



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE  
ESCUELA DE INGENIERÍA**

---

**ANÁLISIS INTERACTIVO GRÁFICO DE  
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN PRIMARIA**

**RAÚL CÉSAR VILCAHUAMÁN SANABRIA**

Tesis para optar al grado de  
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Profesor Supervisor  
**HUGH RUDNICK VAN DE WYNGARD**

Santiago de Chile, 1993



**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DE CHILE**  
**ESCUELA DE INGENIERÍA**  
**Departamento de Ingeniería Eléctrica**

---

**ANÁLISIS INTERACTIVO GRÁFICO DE  
SISTEMAS ELÉCTRICOS DE DISTRIBUCIÓN PRIMARIA**

**RAÚL CÉSAR VILCAHUAMÁN SANABRIA**

Tesis presentada a la comisión integrada por los profesores:

**HUGH RUDNICK VAN DE WYNGARD**

**SEBASTIÁN RÍOS MARCUELLO**

**RAÚL MOYA REVECO**

**JUAN DE DIOS ORTÚZAR**

Para completar las exigencias del grado de  
Magister en Ciencias de la Ingeniería

Santiago de Chile, 1993

A mis Padres Raúl y Elva  
A mi mamá Ati  
A mi hermano Percy  
y a Liz  
por su comprensión y cariño.

## **AGRADECIMIENTOS**

Deseo agradecer en forma muy especial a mi profesor supervisor Ph.D. Hugh Rudnick V.D.W por su disposición a atender mis consultas y dudas.

A los profesores del Departamento de Ingeniería Eléctrica, por su valiosa colaboración.

A mis Padres por el apoyo incondicional.

A la Pontificia Universidad Católica de Chile por el respaldo brindado.

## ÍNDICE GENERAL

	Página
<b>DEDICATORIA</b>	ii
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	iii
<b>ÍNDICE GENERAL</b>	iv
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	vii
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	viii
<b>RESUMEN</b>	xii
<b>ABSTRACT</b>	xiii
<b>I. INTRODUCCIÓN</b>	
1.1 Generalidades	1
1.2 Planteamiento del Problema	1
1.3 Programas de Aplicación Existentes	3
1.4 Desarrollos en el País	4
1.5 Organización del Trabajo	5
<b>II. LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN</b>	
2.1 Introducción	7
2.2 Características de los Sistemas de Distribución	8
2.3 Clasificación de los Sistemas de Distribución	9
2.4 Componentes de los Sistemas de Distribución	10
2.5 Automatización en Distribución	12
2.6 Clasificación de Funciones de la Automatización	15

2.6.1	Clasificación por niveles	16
2.6.2	Clasificación por objetivos	18
2.7	Sistema de Comunicaciones	27
2.8	Control de Sistemas Automatizados	28
2.9	Flujo de Potencia en Sistemas de Distribución	31
2.10	Comparación de los Métodos	32
2.11	El Problema de la Compensación Capacitiva	34

### **III. INTERFACE INTERACTIVO INTUITIVO GRÁFICO EN SDDE**

3.1	Introducción	36
3.2	Gráficos Interactivos e Intuitivos	36
3.3	AIDPRI	40
3.4	Estructura Funcional del Programa	43
3.5	Diseño de AIDPRI	44
3.6	Diálogo Interactivo	45

### **IV. EL PROGRAMA AIDPRI**

4.1	Introducción	46
4.2	Descripción del Paquete	46
4.3	Recuperar Sistema de Archivo	47
4.4	Dibujo y Modificación de la Red	49
4.5	Edición de Datos	51

4.6	Análisis del Flujo de Potencia Trifásico	57
4.7	Análisis Óptimo de Reactivos	68
<b>V. AIDPRI COMO SISTEMA DE INFORMACIÓN</b>		
5.1	Generalidades	78
5.2	Un Sistema de Información de Red	78
5.3	Base de Datos de la Red y Arquitectura de Datos	80
5.4	AIDPRI como parte de un Sistema de Información	81
<b>VI. APLICACIÓN A UN SDDE REAL</b>		
6.1	Introducción	83
6.2	Sistema CGEI	83
6.3	Estudio del Sistema CGEI	84
6.4	Análisis Trifásico del Sistema	93
6.5	Ubicación y Tamaño de Condensadores	100
6.6	Potencialidad de la Herramienta	103
<b>VII. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS</b>		
7.1	Conclusiones	108
7.2	Desarrollo Futuro	111
<b>ANEXO</b>		
A:	FLUDIS	112
<b>REFERENCIAS</b>		
		124

## INDICE DE TABLAS

		Página
Tabla II.1	Clasificación por niveles de funciones de automatización	16
Tabla II.2	Clasificación de actividades de AD según su ámbito de acción	17
Tabla III.1	Requerimientos de memoria	44
Tabla IV.1	Datos para el sistema de Civanlar y Grainger	72
Tabla IV.2	Datos para el sistema de prueba	72
Tabla V.1	Arquitectura de datos	80
Tabla VI.1	Consumos, nodos A01 al B17	87
Tabla VI.2	Consumos desde el nodo B18 al C42	87
Tabla VI.3	Consumos desde C47 al A61	88
Tabla VI.4	Consumos del A60 al A75	88
Tabla VI.5	Shunts en el sistema CGEI	89
Tabla VI.6	Datos de líneas y shunts	90
Tabla VI.7	Datos de líneas y shunts sistema CGEI	90
Tabla VI.8	Datos de líneas y shunts desde A28 al A59	91
Tabla VI.9	Datos de líneas y shunts desde A58 al B18	91
Tabla VI.10	Datos de líneas y shunts desde B18 al BC51	92
Tabla A.1	Síntesis de los componentes de modelos de carga en régimen permanente	120



## ÍNDICE DE FIGURAS

		Página
Figura 2.1	Red de distribución típica	9
Figura 2.2	Diagrama de un sistema típico de distribución mostrando sus partes principales	11
Figura 2.3	Monitoreo y control en sistemas eléctricos de potencia	14
Figura 2.4	Gestión de la información en AD	19
Figura 2.5	Gestión de la eficiencia	22
Figura 2.6	Gestión de la seguridad y la calidad	24
Figura 2.7	Gestión óptima	25
Figura 2.8	Funciones básicas de apoyo	26
Figura 2.9	Organización de funciones para AD	26
Figura 2.10	Control en un sistema automatizado	29
Figura 2.11	Acciones en el CDD	30
Figura 2.12	Comparación de los métodos: consumos independientes de la tensión	32
Figura 2.13	Comparación de los métodos: consumos dependientes de la tensión	33
Figura 3.1	Estructura jerárquica	38
Figura 3.2	Interfaces intuitivas	39
Figura 3.3	Ejemplo de un sistema real de distribución	40
Figura 3.4	Estructura de AIDPRI	42
Figura 4.1	Menú principal de AIDPRI	47
Figura 4.2	Recupera archivos privados	48
Figura 4.3	Red Frontel Cholguan-Yungay	49

		Página
Figura 4.4	Códigos nemotécnicos, primer ayuda	50
Figura 4.5	Códigos nemotécnicos, segunda ayuda	50
Figura 4.6	Menú de edición de datos	51
Figura 4.7	Datos de los nodos, Red Frontel	52
Figura 4.8	Datos de los nodos, Red Frontel	52
Figura 4.9	Datos de las líneas, shunts y transformadores, Red Frontel	53
Figura 4.10	Datos de las líneas, Red Frontel (continuación)	54
Figura 4.11	Parámetros en la fuente, Red Frontel	55
Figura 4.12	Códigos de carga	56
Figura 4.13	Códigos de conexión y conductor	56
Figura 4.14	Sistema radial con dos tramos	57
Figura 4.15	Análisis trifásico	59
Figura 4.16	Desbalances y características del sistema	59
Figura 4.17	Resultados generales	60
Figura 4.18	Potencias por fase	61
Figura 4.19	Factor de potencia del sistema	62
Figura 4.20	Desglose de pérdidas	62
Figura 4.21	Nivel de tensión versus nodo	63
Figura 4.22	Nivel de tensión versus distancia	63
Figura 4.23	Pérdidas activas versus rama	64
Figura 4.24	Pérdidas reactivas en ramas de la red	65
Figura 4.25	Pérdidas activas versus distancia	66
Figura 4.26	Pérdidas reactivas versus distancia	66

		Página
Figura 4.27	Intensidad de corriente en cada rama de la red	67
Figura 4.28	Diagrama de bloques del modelo reactivo desacoplado	70
Figura 4.29	Diagrama unifilar de la Red Civanlar y Grainger	71
Figura 4.30	Caso discreto de la Red Civanlar	73
Figura 4.31	Costos de condensadores	73
Figura 4.32	Ubicación y tamaño de condensadores	74
Figura 4.33	Ubicación de condensadores ( caso lineal)	75
Figura 4.34	Nivel de tensión	76
Figura 4.35	Control óptimo de condensadores	77
Figura 5.1	Sistema de información y diseño de la red	79
Figura 6.1	Recupera archivo CGEI	84
Figura 6.2	Parte inicial del Sistema CGEI	85
Figura 6.3	Opciones de dibujo	86
Figura 6.4	Red CGEI	86
Figura 6.5	Parámetros en la subestación	92
Figura 6.6	Resultados generales de la simulación	93
Figura 6.7	Potencias activas y reactivas	94
Figura 6.8	Pérdidas en el sistema y factor de potencia	94
Figura 6.9	Pérdidas en el sistema respecto al total	95
Figura 6.10	Nivel de tensión versus nodo	95
Figura 6.11	Nivel de tensión versus distancia	96
Figura 6.12	Pérdidas activas versus rama	97

	Página	
Figura 6.13	Pérdidas reactivas versus rama	97
Figura 6.14	Pérdidas activas versus distancia	98
Figura 6.15	Pérdidas reactivas versus distancia	98
Figura 6.16	Corriente fase uno versus rama	99
Figura 6.17	Corriente fase dos versus rama	99
Figura 6.18	Corriente fase tres versus rama	99
Figura 6.19	Control de condensadores	101
Figura 6.20	Tensiones reguladas ventana 3	102
Figura 6.21	Tensiones reguladas ventana 4	102
Figura 6.22	Pérdidas activas y reactivas para distintas ubicaciones de condensadores	104
Figura 6.23	Factor de potencia para distintas ubicaciones de condensadores	104
Figura 6.24	Nivel de tensión por fase en el Nodo A75 para distintas ubicaciones de condensadores	105
Figura 6.25	Pérdidas activas y reactivas para distintas ubicaciones de condensadores	105
Figura 6.26	Factor de potencia versus ubicación de condensadores	106
Figura 6.27	Nivel de tensión por fase en el nodo A75 para distintas ubicaciones de condensadores	106
Figura A.1	Modelación de carga en alimentadores	118
Figura A.2	Sistema radial con dos tramos	122

## RESUMEN

Se presenta un paquete computacional interactivo, intuitivo, gráfico de análisis de sistemas de distribución. Vincula el diseño gráfico de una red eléctrica con algoritmos especializados de estudio. Se utilizan interfaces gráficas amigables y se incorporan dos algoritmos especializados para el estudio de sistemas de distribución: flujo de potencia y compensación reactiva. El flujo de potencia trifásico utilizado corresponde a un algoritmo especializado en redes radiales. Se reportan comparaciones de tres métodos de flujos de potencia y se analiza sus características de rapidéz y eficiencia, recomendandose e implementandose el método suma de potencias. Se incorpora una completa modelación de los diversos elementos integrantes de la red de distribución eléctrica. El control de tensión y potencia reactiva, utilizando condensadores y reguladores de tensión es analizado con el modelo heurístico propuesto por Grainger y Civanlar que permite ubicar y dimensionar bancos de condensadores, reduciendo pérdidas y caídas de tensión. Se determina el mínimo banco de condensadores requeridos así como estrategias de conexión y desconexión que permitirán responder en forma diaria, semanal o mensual a los cambios de carga reactiva que se produce en el sistema.

El paquete ofrece a los ingenieros de distribución una herramienta moderna para el estudio, diseño y la planificación de sistemas eléctricos de distribución.

## **ABSTRACT**

An interactive intuitive graphical simulation package for the analysis of electric distribution systems (EDS) is presented. It links the interactive graphical design of an electrical network with specialized analysis algorithms. The interaction is facilitated by the use of a friendly graphic interface. Two analysis algorithms are integrated allowing the study of load flow conditions as well as the optimization of reactive power allocation and sizing. Several three phase load flow methods are compared in order to know which one is the best in speed and efficiency, and the power summation method is selected for the application. The program incorporates complete models for the electric components. The problem of volt/var control is solved with a heuristic method originally proposed by Grainger and Civanlar. The method permits to allocate and size capacitor banks for loss reduction and voltage control for varying load conditions. The minimum number of capacitors is determined as well as the switching strategies that allow to respond to daily, weekly or monthly changes in reactive load.

The package provides an easy to use, state of the art tool for the analysis, design and planning of electrical distribution systems.

# **I. INTRODUCCIÓN**

## **1.1 Generalidades**

El estudio de los sistemas de distribución eléctrica, es de especial interés para las empresas distribuidoras, interesadas en aumentar su eficiencia y mejorar la operación y administración de la red.

El análisis de los sistemas de distribución eléctrica (SDDE), tiene sus particularidades, pues los modelos usados en media tensión (MT), no permiten en la mayoría de los casos hacer las suposiciones y simplificaciones válidas para los modelos de alta tensión (AT).

El presente trabajo, trata de dar solución a tal problema, mediante el uso de algoritmos especializados en SDDE, los cuales funcionarán integrados en un **paquete computacional, intuitivo, interactivo y gráfico.**

## **1.2 Planteamiento del Problema**

El auge de la utilización de los computadores personales (PC) trajo consigo la aparición del concepto diseño asistido por computadora (computer aided design CAD), el cual se desarrolló principalmente para especialidades como la ingeniería mecánica, la arquitectura, y la ingeniería eléctrica. Analizar y planear hoy en día redes eléctricas, crecientemente complejas, requiere de herramientas de diseño asistido por computadores.

La nueva generación de programas de aplicación a SDDE en computadores personales explota el ambiente interactivo a través de menús y técnicas de cajas de diálogo, con lo cual se consiguen interfaces amigables hombre-máquina, **trayendo consigo el incremento de la productividad** [2,17].

Los interfaces hombre-máquina desarrollados hasta ahora, se dividen en dos categorías: procesos batch y procesos interactivos. **Proceso Batch** es la forma más simple de interacción de hombre-máquina. Se desarrolló con la primera generación de computadores en los años cincuenta, y aún es utilizado por algunas empresas eléctricas de distribución. El proceso Batch es ineficiente pues no hay interacción directa entre el usuario y la computadora. Para corregir un error tipográfico o para hacer un pequeño cambio el usuario requiere volver a ejecutar la aplicación y esperar el término del proceso. La necesidad obvia de interacción hombre-máquina dió paso al **proceso interactivo**, el cual fue difundido en los 70's cuando los sistemas operativos de tiempo compartido se hicieron disponibles.

Básicamente en un proceso interactivo, el usuario interactúa con la computadora con una serie de señales alfanuméricas. Las formas avanzadas de interfaces gráficas hacen uso de conjuntos de instrucciones (macros), despliegue de menús y cajas de diálogo [5,17,21,22].



La planeación de la operación de los sistemas eléctricos para las condiciones existentes, así como para las expansiones futuras, requiere no sólo de estudios de flujos de potencia, control de tensiones y control de reactivos, también de cortocircuitos, entre otros [7,19,13].

### 1.3 Programas de Aplicación Existentes

Entre los paquetes computacionales más conocidos en el mercado, referidos a SDDE se encuentran:

**Distribution Primary Analysis/Graphics DPA/G**, desarrollado por la empresa Scott & Scott Integrated Software Solutions, está escrito en Structured Query Language(SQL), tiene buenas capacidades gráficas, funciona con Microsoft Windows, los cálculos que realiza son: análisis del flujo de potencia tanto monofásico como trifásico, y ubicación de capacitores [18]. Se pueden agregar otros módulos de análisis, pero estos se comercializan aparte.

**DAPPER Distribution Analysis for Power Planning Evaluation and Reporting**, desarrollado por la compañía SKM Systems Analysis, Inc, dentro de su grupo Power-Tools Electrical Engineering Software, este paquete permite: análisis de fallas trifásicas, cálculo de flujo de potencia y caídas del nivel de tensión, dimensionamiento de transformadores, análisis de partida de motores. No da información respecto a los algoritmos utilizados ni al lenguaje en el cual fué desarrollado [41].

