF(ICON(I).LE.0.)A=0.
      IF(NSG(I).GE.1)COST=0.
      DO 11 K=1,NVA
   11 C=(2.*CILAJ(I)*FACTOR*ICACON(I)-ICACON(I)**2)*VDC(K)+C
      CCCON=CCCON+ECON*(1.+C2)*ICON(I)*SQRT(3.)*KV*A*(DCON+COST)*(1.+C2)
   10 EICON=RS(I)*C+EICON
      EICON=1.095*TCON*EICON
      SLCON=CFO*PM*(1.-SQRT(1.+(((ICACON(1)+ICA(1))*SEMAX/IL(1))**2-2.*SE
     1      MAX**2*((ICA(1)+ICACON(1))/IL(1))))
      IF(IAA.EQ.0)GO TO 3
      CA=0.
      DO 72 I=1,N
      CA=CA+PKVA(1)*(1.-SQRT(1.+(SQRT(3.)*KV*(ICA(I)+ICACON(I))/PKVA(I))
     1**2-2.*SQRT(3.)*KV*(ICA(I)+ICACON(I))*SEMAX/PKVA(I)))
   72 CONTINUE
      CLCAC=CA*CACF
      GO TO 4
    3 CLCAC=0.
    4 OBCO=EICON+SLCON-SOBJ+CLCAC-CLCA-CCCON
      RETURN
      END
```

REFERENCIAS Y BIBLIOGRAFIA

1. Banco Mundial, " La energía en los países en desarrollo", Agosto, 1980.

2. J. V. Schmill, "Optimum size and location of shunt capacitors on distribution feeders," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-84, pp. 825-832, Septem - ber 1965.

3. R. F. Cook, "Calculating loss reduction afforded by shunt capacitor aplication," IEEE Transactions on power Apparatus and Syistems, vol, PAS-83, pp. 1227-1230, December, 1964.

4. Hernando Duran, " Optimum number, location, and size of shunt capacitors in rural distribution feeders-Adynamic programing approach," IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.. PAS-87, pp.1769-1774,September 1968.

5. Grainger and Lee, "Optimum size and location of shunts capacitors for reduction of losses on distribution feeders IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, vol.PAS -100, pp.1105-1118, March 1981.

6. F. L. Chernous Ko, "A local variation method for numeri - cal solution of variational problems," USSR Computational Mathematics and Mathematical Physics, vol. 5, No. 4, pp. 234-242, 1966.

7. Westinghouse , "Electrical Transmission and Distribution Reference Book" .

8. M. Ponnavaikko and K.S. Prakasa Rao, "Optimal choice of fixed and switched shunt capacitors on radial distributors by the method of local variations", IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-102, No.6, June 1983

9. Recopilación de datos en la División de Planificación y Evaluación de Proyectos, E. E. Q. S. A.

10. Recopilación de datos en el Departamento de Despacho de Carga, E. E. Q. S. A.

11. Recopilación de datos en la División de Diseño de Líneas y Subestaciones, E. E. Q. S. A.

12. Recopilación de datos en la Dirección Operativa de Distribución, E. E. Q. S. A.

13. Siemens, "Power Factor Correction". Publicación.

14. Pender Harold, "Electrical Engineering Handbook".

15. Inelin, "Estudio Integral del Sistema Eléctrico de Potencia, Empresa Eléctrica Quito", Abril 1985.

16. Westinghouse Electric Corporation, "Instructions for Autotrol Open Type Capacitor Equipment". Catálogo Il 39-361-1A

17. Contratos realizados por Inecel.

18. Westinghouse Electric Corporation, "Shunt Capacitors Application to Electric Utility Systems".