**EDSA** Micro Corporation, ofrece al mercado un flujo de potencia para sistemas de distribución basado en el método de Newton-Raphson, permite localizar los nodos con violaciones de tensión, y también localizar los transformadores cuyos taps puedan solucionar tales transgresiones [50].

Se tiene además conocimiento de la experiencia del desarrollo de un software utilizando programación orientada al objeto, en el DIE de la Universidad Politécnica de Valencia, Valencia España. Se utilizó el lenguaje Smalltalk, con el que se construyó un interfaz amigable al usuario. El sistema permite dibujar o modificar los elementos que constituyen la red de distribución. A través de una ventana de texto pueden introducirse los datos de los elementos. Cuenta con movimientos de pantalla, y aumento o disminución del tamaño del dibujo. El entorno gráfico ha sido conectado a un sistema experto con el que se resuelve el problema de tensiones fuera de límites [51,9].

#### **1.4 Desarrollos en el País**

Los desarrollos en el país son limitados, pues están referidos principalmente a estudios de sistemas interconectados; investigaciones específicas para SDDE se tiene: el flujo de potencia trifásico [14], flujo de carga para sistemas de distribución eléctrica [52], control de tensiones[15], y el de instalación óptima de reactivos[16], este último utilizando el paquete LINDO (Linear, interactive, discrete optimizer), desarrollado en la Universidad de Chile.

Por parte de las empresas, se sabe del desarrollo del proyecto denominado "Proyecto Red", de la empresa Chilectra Metropolitana, el cual utiliza el paquete ARC/INFO (software comercial), basado en el sistemas GIS (Geographic Information System).

La misma empresa cuenta con el programa denominado PDSA - SISGRAF, el PDSA funciona bajo el sistema OS-2, y SISGRAF en DOS, permite el cálculo del flujo de potencia y ubicación de reactivos. Tiene una adecuada presentación gráfica.

## **1.5 Organización del Trabajo**

En este capítulo, se presenta la problemática que dió origen al presente trabajo, se realiza una revisión de soluciones planteadas por otros investigadores y compañías de desarrollo de programas de aplicación.

En el capítulo dos se define un sistema de distribución, los beneficios de la automatización; se establece el algoritmo que será la columna vertebral del paquete denominado: Análisis Interactivo de Distribución Primaria.

En el capítulo tres se describe el interface interactivo, intuitivo, gráfico en SDDE, las cajas de diálogo y los despliegues de gráficos. Se describe la estructura funcional del programa, y sus requerimientos.

En el capítulo cuatro, se describe detalladamente el algoritmo involucrado en el desarrollo del programa, así como también los análisis que se pueden hacer con la ayuda de él.

El capítulo cinco, describe las posibilidades del paquete como un sistema de información.

El capítulo seis trata de la aplicación del programa a un sistema real de distribución de energía eléctrica; se presentan gráficos de los datos de entrada y salida.

Con el capítulo siete se presentan las conclusiones, recomendaciones y futuros desarrollos relacionados con la investigación.

Seguidamente, se expone: el anexo A el cual contiene información acerca del paquete denominado FLUDIS (Flujos en Distribución). Al final del anexo se presenta las referencias bibliográficas utilizadas para el desarrollo de esta tesis.

## **II. LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN**

### **2.1 Introducción**

Los sistemas de distribución incluyen todos los elementos de transporte de energía eléctrica comprendidos entre las subestaciones primarias, donde la transmisión de potencia se reduce a niveles de distribución, y las bajadas de servicio a los abonados [19,26].

Un sistema de distribución normal consta de: redes de subtransmisión, subestaciones de distribución, que transforman la energía a una tensión más baja, adecuada para la distribución local, alimentadores o "feeders", los cuales alimentan un área bien definida; estaciones transformadoras de distribución, montadas sobre postes, en casetas o cámaras subterráneas, cerca de los centros de consumo, para transformar la energía a la tensión de los usuarios finales.

Luego se tiene las redes de distribución de baja tensión que transportan la energía a lo largo de las calles y por acometidas que transportan la energía desde las redes de baja tensión a los empalmes de los usuarios.

La función de los sistemas de distribución es recibir la energía eléctrica de las centrales de producción o estaciones primarias y distribuir a los usuarios a la tensión adecuada, con la conveniente continuidad y calidad de suministro para los distintos usos [7,9,19,26].

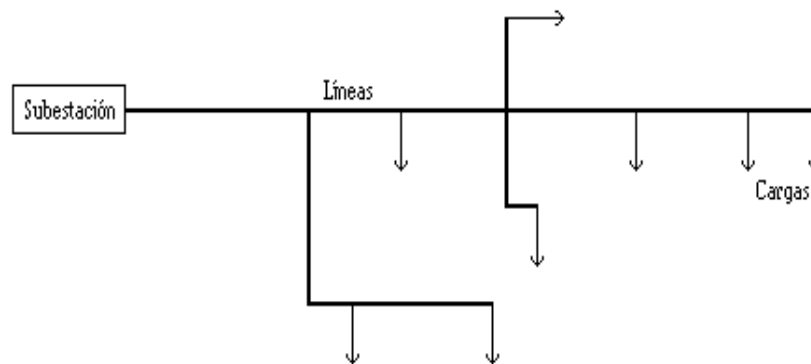
## 2.2 Características de los Sistemas de Distribución

Las redes de distribución presentan características muy particulares, que las diferencian de las de transmisión. Entre éstas se distinguen:

- topologías radiales
- razón R/X alta (líneas de resistencia comparables a la reactancia)
- múltiples conexiones (monofásicas, bifásicas, etc.).
- estructura lateral compleja
- cargas de distinta naturaleza.
- líneas sin transposiciones.
- cargas distribuidas [11,27]

Los sistemas de distribución son típicamente radiales, esto es, el flujo de potencia nace sólo de un nudo. Este nudo principal se reconoce como la subestación que alimenta al resto de la red (figura 2.1). En la subestación se reduce la tensión del nivel de alta tensión (AT) al de media tensión (MT) [14,19].

La distribución se hace en el nivel de MT o en baja tensión (BT). Los clientes residenciales o comerciales se alimentan en BT los clientes industriales se alimentan en MT o en BT, según los requerimientos particulares de cada uno de ellos [19,26].



**Figura 2.1** Red de distribución típica

En estos sistemas se pueden encontrar muchos tipos de conexiones: trifásicas, bifásicas, o monofásicas. Si bien es cierto en MT predominan las redes trifásicas es frecuente encontrar cargas bifásicas, especialmente en zonas rurales. Sin embargo es en BT donde se encuentran las más variadas conexiones, consecuencia de una mayoría de cargas residenciales de naturaleza monofásica. Los desequilibrios que se generan en BT tratan de amortiguarse repartiendo equitativamente las cargas en las tres fases [11,14,27].

### 2.3 Clasificación de los Sistemas de Distribución

Los sistemas de distribución pueden clasificarse de diversas formas:

- según la carga: alumbrado publico, industrial, comercial, residencial, mixta.
- según la corriente: continúa y alterna.
- según la tensión: distribución primaria, distribución secundaria.
- según su topología: radial, anillo, enmallada.

- según el número de conductores: bifilar, trifilar, a cuatro hilos, etc.
- según el tipo de instalación: aérea ó subterránea [28].

## **2.4 Componentes de los Sistemas de Distribución**

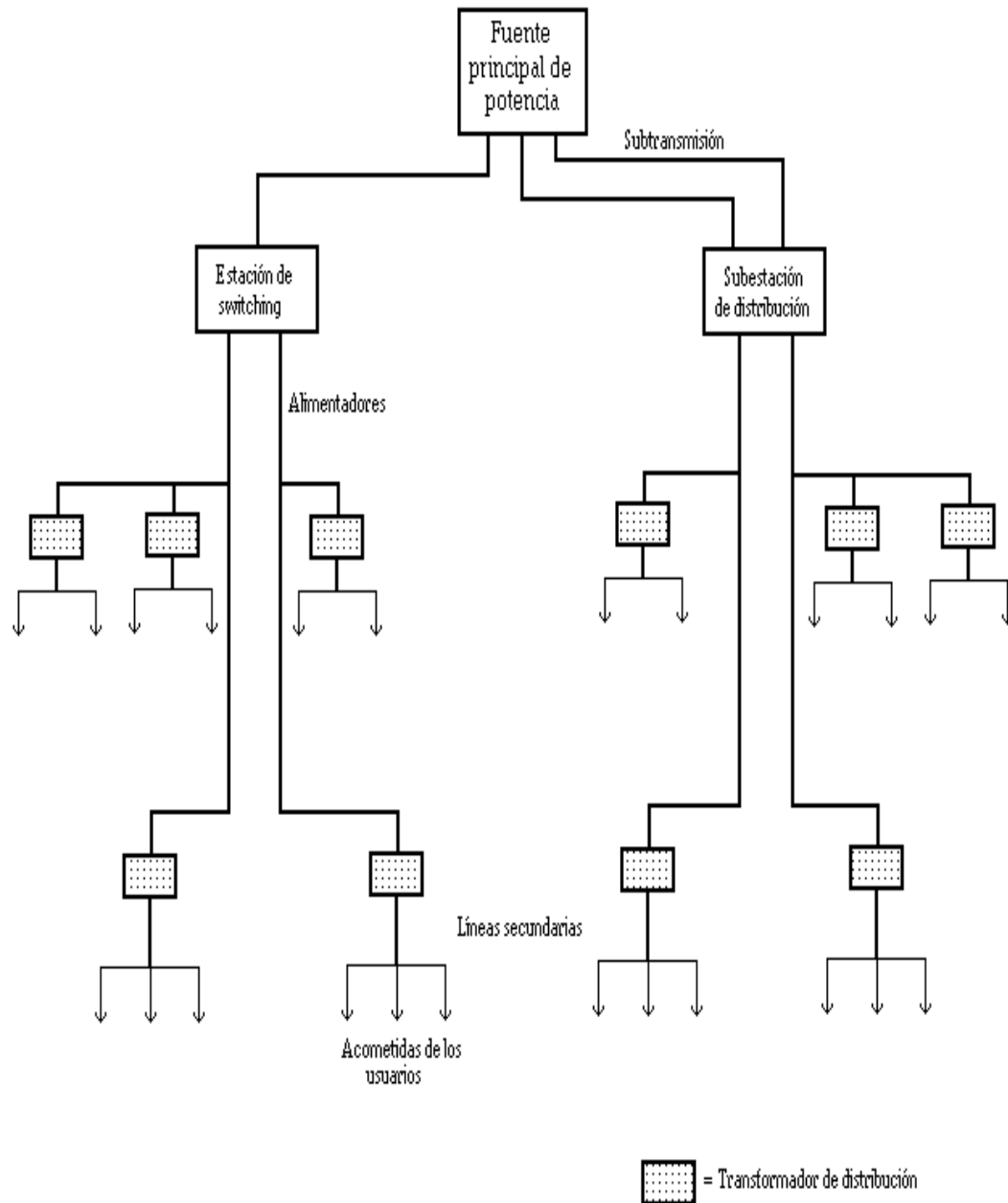
En todo sistema de distribución suelen encontrarse los siguientes elementos: alimentadores, transformadores, líneas y cables, capacitores o condensadores y equipos de protección.

Lo mencionado anteriormente, son los componentes mínimos, los cuales pueden incrementarse o variarse de acuerdo a una determinada necesidad o realidad.

Partiendo de la fuente principal de energía, ésta es llevada (figura 2.2) a través de líneas de subtransmisión, hasta la subestación, donde la tensión es disminuida para la distribución en una determinada área local.

Cada subestación abastece su área de carga, por medio de los alimentadores o feeders [19,26,28].





**Figura 2.2** Diagrama de un sistema típico de distribución mostrando sus partes principales.

## **2.5 Automatización en Distribución**

Se entiende por automatización de la distribución (AD) la aplicación de las técnicas y recursos necesarios para que el sistema de distribución en conjunto pueda ser operado y controlado remotamente, coordinando el uso de sus distintos elementos en tiempo real.

La noción de tiempo real implica que el sistema de control debe ser capaz de tomar en cuenta interrupciones no planificadas procedentes de elementos del proceso.

Ante estas interrupciones el sistema debe salvar su configuración y pasar a atender aquellas, ejecutando las acciones necesarias. Al finalizar las acciones el sistema debe volver al estado en que estaba antes de iniciar este proceso, si durante el intervalo transcurrido no se han producido otras interrupciones.

Los requisitos de tiempo de respuesta difieren mucho de unas aplicaciones a otras: mientras que la lectura de consumos de energía sólo se necesita una vez al mes, las actuaciones necesarias para corregir una perturbación de la tensión (tensión fuera de límites) deben realizarse en pocos segundos. En cualquier caso, una vez instalado un sistema de automatización en distribución, éste debe permanecer activo en todo momento.

Además de las funciones propias de la operación y control del sistema, se incluyen en la automatización de la distribución todas aquellas mejoras que su implantación podría generar en otros aspectos, como por ejemplo en la planificación de la red.

Varios son los problemas asociados a la implantación de un sistema AD, de los que se destacan:

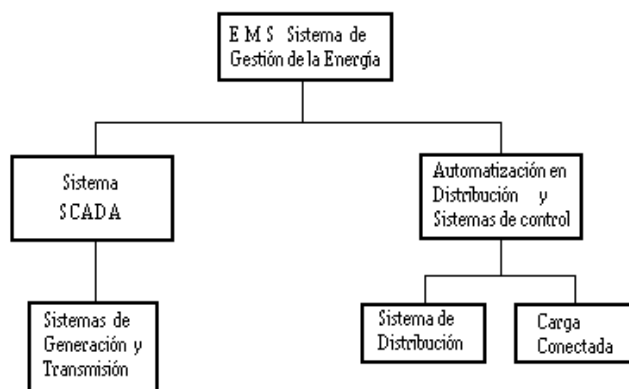
- Encontrar una forma confiable y económica de comunicar unos elementos con otros.
- Tener capacidad para manejar en forma eficiente el gran volumen de datos necesarios. Desarrollar equipos específicos nuevos.
- Desarrollar el **entorno informático adecuado** (algoritmos, comunicación hombre máquina, etc.).
- Definir los elementos que formarán el sistema (centros de control, unidades remotas, etc. ) [19,8,9].

El propósito principal de un sistema de potencia, es de generar, transmitir y distribuir energía eléctrica eficientemente. Las operaciones se ven influenciadas por la geografía dispersa y la funcionalidad del sistema como muestra la figura 2.3. El sistema de dirección de energía (Energy Management System EMS) ejerce control total sobre todo el sistema.

El sistema supervisor y de adquisición de datos (Supervisory Control and Data Acquisition SCADA) involucra a los sistemas de generación y transmisión. El sistema AD vigila al sistema de distribución, incluyendo la carga conectada. El monitor automático y control de características forman parte del sistema SCADA.

Los objetivos de la AD son:

- mejorar la eficiencia del sistema en el uso de capital y energía.
- reducir los requerimientos de reserva en transmisión y generación.
- incrementar la integridad de servicio a las cargas esenciales.



**Figura 2.3** Monitoreo y control en sistemas eléctricos de potencia

Los avances en la tecnología digital, hicieron realidad la automatización en distribución. Recientemente las minicomputadoras, que son de bajo costo, y los microprocesadores han provisto a los ingenieros de sistemas de distribución con nuevas herramientas, para hacer de la automatización en distribución un concepto realizable y factible.

En el futuro los sistemas de distribución serán más complejos que hoy en día. Si los sistemas están siendo desarrollados para ser óptimos con respecto al costo de construcción, capitalización, eficiencia de operación, se requieren por lo tanto de herramientas de automatización y control. El término "automatización en distribución", tiene un extenso significado y aplicaciones adicionales que se incrementan día a día. Para algunos significa un sistema de comunicaciones en el nivel de distribución que puede controlar la carga del usuario y puede reducir la generación de carga a través del sistema de control de carga. Para otros la automatización puede significar un no-atendimiento de la subestación de distribución (en forma manual), la cual puede ser controlada por un microprocesador localizado en la subestación misma, puede continuamente monitorear el sistema, tomar decisiones, emitir comandos y reportar cualquier cambio en el "status" del centro de despacho de distribución, almacenarlos para su posterior uso, o desecharlos, dependiendo de la necesidad de dichos datos [8,19].

## **2.6 Clasificación de Funciones de la Automatización**

Las funciones de AD se pueden clasificar de acuerdo con diferentes criterios como por ejemplo, grados de centralización, niveles, ámbito de acción, etc. A continuación se comentan las clasificaciones más comunes en la literatura y se propone una clasificación por objetivos, agrupando las funciones de automatización según el efecto principal que se intenta conseguir [9].

### 2.6.1 Clasificación por Niveles

Usualmente se clasifican las funciones propias de la AD según el elemento sobre el que actúan, agrupándola en tres niveles: subestación, alimentador, usuario [19,29]. La tabla II.1 muestra una de estas clasificaciones. Este tipo de clasificación parece derivarse de forma natural de la estructura típicamente radial de las redes de distribución. No obstante, las acciones necesarias para conseguir alguna mejora en el funcionamiento de la red (reducir pérdidas por ejemplo) pueden afectar a elementos de estos tres niveles. De la misma manera, los datos necesarios pueden proceder de los tres niveles, por lo que esta división no parece adecuada para una clasificación de funciones de la automatización sino más bien para una enumeración de los equipos necesarios [19].

**Tabla II.1** Clasificación por niveles de funciones de automatización [19,9,14]

<b>Funciones de automatización de distribución</b> Sistema de Investigación de la AD		
<b>Subestaciones</b>	<b>Alimentadores</b>	<b>Abonados</b>
Regulación Conexión / desconexión de alimentadores Control de reenganches Control de condensadores Supervisión de: nivel de tensión, intensidad de corriente, temperatura, humedad, etc.	Control de reactivos Supervisión de cargas Control de interruptores Supervisión general	Medida remota : consumos, duraciones, etc. Detección de fraudes Gestión de cargas Conexión / desconexión total

Otra clasificación, agrupa las actividades atendiendo a tres capacidades de gestión del sistema de AD: control, monitoreo y protección. La tabla II.2 muestra esta clasificación [9,33].

**Tabla II.2** Clasificación de actividades de AD según su ámbito de acción

FUNCIÓN	ÁREA				
	Inform.	Fiabilidad	Eficiencia	Tensión	Cargas
<b>CONTROL AUTOMÁTICO</b>					
Aislamiento de nudos	X	X	X		
Maniobras en alimentador.	X	X			
Voltaje/reactivos	X		X	X	
Equilibrado de índices de carga en transfor.	X		X		
<b>CONTROL MANUAL</b>					
Interface con SCADA	X	X	X	X	X
<b>ADQUISICIÓN Y PROCESO DE DATOS</b>					
Almacenamiento de datos analógicos	X				
Monitoreo	X				
Obtención	X				
<b>INTERFACE</b>					
Comunicaciones	X				
<b>PROTECCIÓN</b>					
Reconexión	X	X			
Detección	X	X			
Sobrecargas	X	X			
Protección del transformador	X	X			
Curva de disparo	X	X			
Desviación de frecuencia	X	X			
<b>GESTIÓN DE CARGAS</b>					
Control de carga	X				X
Conexión/desconexión	X				X
Comandos	X				X
<b>MEDIDA REMOTA</b>					
Supervisión de cargas	X				X
Demanda punta	X				X
Lectura de consumos	X				
Programación de contad.	X				X
Detección de fraudes	X				X

No obstante, parece más conveniente realizar una clasificación atendiendo al efecto que se pretende conseguir con estas funciones, ya que ello permitirá evaluarlas en forma más efectiva. A continuación se dará una visión de esta nueva clasificación [9].

### **2.6.2 Clasificación por Objetivos**

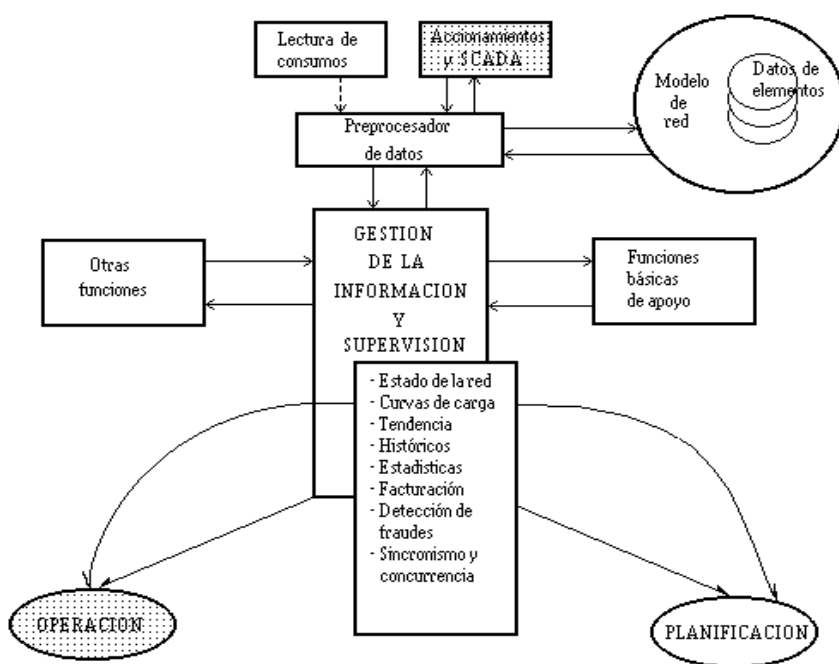
Dos tipos de actividades pueden distinguirse en el funcionamiento de las empresas eléctricas, las que atienden a la utilización de los recursos existentes para conseguir el funcionamiento correcto de la red día a día (operación) y aquellas otras que se encargan de suministrar los elementos necesarios para atender las nuevas necesidades que van surgiendo (planificación).

No obstante esta división, tradicionalmente muy establecida, ambas actividades necesitan intercambiar datos con frecuencia para lograr el desarrollo óptimo de la empresa. Por una parte los responsables de la explotación deben intentar aprovechar al máximo los recursos actuales, pero precisamente en esta actividad será donde se detectarán las deficiencias existentes que deben ser tomadas en cuenta a la hora de planificar el crecimiento de la red. Por otra parte, el conocimiento de planes previstos puede evitar redundancia de actuaciones en ocasiones (por ejemplo sustitución de un elemento averiado por otro que pocos días después será sustituido por un tercero en virtud de un plan de ejecución) [9,8].



La **gestión de la información** que un sistema automatizado de distribución puede realizar sirve de base tanto al responsable de la operación como de la planificación, pudiendo, además, servir de nexo entre ambas actividades. La figura 2.4 muestra esta función esquemáticamente con las tareas que puede incluir.

Un objetivo importante dentro de la operación de la red lo constituye la utilización óptima de los recursos disponibles desde el punto de vista del rendimiento económico, lo que se denominará **gestión de eficiencia**. La AD puede ayudar a conseguir un funcionamiento más eficiente de la red.



**Figura 2.4** Gestión de la información en AD [9]

El problema de esta utilización eficiente de recursos se puede plantear de la siguiente forma: suministrar el máximo de energía posible a los usuarios a partir de los elementos existentes (con las restricciones normales de utilización). También cabe hacer otro planteamiento basado en la minimización de una función de costo: suministrar la energía demandada con el mínimo costo en el sistema. Ambos son básicamente equivalentes, aunque el primero puede resultar más adecuado en la planificación (Least Cost Planning) [31,9] y el segundo en la operación de la red. No obstante, deben contemplarse conjuntamente.

En cualquier caso, el problema está sujeto a restricciones: mantener los niveles de tensión en los límites adecuados, no sobrecargar ningún elemento o la misma disponibilidad de equipos dentro de la red.

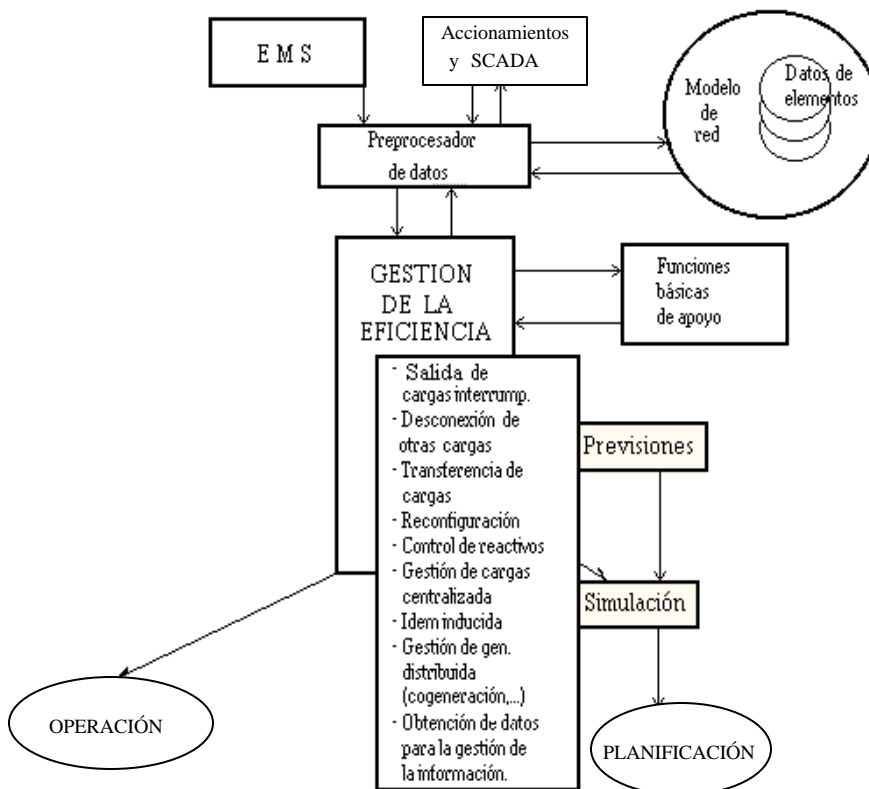
Con el control o gestión de la eficiencia se persigue que en todo momento la explotación del sistema se realice con el mejor rendimiento posible. Para que este control pudiera realizarse de forma realmente efectiva siguiendo las variaciones de la carga, etc. sería necesario disponer de un SCADA muy completo así como abundantes elementos de maniobra con control remoto. Caso contrario, sólo puede aspirarse a un control eficiente según valores medios de la carga o valores estimados. La utilización de modelos de cargas es de gran utilidad en la operación ya que normalmente no se dispone de medidas en tiempo real en todos los puntos de consumo de la red.

La utilización de esta función en simulación con valores previstos de cargas y otras condiciones resultaría de utilidad en las tareas de planificación de la red para poder comparar alternativas o evaluar el efecto de las acciones previstas.

Realmente esto es algo habitual en el funcionamiento de las empresas eléctricas.

La principal ventaja de la AD en este aspecto procede del hecho de disponer con facilidad de los datos necesarios junto con la potencia de las herramientas de cálculo que se implementen, permita dar a estas tareas de planificación. Con los resultados de las simulaciones, se tienen parámetros de referencia del futuro funcionamiento del sistema.

La mejora de las características del funcionamiento de la red desde el punto de vista económico (mínimas pérdidas por ejemplo) no es el único criterio que influye en la operación y planificación sino que, en general, cuestiones relativas a la seguridad del suministro o a la calidad del servicio influyen, de manera importante y en ocasiones son determinantes de las acciones que se emprenden, por encima de las cuestiones de eficiencia (Integrated Value-Based-Planning) [31,9,8].



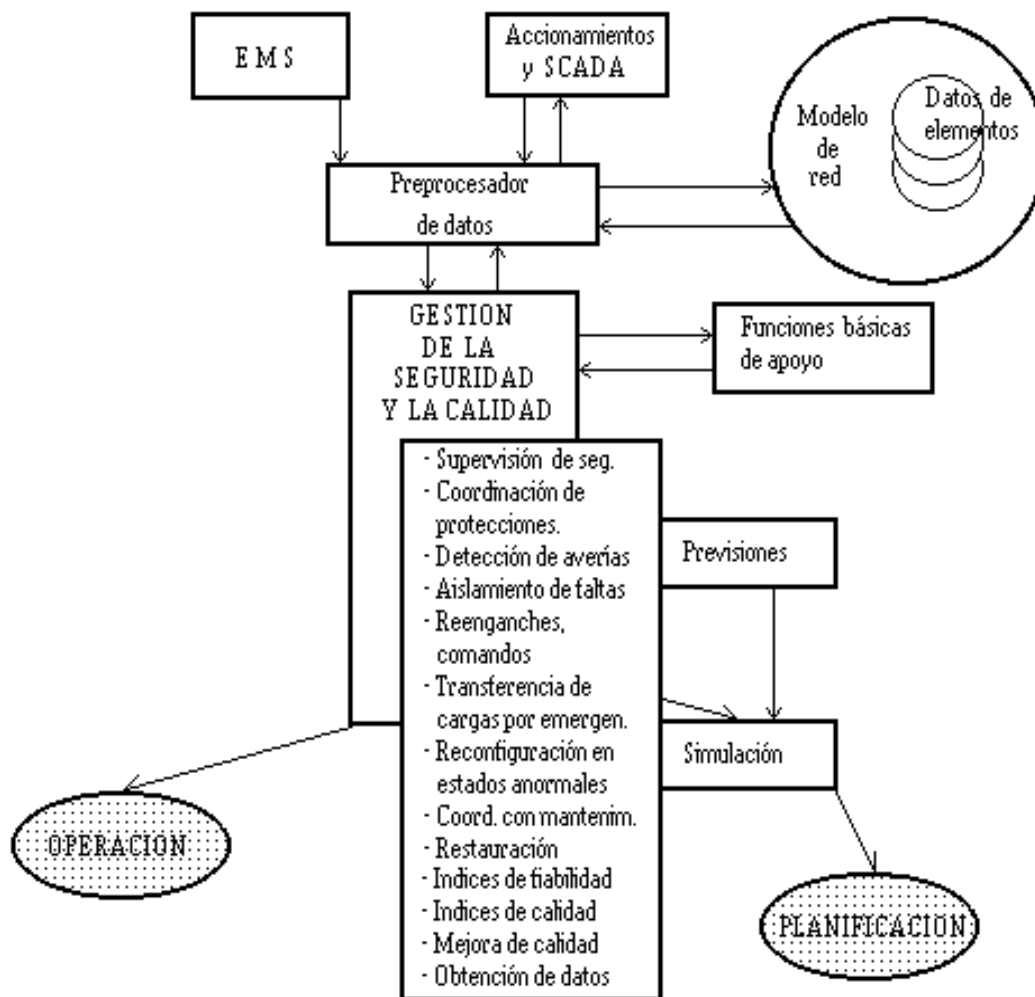
**Figura 2.5** Gestión de la eficiencia [9].

El concepto de seguridad en distribución es distinto al de transporte, ya que al ser la estructura de funcionamiento típicamente radial, la red está siempre en estado crítico, un fallo en cualquier elemento deja sin servicio a un conjunto de usuarios. Puede ser conveniente la introducción de nuevos conceptos relativos a la seguridad en distribución. Actualmente la seguridad de la red de distribución se mide con ciertos índices de confiabilidad, atendiendo a las tasas de fallas de los elementos y a los efectos que tales fallas producen sobre los usuarios (duración y frecuencia de las averías).

Junto con estos índices de seguridad y generalmente muy relacionados con ellos, se analizan otros aspectos que, en conjunto, reciben el nombre de calidad del servicio. Estos aspectos son los relacionados con todo tipo de perturbaciones en el suministro de la energía: micro cortes, sobretensiones, deformaciones en la onda de tensión, niveles de tensión fuera de límites y perturbaciones en la frecuencia.

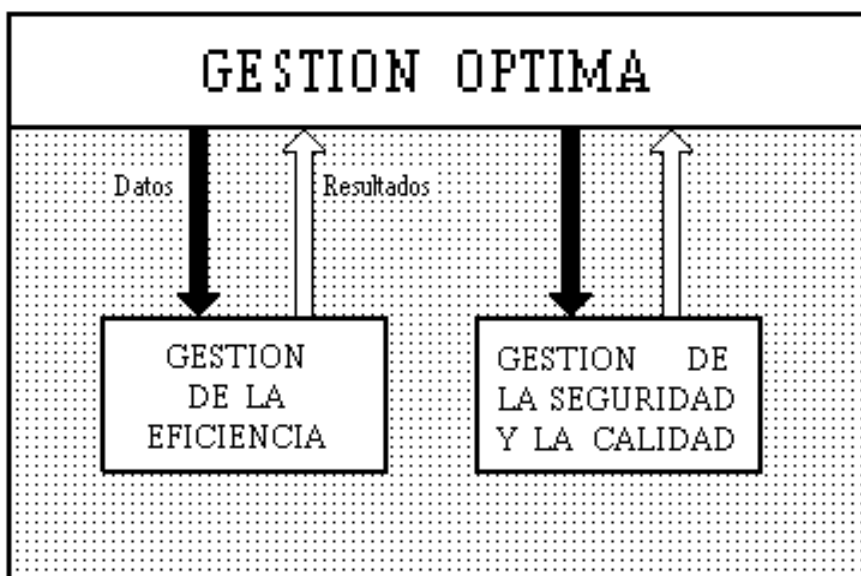
Otro objetivo importante de la empresa eléctrica en la actualidad es la mejora de estos aspectos citados. Se clasificarán bajo una función de **gestión de la seguridad y la calidad**, todas aquellas acciones que, en el entorno de la AD, se relacionan con la medida de estos conceptos (índices de confiabilidad por ejemplo) y con las acciones de control tendientes a mejorar estos aspectos en la operación de la red.

La capacidad de predicción de estos índices puede ser utilizada en un entorno de simulación como ayuda en la planificación de la red así como en la operación de la misma, como guía de acciones a tomar. Esta función de gestión de la seguridad y calidad guardan gran relación con la gestión de la eficiencia, por lo que se considera necesario la introducción de una macro función que podría llamarse **gestión óptima** que sirva de contexto global en el que se desarrollarían las dos funciones citadas. Dado que la gestión óptima, incluye varios objetivos simultáneos, que no siempre resulta fácilmente cuantificables en las mismas medidas, ésta puede verse como una función multiobjetivo y por lo tanto son de aplicación técnicas de optimización multiobjetivo [30]. También los criterios de optimización basados en la experiencia pueden ser de gran interés.



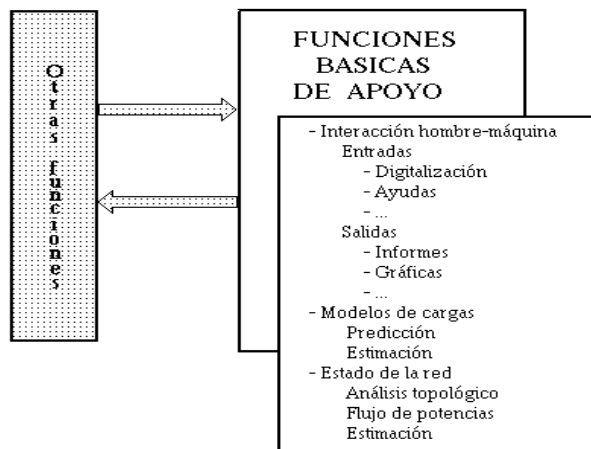
**Figura 2.6** Gestión de la seguridad y la calidad [9]

La figura 2.6 representa esquemáticamente la función de la gestión de la seguridad y la calidad y la 2.7 su relación con la gestión de la eficiencia en el entorno de la gestión óptima.

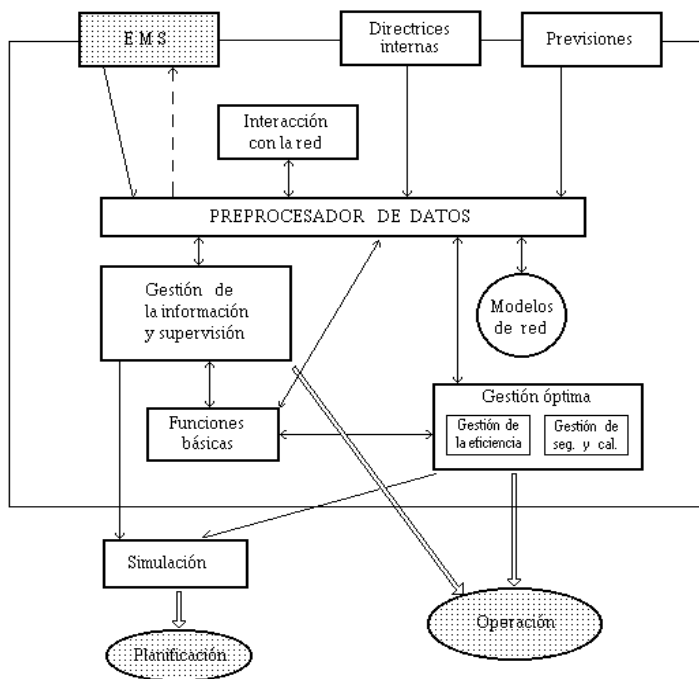


**Figura 2.7** Gestión óptima

Todas las funciones que se han comentado requieren, para su desarrollo, la utilización de herramientas de cálculo, de interacción con otras partes, etc., que se han agrupado bajo el nombre de funciones básicas de apoyo. La existencia de este conjunto de herramientas, que permitan realizar cálculos de forma más precisa, más rápida y más sencilla para el operador es en sí un objetivo más del sistema de AD. La figura 2.8 refleja el contenido de este grupo de tareas auxiliares de las funciones de gestión. La figura 2.9 resume el conjunto de funciones que se han presentado y las relaciones entre ellas, constituyendo en conjunto una visión general de la organización lógica en la implementación de un sistema AD. Se indica a trazos la aplicación marginal del sistema a planificación [9,10,19,31].



**Figura 2.8** Funciones básicas de apoyo [9]



**Figura 2.9** Organización de funciones para AD [9]



Existe una área de interés adicional para la existencia del sistema AD, constituida por la formación de personal para puestos técnicos dentro de la empresa. Las facilidades que la simulación de la red ofrecen a estos técnicos, les permiten obtener experiencia ensayando acciones de control u otras maniobras sobre redes simuladas, para posteriormente hacerse cargo de la operación real.

## **2.7 Sistemas de Comunicaciones**

Los sistemas de comunicación usados, o factibles de serlo, en AD [8,9,14,19,20] pueden clasificarse de la siguiente forma según el medio que utilizan:

### a) red de potencia

- Portadora( Carrier )
- Trenes de ondas ( Ripple)
- Otros ( Deformación de paso por cero por ejemplo )

### b) cable de comunicaciones

- Por línea telefónica
- Por cable de TV
- Por fibra óptica

- c) radio
  - AM-FM o similares
  - VHF/UHF
  - Satélite
  - Microondas

## **2.8 Control en Sistemas Automatizados**

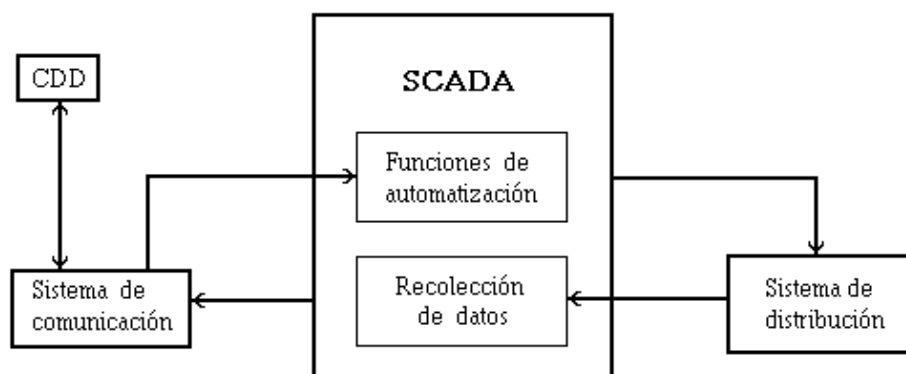
Durante la operación normal de la red es necesario tomar decisiones a corto y mediano plazo con objeto de mejorar sus características de funcionamiento (reducir pérdidas por ejemplo). El disponer de herramientas de análisis rápidas (software adecuado) es esencial para facilitar la labor al encargado de esta operación. También el encargado de planificación se ve sujeto a la toma de decisiones a medio o corto plazo, que involucran aspectos de operación eficiente de la red [8,9,10].

La función básica de la red eléctrica es suministrar energía allá donde se necesite, con ciertas restricciones en cuanto a la forma en que ese suministro debe realizarse.

En el desarrollo de esta función es necesario tomar decisiones diariamente en acciones que presentan varias alternativas.

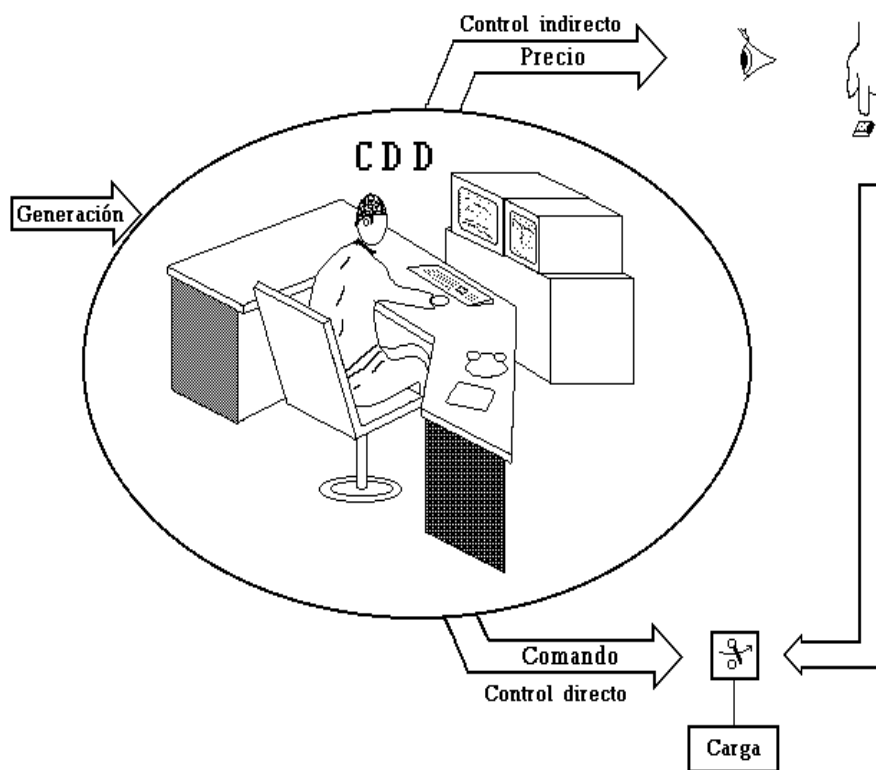
También en planificación se presentan con frecuencia problemas de decisión entre varias opciones. Los resultados de las decisiones que se adopten conducirán a distintos estados de operación de la red, en cualquiera de los cuales se podrá seguir cumpliendo la función citada arriba, pero que representará, sin embargo, diferentes costos de operación [40].

Es conveniente, poder cuantificar la eficiencia de la operación y disponer de herramientas rápidas que permitan tomar decisiones orientadas a un mejor aprovechamiento de los recursos. La eficiencia en la operación de la distribución se entenderá como el mejor aprovechamiento de los recursos disponibles para conseguir costos menores (reducir pérdidas, aplazar inversiones, etc.) o aumentar las prestaciones (energía útil suministrada, número de usuarios atendidos, etc.) manteniendo la red en un estado de operación admisible. El control de un sistema de distribución se presenta en la figura 4.8. En el computador de Centro de Despacho de Distribución(CDD), se realiza lo siguiente: comandos de control, recolección de datos, y manejo de base de datos.



**Figura 2.10** Control en un sistema automatizado

El sistema SCADA se encarga de recolectar todos los datos y de almacenar la información. El programa estado toma los datos necesarios, calcula el estado del sistema y muestra los resultados. El cálculo de estado se apoya en un software especializado. En el CDD, después de analizar el proceso, se toman las decisiones, que son enviadas como señales de control al sistema SCADA, para luego ser llevadas a efecto por los dispositivos que correspondan.



**Figura 2.11** Acciones en el CDD

La figura 2.11 explica las acciones a tomar desde el centro de despacho de distribución [8].

## **2.9 Flujo de Potencia en Sistemas de Distribución**

En un sistema de distribución eléctrica, el flujo de potencia es de gran importancia; el problema de flujo de potencia, consiste en síntesis en calcular las magnitudes de tensión y sus ángulos de fase en los nodos de un sistema, así como los flujos de potencia activa y reactiva en las líneas. Teniendo una condición específica de carga, se debe tener en cuenta cuáles son las cargas y transformadores (indicando de que tipo de consumo se está tratando) , además del nivel de tensión en el sistema.

En un sistema de distribución eléctrica parecería que el enfoque directo sería utilizar cualquiera de los métodos de análisis convencional de nodos o mallas (alta dispersidad) para calcular las intensidades de corriente o tensiones, pero este procedimiento sería poco práctico, debido al alto consumo de tiempo y memoria de CPU [11,27].

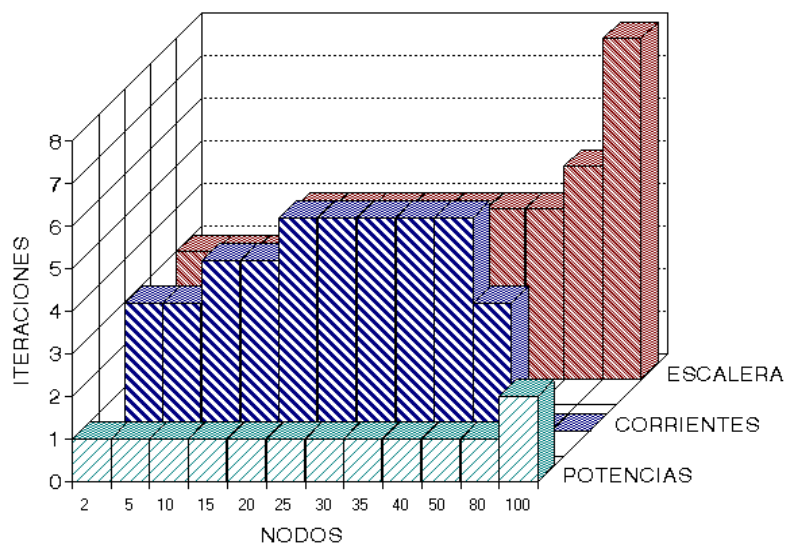
El problema del flujo de potencia implica principalmente el cálculo de flujo de potencia sobre las líneas de distribución del sistema; es decir calcular la cantidad de Watts y Vars que circulan, incluyendo también las pérdidas en el sistema, lo cual implica un cálculo de las tensiones y corrientes.

En los sistemas de distribución se aprovecha la topología radial, y es en base a estos métodos que se han desarrollado métodos como: el método escalera, método de suma de corrientes, y método de suma de potencias.

Estos métodos aplicados a sistemas de distribución, muestran mejores características de convergencia (rapidez y confiabilidad) que los tradicionales[11,27].

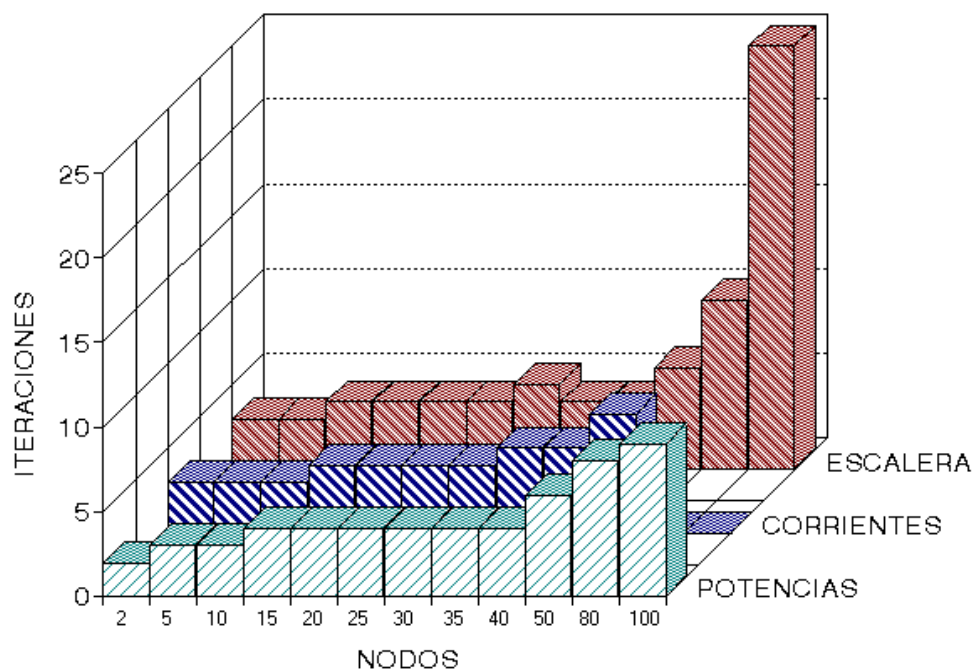
## 2.10 Comparación de los Métodos

Se presentan a continuación los resultados comparativos de simulaciones efectuadas con FLUDIS(anexo B); a fin de evaluar cual de los métodos descritos en [11] y [27] es más rápido en converger. Los modelos de consumos son los propuestos en [34].



**Figura 2.12** Comparación de los métodos: consumos independientes de la tensión

Al observar la figura 2.12, con las potencias P y Q constantes, el método suma de potencias es el más efectivo y rápido. Este procedimiento consume poco tiempo en CPU, poca memoria RAM y ROM. En segundo lugar se ubica el método escalera, pero este necesita de mayor número de iteraciones, es lento y necesita un poco más de memoria RAM, la extensión del programa es similar al anterior. El método suma de corrientes, resulta ser el más lento de todos y consume mucha memoria. Se aprecia, también que el factor de carga tiene repercusión en el número de iteraciones, pues a medida que se acerca a la unidad, se incrementa dicho número.



**Figura 2.13** Comparación de los métodos: consumos dependientes de la tensión.

Cuando se realiza las simulaciones correspondientes teniendo involucrado las ventanas de carga, los métodos se comportan de similar modo hasta la cantidad de 50 nodos, pero a partir de él comienzan a aparecer sustanciales diferencias en el número de iteraciones. Por ejemplo, de la figura 2.13, al analizar un sistema de 100 nodos el método escalera lo resuelve en 25 iteraciones, el método suma de potencias en 8, mientras que el método suma de corrientes fracasa, pues la memoria RAM es insuficiente. Cabe mencionar que las simulaciones fueron realizadas utilizando la memoria small (caso pesimista en lenguaje C).

Por lo dicho anteriormente, se concluye que el método Suma de Potencias es el mejor de los evaluados para la solución de flujos de potencia en sistemas de distribución eléctrica.

## **2.11 El Problema de la Compensación Capacitiva**

El problema de la ubicación general de condensadores consiste en determinar la localización, tipo y el tamaño de los condensadores para ser instalados en los nodos de un sistema de distribución, como también los beneficios económicos debido a la potencia máxima y reducción de las pérdidas de energía para ser contrastados con el costo de instalación de tales condensadores, manteniendo el perfil de tensión del sistema dentro de los límites definidos.



El problema de la ubicación óptima de condensadores, tiene muchos parámetros, como son: localización, tipo y costo de condensadores, restricciones del nivel tensión y variaciones de carga en el sistema. Estos parámetros determinan la complejidad del problema.

El problema del tamaño del condensador, es un caso especial del problema general de ubicación de condensadores. El problema es determinar el tamaño óptimo de condensadores ubicados en los nodos de un sistema de distribución radial.

Al dar solución a tales problemas las pérdidas de potencia real serán minimizados [35,36].

El paquete desarrollado permite determinar en forma eficiente la localización, dimensionamiento y el control en el tiempo de bancos de condensadores y transformadores con control de derivaciones bajo carga en líneas de distribución, de tal forma que se maximicen las utilidades económicas derivadas de un ahorro en las pérdidas de energía [37,38,39,40].

### **III. INTERFACE INTERACTIVO INTUITIVO GRÁFICO EN SDDE**

#### **3.1 Introducción**

En la presente sección, se describe lo que es una interfaz interactiva, intuitiva, gráfica y su aplicación a los SDDE. Las ventajas de los gráficos frente a los listados numéricos, es incuestionable.

Se dice que "una figura vale mil palabras", pero en computación "una imagen equivale a 1024 palabras". Tradicionalmente los ingenieros han explotado la comunicación visual para transmitir sus ideas más eficientemente y efectivamente. Las figuras usadas en el pasado eran hechas por dibujantes o algunas veces por softwares de dibujo.

El programa desarrollado tiene la ventaja de hacer el dibujo de la red, además de hacer un análisis gráfico de los resultados, todo ello trabajando en conjunto, sin necesidad de recurrir a un paquete especializado de dibujo y menos aún a una hoja electrónica.

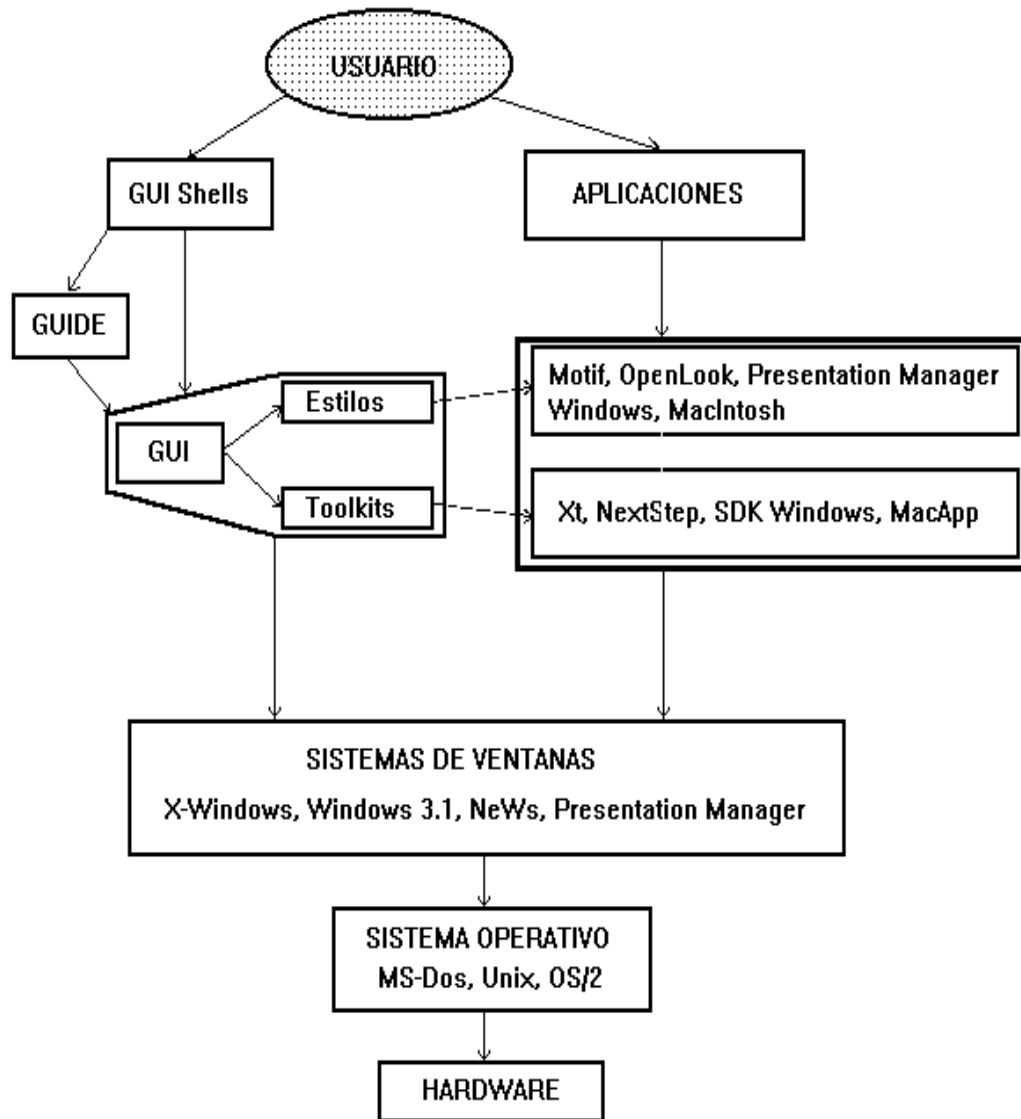
#### **3.2 Gráficos Interactivos e Intuitivos**

El concepto de "Gráficos Interactivos" se originó en Xerox Palo Alto Research Center en los 70's y fue popularizado por Apple Macintosh, con su interfaz de usuario en 1983, así como por MS-Windows 3.0(1990) [5,44].

La aplicación a la ingeniería eléctrica es atractiva, por la fácil representación de una red a través de iconos, que pueden ser representados rápida y fácilmente, identificando elementos y conexiones.

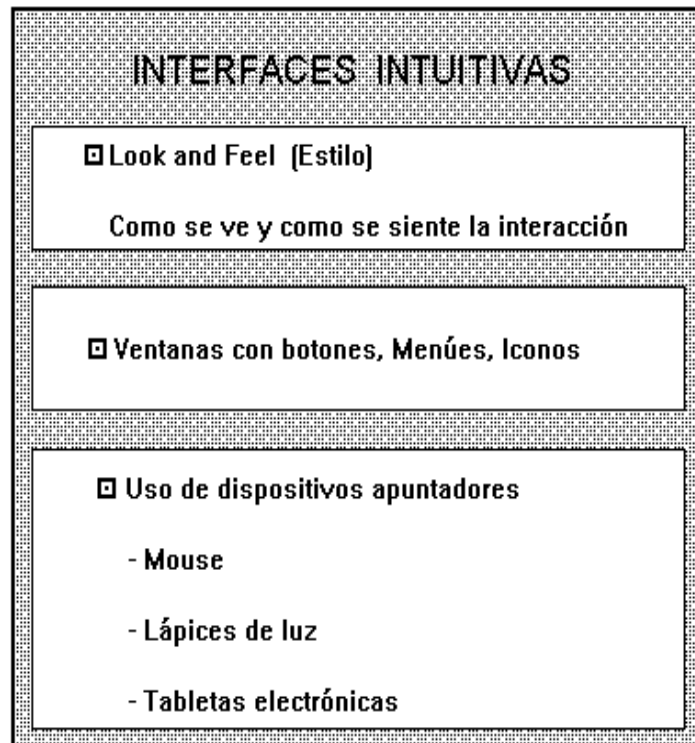
Estudios en factores humanos en la interacción del hombre con el computador demostraron que la aplicación de conceptos como GUI (Graphical User Interface), GUIDE (GUI Developing Environment), API (Application Programming Interface), se adaptan fácilmente al usuario, si los comandos y retroalimentaciones pueden entenderse en el contexto de las experiencias humanas análogas. Esto se refiere a como el usuario entiende el modelo. Efectivamente, para que un GUI sea efectivo, el icono en la pantalla debe representar algo que el usuario realmente interprete.

El estado del sistema debe ser reflejado en imágenes y los efectos de los comandos deben entenderse en términos de impactos visuales.



**Figura 3.1** Estructura jerárquica

Es importante que la interfaz desarrollada, sea intuitiva, y cuente con botones, menús e iconos, los cuales son fáciles de interpretar y utilizar [44].

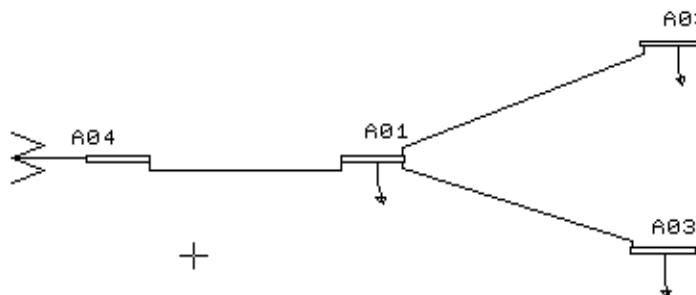


**Figura 3.2** Interfaces intuitivas

El desarrollo de interfaces gráficas para el análisis de SDDE, pasa necesariamente por la utilización de dibujos de la red y el análisis gráfico de los resultados. El diagrama unifilar es la obvia elección para el modelo usuario-concepto, en el análisis de los SDDE, puesto que los ingenieros están acostumbrados a visualizar este tipo de sistemas en esa forma [5,3,21].

La siguiente figura ilustra el tipo de diagrama elegido en el presente trabajo.

=====  
 ===== DIBUJO Y MODIFICACION DE UNA RED =====  
 Presione 'H' si necesita ayuda.



**Figura 3.3** Ejemplo de un sistema real de distribución

El diagrama unifilar representa bien la topología de la red para el ingeniero de potencia y es un valioso avance frente a programas en que sólo se tiene un simple archivo de entrada, y se tiene que recurrir a un esquema mental, o sino a la ayuda del lápiz y papel [5]. En un diagrama unifilar se puede identificar rápidamente, cuan cargado está un determinado nodo-subestación, así como los parámetros de la red.

### 3.3 AIDPRI

Se reporta el desarrollo de un paquete de software interactivo, intuitivo y gráfico para computadores personales, que está formulado como una herramienta para el planeamiento, diseño y estudios de operación de sistemas eléctricos de distribución, software al que se ha denominado **AIDPRI** ( Análisis Interactivo Intuitivo de Distribución Primaria ).

AIDPRI está estructurado en forma modular, incluyendo las siguientes funciones:

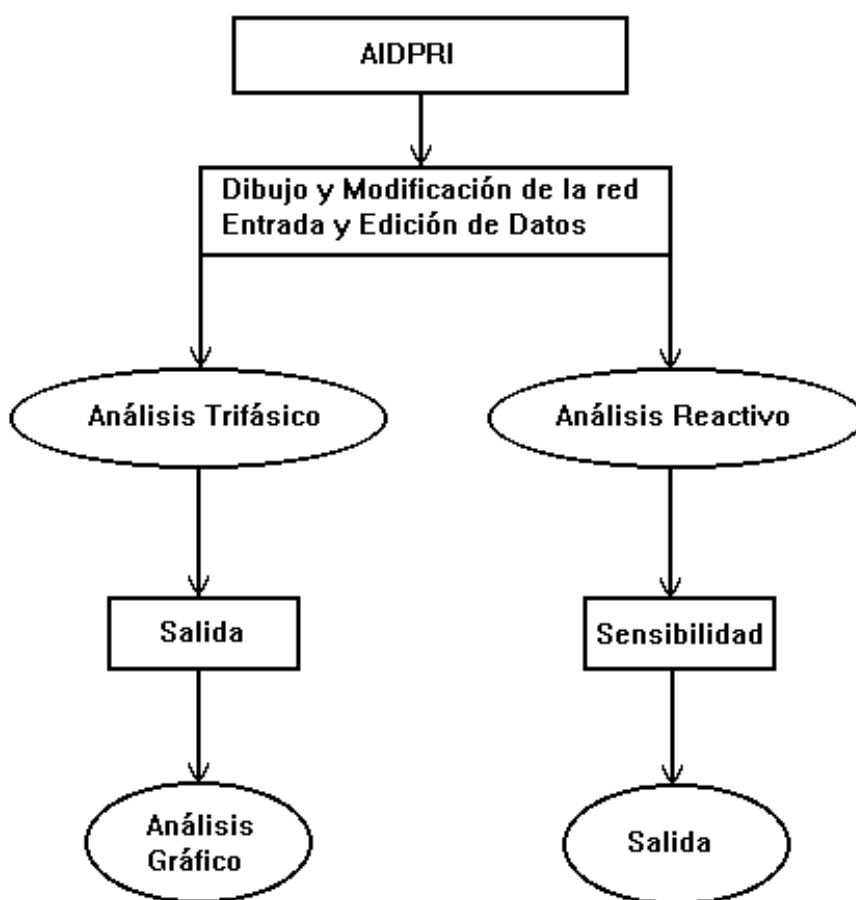
- dibujo de la red,
- entrada y edición de datos,
- almacenamiento y recuperación de archivos,
- análisis de flujo de potencia trifásico y
- análisis de reactivos(ubicación y tamaño de condensadores).

El paquete integra módulos de software en lenguajes C, Fortran, Pascal y Assembler. Se continuó con los desarrollos de diversos autores [21,14,15].

Aprovecha las bondades que cada compilador ofrece en términos de rapidéz y precisión en el tratamiento de números, tratamiento de gráficos, interrupciones al sistema operativo. Esto es importante en el estudio de redes de gran tamaño.

Se basó los desarrollos en una configuración mínima de hardware: computador P.C. compatible 80386 con un mínimo de 2 Mb de memoria, un monitor SVGA, disco duro, coprocesador matemático, mouse, sistema operativo MS DOS 6.0 o superior.

Los objetivos del paquete son: realizar fácilmente simulaciones gráficas, que permitan a los ingenieros decidir que hacer, y ver "que pasa si...?", en sistemas portátiles y con un ambiente gráfico agradable. Es decir no se requiere de estaciones de trabajo.



**Figura 3.4** Estructura de AIDPRI



### 3.4 Estructura Funcional del Programa

El paquete integra tres programas modulares:

**AIDPRI:** Encargado del dibujo y modificación de las redes de distribución, entrada de datos, edición de los mismos, determinación de la topología, conexiones, verifica que estén los datos completos, así como el almacenamiento y recuperación de redes en estudio [21].

**FASETA:** Sistema computacional encargado de realizar el flujo de potencia trifásico, aplicar los consumos dependientes de V y F, y modelar adecuadamente los elementos de la red, por ejemplo líneas y transformadores. Permite un análisis gráfico de los resultados [14].

**VOLPOT:** Determina en forma eficiente la localización, dimensionamiento y el control en el tiempo de bancos de condensadores y transformadores con control de derivaciones bajo carga, de tal forma que se maximicen las utilidades económicas derivadas de un ahorro en las pérdidas de energía y de potencia punta [15].

En estos programas se hace uso del procedimiento interactivo, intuitivo y gráfico, lo que facilita la labor del ingeniero.

Los requerimientos de memoria para los programas ejecutables son:

**Tabla III.1** Requerimientos de memoria

<b>Archivo</b>	<b>Memoria(bytes)</b>
AIDPRI	213 092
FASETA	162 928
VOLPOT	89 776
<b>Total</b>	<b>465 796</b>

### **3.5**      **Diseño de AIDPRI**

El paquete se desarrolló bajo los siguientes principios:

Facilidad de uso para los ingenieros, quienes no necesariamente conozcan técnicas de análisis de SDDE. La secuencia de operaciones debe ser natural y obvia.

El programa debe ser modular, de fácil mantenimiento y desarrollo; utilizar en lo posible técnicas de programación orientada al objeto (POO).

Los algoritmos empleados deben ser especializados para sistemas de distribución, a fin de minimizar los tiempos de CPU.

### **3.6 Diálogo Interactivo**

Los métodos de control usados en el proceso son:

El usuario interactúa a través del mouse; si se desea dar una respuesta verdadera, simplemente acciona el botón izquierdo del ratón, y si es falsa el botón derecho.

Selección de la opción, de la caja de menús, apuntando y presionando el botón correspondiente.

Para la construcción de la red, se hace necesario el uso de códigos nemotécnicos, caso contrario, se puede desplegar la ayuda con los símbolos correspondientes.

## **IV. EL PROGRAMA AIDPRI**

### **4.1 Introducción**

Cuando los datos son representados como gráficos, en contraposición a los datos en tablas, estos son mucho más fáciles de interpretar. Por tanto los paquetes interactivos gráficos para SDDE proveen a los ingenieros de una **herramienta de punta**[3].

Las redes de distribución de electricidad incluyen gran número de componentes de línea y puntos de consumo, lo cual trae consigo excesivo trabajo al ingeniero de diseño. En este capítulo se presenta un paquete computacional que administra la información y sirve para el diseño y estudio de las redes de distribución [1,3].

### **4.2 Descripción del Paquete**

Los programas analíticos y gráficos están en forma de módulos. La parte gráfica consta de iconos que representan a la red de acuerdo a la norma chilena oficial 712.of72 [42] y la representan en un diagrama unifilar.

La parte analítica consta de un flujo de potencia trifásico desarrollado en base al algoritmo suma de potencias [14,27], y de un algoritmo de control de tensiones y potencia reactiva [15,37].

El concepto de interface vía menús es utilizado para ayudar al diseño del GUI en el presente paquete. La figura 4.1 muestra el menú principal del paquete, mostrando las diferentes opciones.

Seleccione uno, con el boton izquierdo del raton...

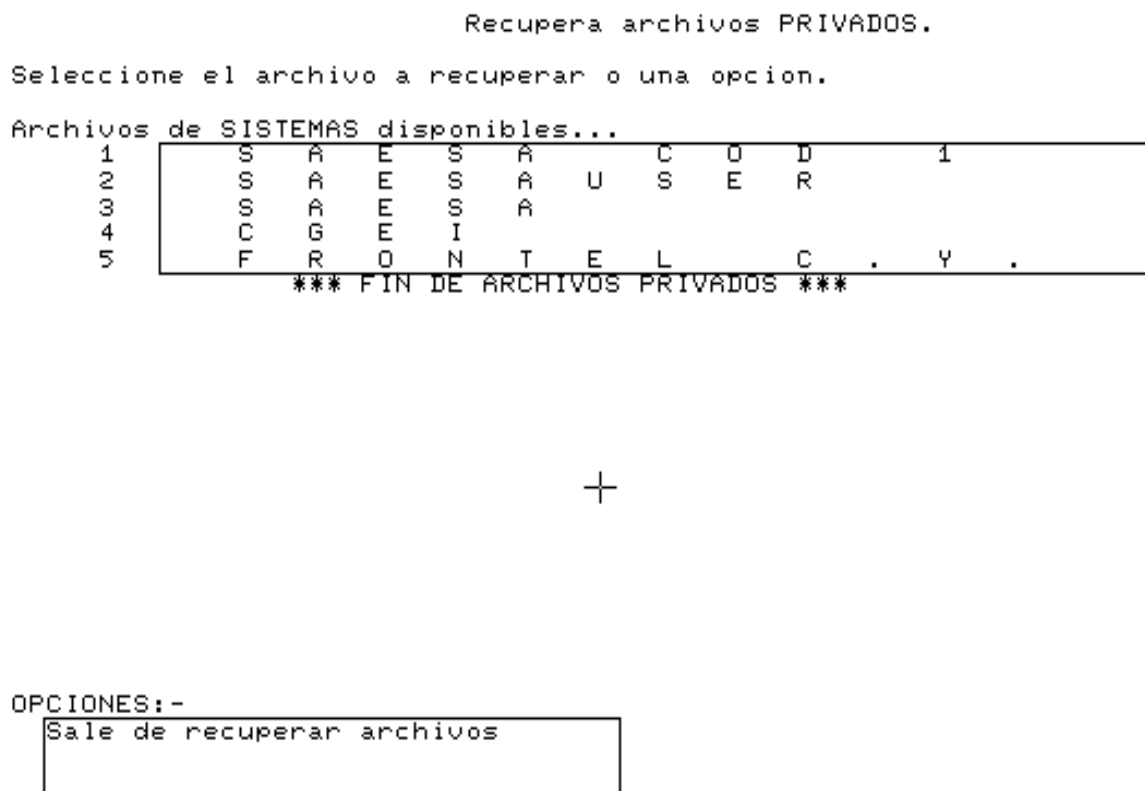
```
Construir nuevo sistema
Recuperar sistema de archivo
Grabar el presente sistema
Modificar el presente diagrama
Editar datos de la red presente
Análisis trifasico
Análisis reactivo
Salir del programa
```

+

**Figura 4.1** Menú principal de AIDPRI

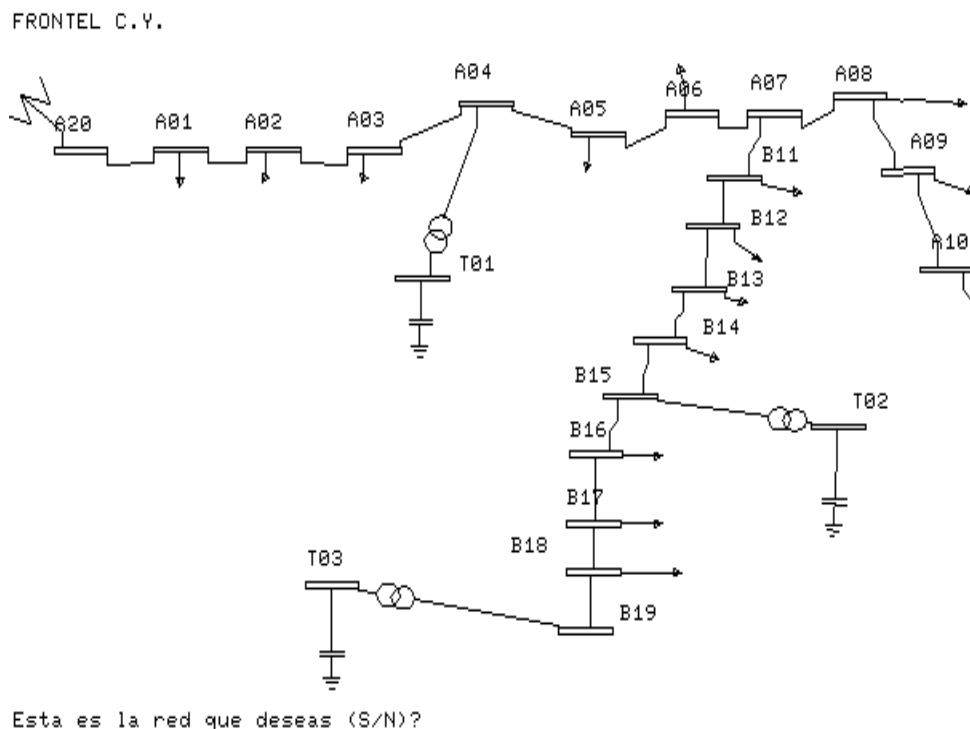
### **4.3 Recuperar Sistema de Archivo**

El paquete cuenta con una opción de guardar las redes en estudio; ya sea como documento de acceso público o privado. Además de la representación topológica de la red, incluidas las denominaciones de barras y elementos, se almacenan los parámetros de los elementos eléctricos.



**Figura 4.2** Recupera archivos privados

Para recuperar una red de distribución, se presenta primero la opción de que base de datos desea (pública o privada), y luego basta seleccionar un sistema con el puntero del ratón y presionar el botón izquierdo, tal como lo muestra la figura 4.2. Una vez seleccionado la red, esta se puede visualizar.



**Figura 4.3** Red Frontel Cholguan-Yungay

#### 4.4 Dibujo y Modificación de la Red

El trazado y modificación de un sistema de distribución, se realiza en forma sencilla, basta indicar la posición del elemento con el cursor del ratón, y la letra correspondiente a dicho elemento.

La construcción y conexión de la red se hace partiendo de la subestación de potencia, con dirección a los centros de consumo, es decir aguas abajo.

El proceso es directo, sólo necesita que el usuario recuerde unos pocos símbolos nemotécnicos; aunque se cuenta con una ayuda en línea.

Los siguientes códigos nemotécnicos están disponibles para DIBUJAR y MODIFICAR la red.

S - Dibuja una BARRA o NODO en la posición del cursor.  
 G - Dibuja un SUBESTACION y conecta a la presente barra.  
 Y - Dibuja un símbolo SHUNT y conecta a la barra presente.  
 L - Dibuja una CARGA y conecta a la barra presente.  
 N - Prepara para aceptar el NOMBRE de la barra en la localización del cursor; entre el nombre seguido de INTRO.  
 C - Dibuja un CIRCUITO del último nodo, a la localización del cursor (o la s-e).  
 T - Como para 'C' pero con un símbolo de TRANSFORMADOR EN LINEA.  
 1 - Dibuja un interruptor 'desde' al final del último circuito dibujado.  
 2 - Dibuja un interruptor 'al' al final del último circuito dibujado.  
 F - FUERA al último símbolo dibujado.  
 E - ELIMINA (borra) la pantalla y REDIBUJA la red.  
 H - Ayuda !. Despliega esta lista de información.  
 O - Provee OPCIONES extra para el dibujo, ya sea mover y cambiar de escala.  
 X - SALE de dibujar la red y modifica parte del programa.  
 D - Prepara para el BORRADO de un ítem (ie. Posicione el cursor en el NODO y tipee 'D'. Cualquier conexión al NODO puede ser ahora borrada con 'T', o por posicionar el cursor en fin de un circuito con 'C'. Una vez que todos los ítems sean removidos, el nodo se borra con 'S'.

\* Presione el botón izquierdo del ratón para continuar \*

**Figura 4.4** Códigos nemotécnicos, primera ayuda

/CONTINUA

Los siguientes códigos nemotécnicos están disponibles para DIBUJAR y MODIFICAR la red.

M - Prepara para MOVER un ítem (ie. Posicione el cursor en una barra y tipee 'M'. Un transformador conectado al nodo, o el nombre, pueden ser ahora movidos por mover el cursor a la nueva posición y presionar 'T' o 'N'.  
 La subestación puede por sí sola moverse con 'S' o 'J'.  
 Si hay más de un TRANSFORMADOR, en un nodo, la letra 'T' deben ser repetidamente usada hasta que cada una sea movida.

\* Presione el botón izquierdo del ratón para continuar \*

**Figura 4.5** Códigos nemotécnicos, segunda ayuda



## 4.5 Edición de Datos

La entrada y edición de datos, se realiza a través del teclado del computador. La notación decimal utilizará el "punto decimal". Al construirse la red de distribución primaria, ésta automáticamente establece la topología del sistema. Los datos asociados, se dividen en grupos, como son: nodos, líneas, transformadores, y datos en la subestación de potencia.

Los datos se introducen de acuerdo a lo que aparece en la pantalla, tal como lo muestra la figura 4.7. Si se desea cambiar algún parámetro, basta seleccionar con el cursor del ratón y hacer clic, luego escribir el dato correspondiente.

ENTRADA DE DATOS DE LA RED.  
Seleccione la opcion y presione el boton izquierdo.

+

```
Opciones :  
De los nodos.  
Lineas, Shunts y  
transformadores.  
Fuente y otros.  
Menu anterior
```

**Figura 4.6** Menú de edición de datos

DATOS DE NODOS :

Nodos	Carga[kW]	Carga[kVAR]
A20		
A01	4.01	.81
A02	348.00	168.00
A03	18.00	4.00
A04		
A05	93.00	45.00
A06	12.00	2.00
A07		
A08	21.00	4.00
A09	98.00	20.00
A10	21.00	4.00
B11	71.00	14.00
B12	118.00	24.00
B13	80.00	16.00
B14	44.00	9.00
B15		
B16	47.00	9.00
B17	89.00	18.00
B18	11.00	2.00
B19		

OPCIONES :

Redespiega
Pag.Prox.
Ayuda
Retorno

+

**Figura 4.7** Datos de los nodos, Red Frontel

DATOS DE NODOS :

Nodos	Carga[kW]	Carga[kVAR]
T03	18.00	4.00
T02	31.00	6.00
T01	29.00	6.00

+

OPCIONES :

Redespiega
Pag.Previa
Ayuda
Retorno

**Figura 4.8** Datos de los nodos, Red Frontel

Si algún parámetro a introducir, es cero, este no se representa en pantalla, esto facilita la visualización de los datos editados. Para los parámetros de las líneas el usuario puede dar los módulos de la resistencia y reactancia, ó indicar el tipo de conductor empleado. El programa recurre a parámetros estándares almacenados en memoria.

Puede modelarse las cargas en cuatro formas distintas: P y Q constantes, consumo tipo residencial, consumo comercial y consumo industrial (corresponden a distintas funciones de V y F). Se puede representar conexiones trifásicas, bifásicas y monofásicas de cargas. Respecto a los shunt del sistema, estos van en la columna correspondiente a los [kVAr]; el paquete se encarga de diferenciar si se trata de un shunt o una reactancia.

DATOS DE LINEAS, SHUNT Y TRANSFORMADORES :					
Inicio	Final	R[ohm/km]	X[ohm/km] o [kVAr]	T.Conex. (carga)	T.Linea Largo [km] Ten.Base
T03	T03		25.0000		
T02	T02		35.0000		
T01	T01		35.0000		
A00	A01			1	1.19
A01	A02			1	5.14
A02	A03			1	3.09
A03	A04			1	6.93
A04	A05			1	6.94
A05	A06			1	4.03
A06	A07			1	4.03
A07	A08			1	2.07
A08	A09			1	2.07
A09	A10			1	8.36
A07	B11			1	.23
B11	B12			1	1.82
B12	B13			1	.72
B13	B14			1	2.13
B14	B15			1	2.13
B15	B16			1	4.18
B16	B17			1	4.18

OPCIONES :	
Redespliega	
Pag.Prox.	
Ayuda	
Retorno	

T.Conex. = Tipo de conexion del consumo ( 1 al 7 ).
T.Linea = Tipo de conductor o transformador.
Para detalles elija ayuda.

**Figura 4.9** Datos de las líneas, shunt y transformadores, Red Frontel

DATOS DE LINEAS, SHUNT Y TRANSFORMADORES :

Inicio	Final	R[ohm/km]	X[ohm/km] o [kVAr]	T.Conex. (carga)	T.Linea	Largo [km] Ten.Base
B17	B18			1	9	3.14
B18	B19			1	9	3.15
A04	T01		.0400	2	50	13200.00
B15	T02		.0400	3	50	13200.00
B19	T03		.0400	4	50	13200.00

+

## OPCIONES :

Redespliega  
Pag.Previa  
Ayuda  
Retorno

T.Conex. = Tipo de conexion del consumo  
( 1 al 7 ).  
T.Linea = Tipo de conductor o transformador.  
Para detalles elija ayuda.

**Figura 4.10** Datos de las líneas, Red Frontel (continuación).

Los parámetros de la subestación de potencia, se indican en la ventana siguiente(Figura 4.11); en la sección correspondiente al código de carga, este se refiere al tipo de consumo. El tipo de conexión de la carga es indicado a través de códigos, los que se indican en la figura 4.13.

Los valores del factor de carga activo (FCA) y factor de carga reactivo(FCR), son datos del problema, caso contrario, se pueden estimar en base a datos históricos. Se puede utilizar el factor de demanda si en caso se desea expresar los resultados en función de la demanda máxima y la carga total instalada.

Los valores indicados en la tolerancia ángulo, y tolerancia módulo, se recomienda que sean del orden del  $1e-4$ .

Los valores por defecto asumidos por el software interactivo gráfico son: potencia base de 10000 [kVA], y número máximo de iteraciones de 30.

DATOS EN FUENTE Y ADICIONALES :

Barra	V[base]	Vse[pu]	Cod. C.	F.C.A.	F.C.R.	Tol.Mod.	Tol.Ang.
A20	7620.000	.992		1.00000	1.00000	.00010	.00010

Vse[pu]	=	Tension en la subestacion [ pu ].
Cod. C.	=	Codigo del tipo de consumo.
F. C. A.	=	Factor de carga activo.
F. C. R.	=	Factor de carga reactivo.
Tol. Mod.	=	Tolerancia en el modulo de la tension.
Tol. Ang.	=	Tolerancia en el angulo de la tension.
Para detalles elija ayuda.		

OPCIONES :

Redespliega
Ayuda
Retorno

+

**Figura 4.11** Parámetros en la fuente, Red Frontel

De las figuras 4.9 y 4.10, se observa que los datos están en forma de códigos, los cuales representan magnitudes; el significado de estos se encuentran en la ayuda correspondiente a este ítem.

Usted puede seleccionar una opción en la base de la pantalla, usando el ratón y presionando el 'BOTÓN IZQUIERDO', o puede entrar y modificar los datos en la parte superior de la pantalla.

La ENTRADA o EDICIÓN se hace como sigue:

Use el cursor para seleccionar la barra o punto donde usted desee dar los datos y luego presione el BOTÓN IZQUIERDO. La pantalla ya está lista para la entrada de TEXTO.

Al inicio de campo seleccionado, los números pueden ser escritos, en formato libre, con el signo y punto decimal si es necesario, separados por cualquier número de blancos. Después presione INTRO y una nueva línea estará debajo del primero. Este modo es terminado al entrar una línea en blanco (ie. un ESPACIO seguido de INTRO). Ud puede pedir DESPLIEGUE de los datos, a fin de ver si los datos fueron entrados correctamente.

NOTA: Si un campo en particular es cero, este será suprimido y el campo estará en blanco.

C O D I G O S :

TIPOS DE CONSUMO (CARGA)

0	P y Q Constantes
1	Residencial
2	Comercial
3	Industrial

\* Presione el botón izquierdo del ratón para continuar \*

**Figura 4.12** Códigos de carga

TIPO DE CONEXIÓN DEL CONSUMO

1	Trifásica
2	Bifásica, fases 1 y 2
3	Bifásica, fases 1 y 3
4	Bifásica, fases 2 y 3
5	Monofásica, fase 1
6	Monofásica, fase 2
7	Monofásica, fase 3

TIPO DE CONDUCTOR O TRANSFORMADOR

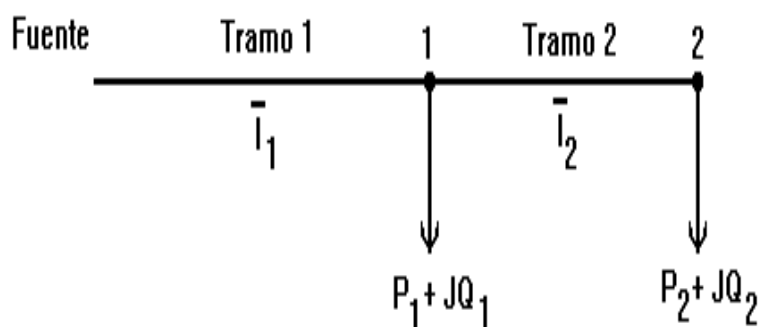
1	Cu No. 4 AWG
2	Cu No. 5 AWG
3	Cu No. 2 AWG
4	Cu No. 3 AWG
5	Cu No. 1/0 AWG
6	Cu No. 3/0 AWG
7	Cu No. 1 AWG
8	Cu No. 6 AWG
9	Cu No. 7 AWG
10	Cu No. 4/0 AWG
11	Cu No. 2/0 AWG
12	Cu cable 3x25
13	Cu cable 3x95
14	Cu cable 3x185
20	Las impedancias las da el usuario
50	Transformador de distribución

\* Presione el botón izquierdo del ratón para continuar \*

**Figura 4.13** Códigos de conexión y conductor

#### 4.6 Análisis del Flujo de Potencia Trifásico

El módulo de análisis del flujo de potencia trifásico utilizado, se basa en un algoritmo especializado en redes de distribución radiales [11,14,27], pues se hace uso óptimo de la memoria RAM, además de ser muy rápido y preciso, como se demostró con FLUDIS. El algoritmo básico utilizado es el propuesto en [27], y la modelación se detalla en el anexo A.



**Figura 4.14** Sistema radial con dos tramos

Las ecuaciones siguientes son desarrolladas para tres nodos, dos secciones de línea, y un sistema monofásico. Se evalúan los parámetros  $A[k]$  y  $B[k]$  aguas abajo de la red, a fin de calcular los módulos de la tensión. Luego se procede a calcular las potencias equivalentes por nodo, considerando las pérdidas a la tensión ya determinada y la respectiva ventana de carga. Se procede así hasta que se cumpla la tolerancia especificada. El ángulo del nivel de tensión se determina al final, por la relación [16]. La estructura del algoritmo sigue la siguiente secuencia:

$$A_1(k) = 2\{(P_1 + P_2 + P_i)R_{s1} + (Q_1 + Q_2 + Q_i)X_{s1}\} - v_s^2 \quad [1]$$

$$B_1(k) = \{(P_1 + P_2 + P_i)^2 + (Q_1 + Q_2 + Q_i)^2\} Z_{s1}^2 \quad [2]$$

$$v_{1(k)}^4 + v_{1(k)}^2 A_1(k) + B_1(k) = 0 \quad [3]$$

$$A_2(k) = 2\{(P_2 + P_i)R_2 + (Q_2 + Q_i)X_2\} - v_{1(k)}^2 \quad [4]$$

$$B_2(k) = (P_2^2 + Q_2^2) Z_2^2 \quad [5]$$

$$v_{2(k)}^4 + v_{2(k)}^2 A_2(k) + B_2(k) = 0 \quad [6]$$

Cálculo de pérdidas

$$P_{ei} = P_{Li} + \sum^{Nai} P_i + \sum^{NAi} R_i \left[ \frac{P_i^2 + Q_i^2}{v_{i(k)}^2} \right] \quad [7]$$

$$Q_{ei} = Q_{Li} + \sum^{Nai} Q_i + \sum^{NAi} X_i \left[ \frac{P_i^2 + Q_i^2}{v_{i(k)}^2} \right] \quad [8]$$

$$k=k+1 \quad [9]$$

$$A_1(k) = 2\{P_{e1}R_{s1} + Q_{e1}X_{s1}\} - v_s^2 \quad [10]$$

$$B_1(k) = (P_{e1}^2 + Q_{e1}^2) (R_{s1}^2 + X_{s1}^2) \quad [11]$$

$$v_{1(k)}^4 + v_{1(k)}^2 A_1(k) + B_1(k) = 0 \quad [12]$$

$$A_2(k) = 2\{P_{e2}R_2 + Q_{e2}X_2\} - v_{1(k-1)}^2 \quad [13]$$

$$B_2(k) = (P_{e2}^2 + Q_{e2}^2) Z_2^2 \quad [14]$$

$$v_{2(k)}^4 + v_{2(k)}^2 A_2(k) + B_2(k) = 0 \quad [15]$$

$$\left| v_{1(k)} - v_{1(k-1)} \right| \leq \varepsilon \quad \text{y} \quad \left| v_{2(k)} - v_{2(k-1)} \right| \leq \varepsilon$$

Si no ir a [9], y el ángulo del nivel de tensión es dado por:

$$\tan \beta_i = \frac{P_i X_i - Q_i R_i}{P_i R_i + Q_i X_i + v_i^2} \quad [16]$$



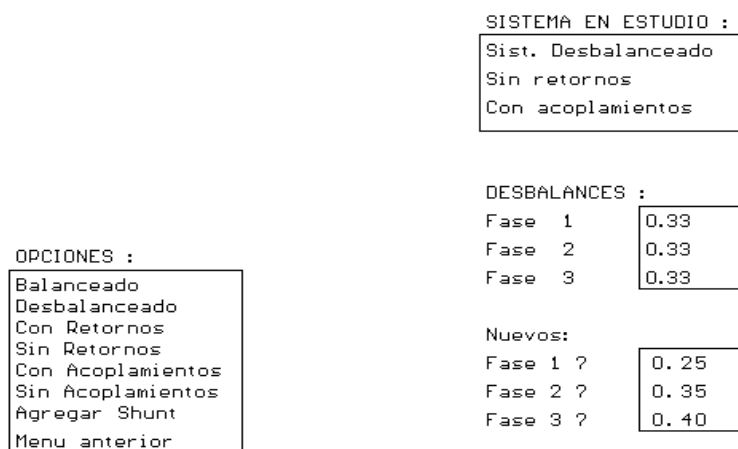
El algoritmo puede ser evaluado con  $V_2^2$ ,  $V_1^2$  como variables. La verificación de la convergencia necesita ser realizada **sólo en base a magnitudes de tensión.**

Las posibilidades con el software en relación a este ítem, son las que se ven en la figura 4.15.



**Figura 4.15** Análisis trifásico

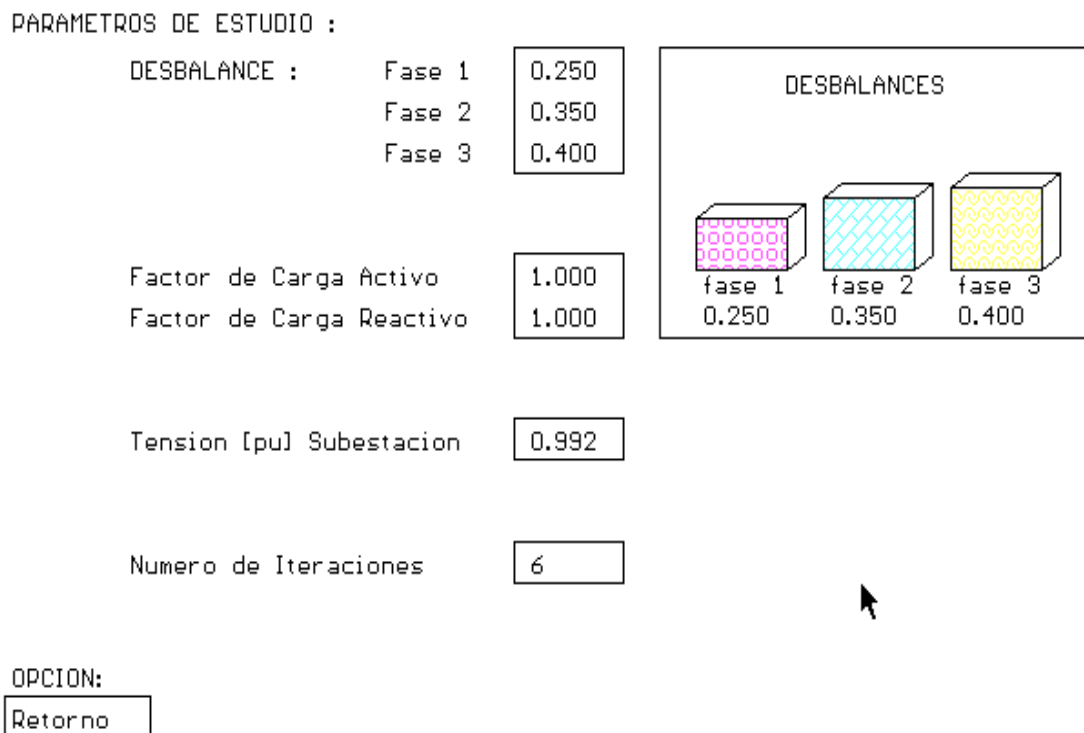
Al tratarse de un estudio trifásico, se pueden incluir desbalances.



**Figura 4.16** Desbalances y características del sistema

Una vez introducidos los desbalances, y especificados los retornos y acoplamiento, se procede a ejecutar el flujo trifásico, el cual es rápido y preciso

[11,27]. Luego de esta acción, se dispone de un análisis gráfico total del sistema en estudio. Esta sección de AIDPRI ayuda al ingeniero de distribución a ver exactamente lo que está pasando en el sistema. Se cuenta con un resumen general de potencias y pérdidas, salidas gráficas para evaluar el nivel de tensión (por fase) ya sea por nodo o por distancia, así como también evaluar rápidamente cuan cargado está un determinado alimentador.



**Figura 4.17** Resultados generales

Como ejemplo de estudios del sistema Frontel [14], se tienen los siguientes resultados, de los cuales se aprecia que la tercera fase está sobrecargada

con respecto a las dos anteriores, es la fase que está soportando las mayores exigencias eléctricas.

Los parámetros que se citan a continuación son los vistos desde la fuente.

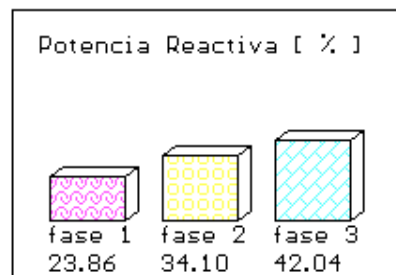
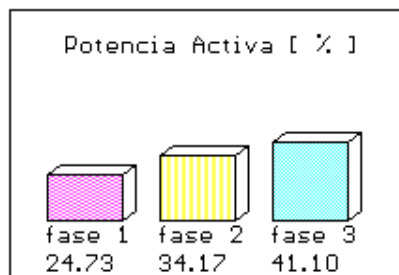
POTENCIAS ACTIVAS Y REACTIVAS :

Potencia Activa [ kW ]

Fase 1	340.578
Fase 2	470.570
Fase 3	566.000
Total :	1377.148

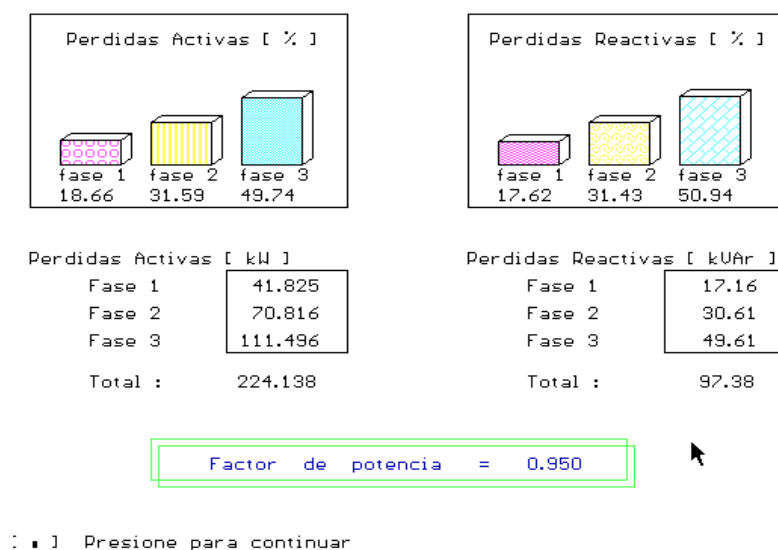
Potencia Reactiva [ kVAr ]

Fase 1	108.116
Fase 2	154.542
Fase 3	190.533
Total :	453.191

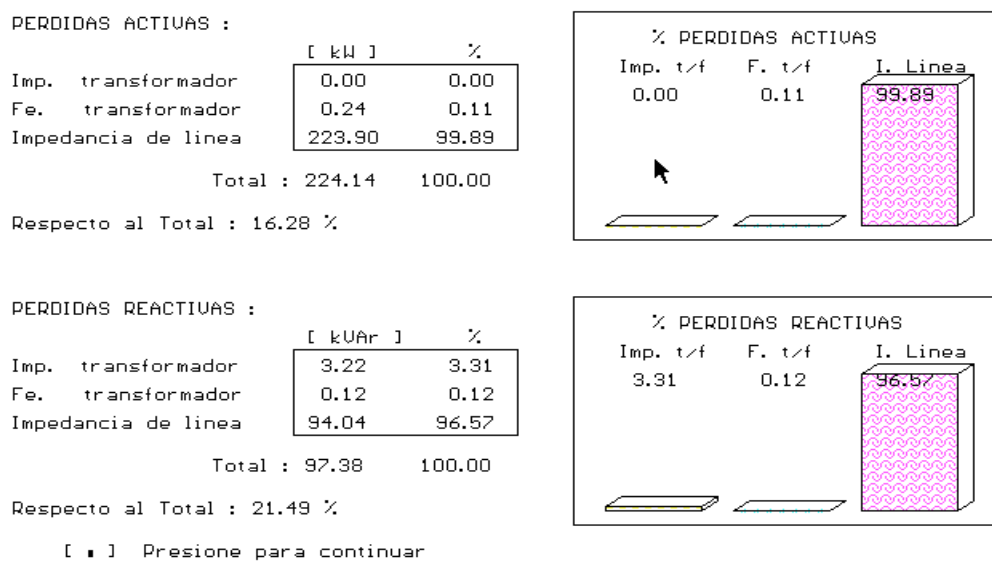


■ ] Presione para continuar

**Figura 4.18** Potencias por fase

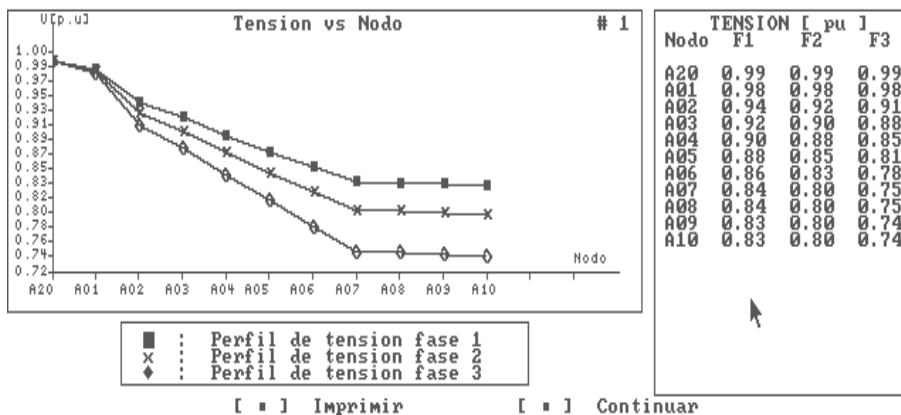


**Figura 4.19** Factor de potencia del sistema



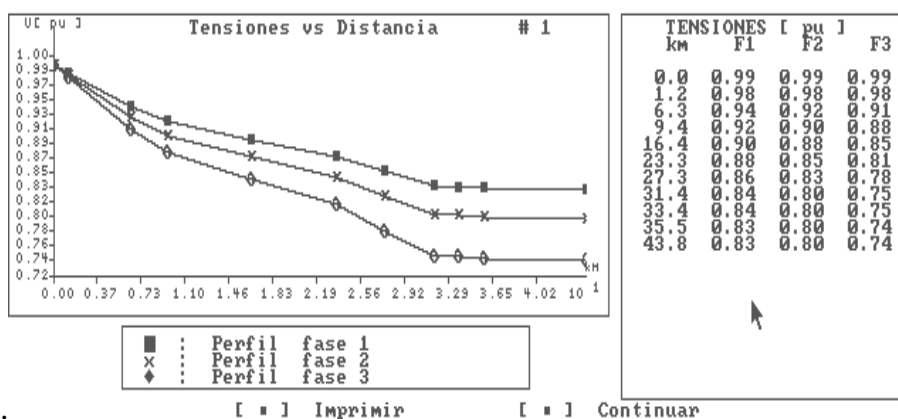
**Figura 4.20** Desglose de pérdidas

Al realizarse un flujo de potencia, siempre se espera resultados del nivel de tensión por cada nodo existente, la cual es representado en la figura 4.21, en una forma sencilla de analizar, a través de histogramas.



**Figura 4.21** Nivel de tensión versus nodo.

Análogo a la figura anterior; pero en función de la distancia.

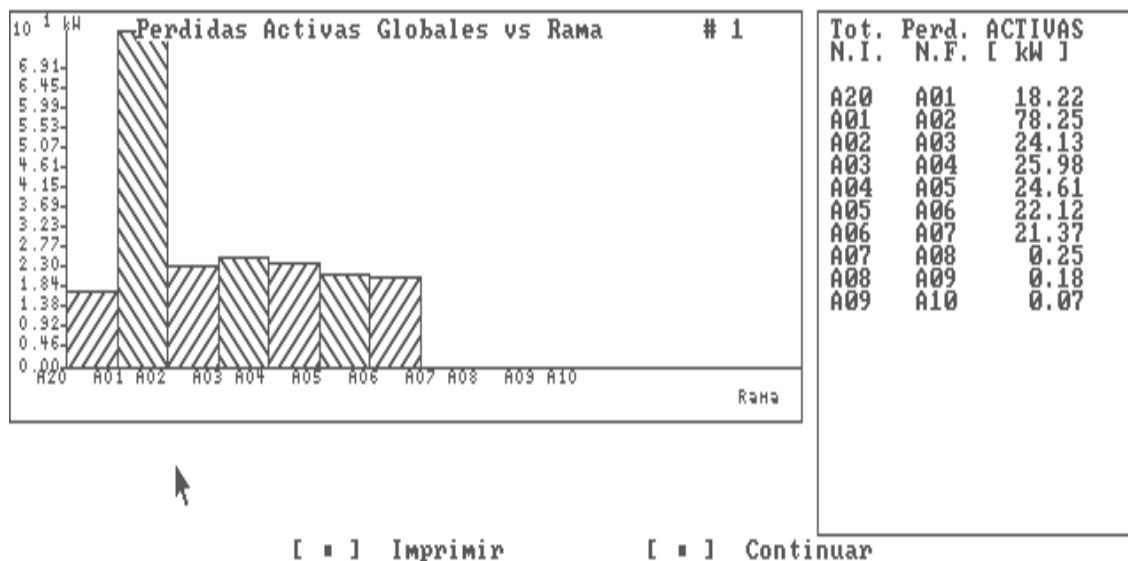


**Figura 4.22** Nivel de tensión versus distancia

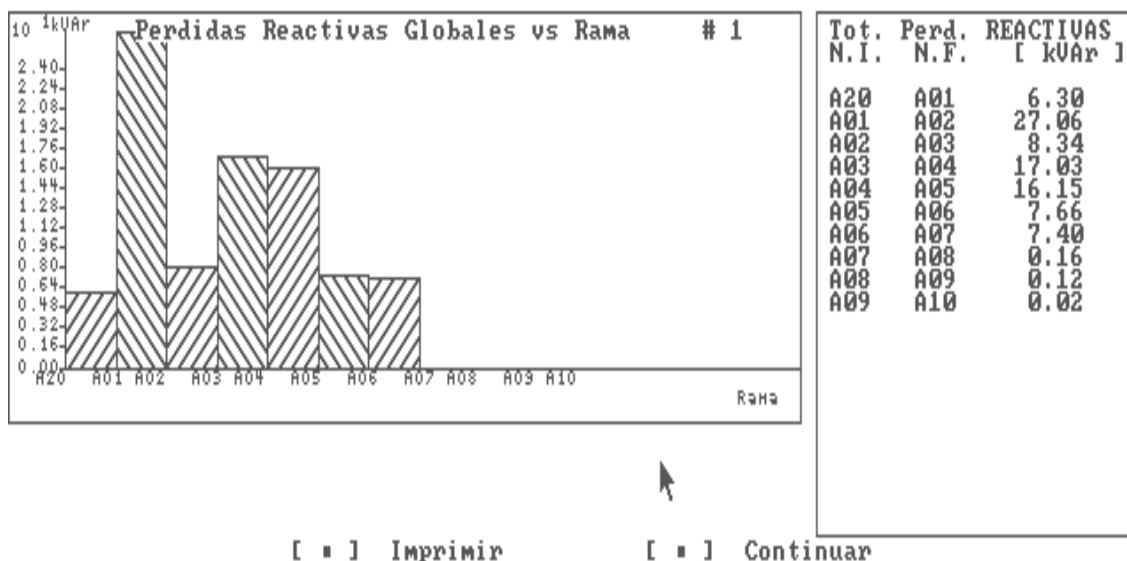
Las pérdidas son parte importante del análisis, pues es importante minimizar éstas, buscando una óptima sección del conductor.

Para revisar el carácter de las pérdidas, estas se pueden mostrar de dos formas, una por rama, y la otra por distancia.

Con la primera posibilidad, se evaluarán las pérdidas de potencia tanto activas como reactivas existentes en cada rama de la red eléctrica, tal como lo muestran las figuras 4.23 y 4.24. Los cuadros presentan gráficos de barras, como también resultados numéricos indicando tanto el nodo inicial, como el final y la correspondiente potencia para el respectivo tramo.



**Figura 4.23** Pérdidas activas versus rama.



**Figura 4.24** Pérdidas reactivas en ramas de la red

Los sistemas de distribución van creciendo año a año. A las redes troncales existentes se le van adicionando nuevas líneas o cables laterales, ya sea en forma monofásica o trifásica.

Al tratar el tema de crecimiento de una red eléctrica, este involucra automáticamente la distancia o longitud de los ramales involucrados, y para visualizar lo anterior resulta mejor si este concepto se puede representar a través de una interface gráfica.

Al considerar interfaces intuitivas, se tiene el concepto de "look and feel", ello es lo que representa las figuras 4.25 y 4.26, pues se vé y se siente la interacción, o retroalimentación usuario-máquina al agregar determinadas líneas y como influyen en las pérdidas de potencia.

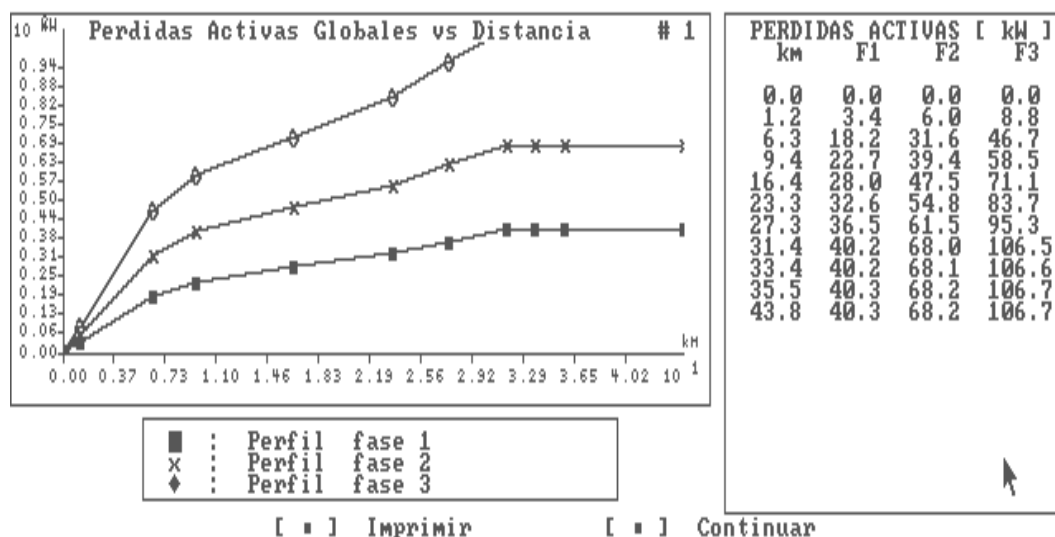


Figura 4.25 Pérdidas activas versus distancia.

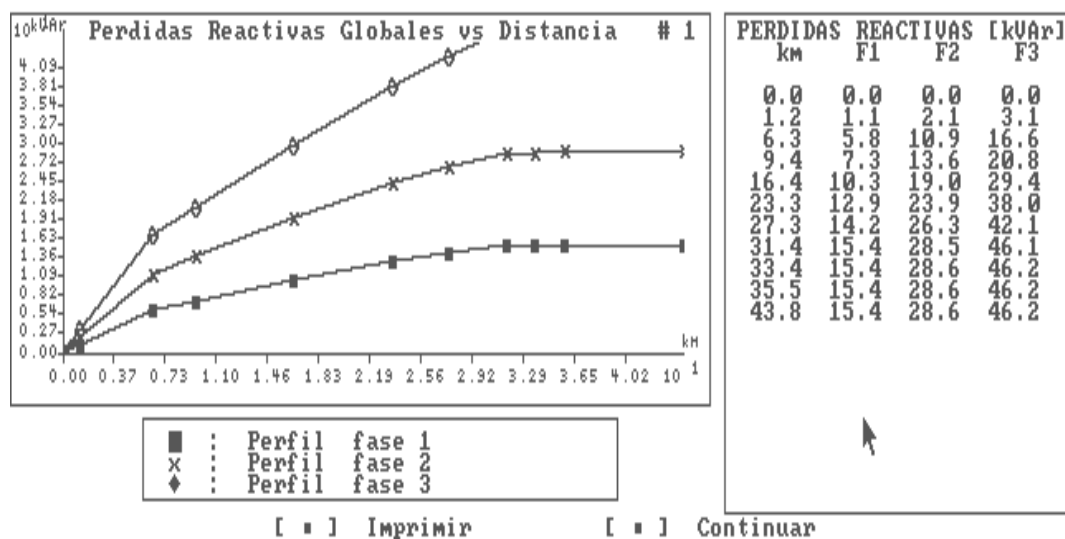
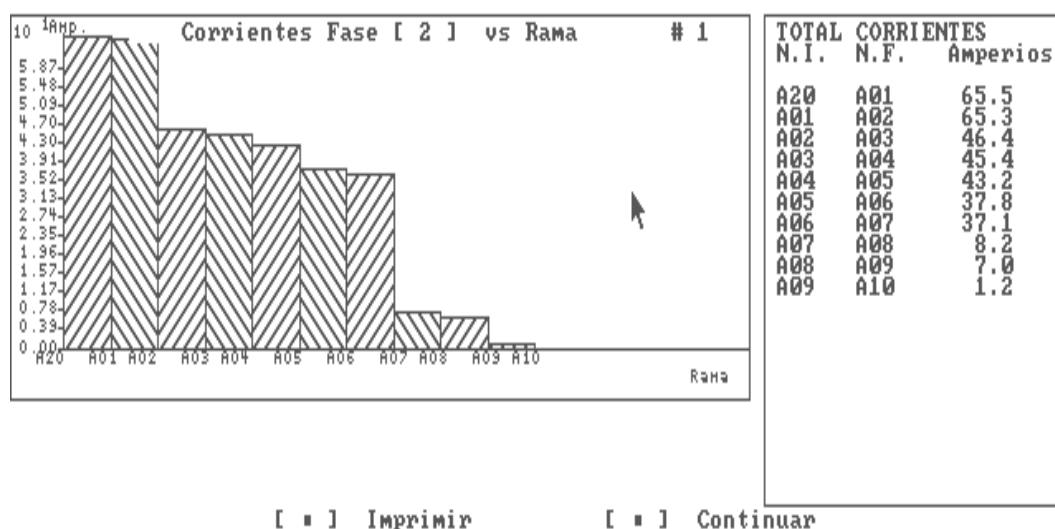


Figura 4.26 Pérdidas reactivas versus distancia



La intensidad de corriente eléctrica tiene trascendental importancia, puesto que de ella dependen las pérdidas de potencia, el nivel de caída de tensión, como también la sección del conductor a utilizar.

Para determinar cuantos Amperes por cada fase están circulando por una determinada rama de la red, el paquete computacional desarrollado cuenta con una rutina que permite evaluar y desplegar la información en forma de barras bidimensionales estas cantidades.



**Figura 4.27** Intensidad de corriente en cada rama de la red

#### 4.7 Análisis Óptimo de Reactivos

Los condensadores, son ampliamente usados en los SDDE para la compensación de potencia reactiva, control de tensión y reducción de pérdidas de potencia. Los beneficios de su uso dependen del tipo de condensadores ( fijo o interrumpible ), ubicación de los mismos, el tamaño, su esquema de control y los niveles de distorsión armónica existentes en la red (entra en resonancia para determinados armónicos con la inductancia del transformador y de la red, lo que deforma la onda de tensión, esto dependerá también del escalón de regulación y la carga que entre en cada momento).

Por tanto el problema de la ubicación de los condensadores en los alimentadores, se puede plantear como: determinar el lugar (número y localización), tipo, tamaño y esquema de control de los condensadores a ser instalados [35].

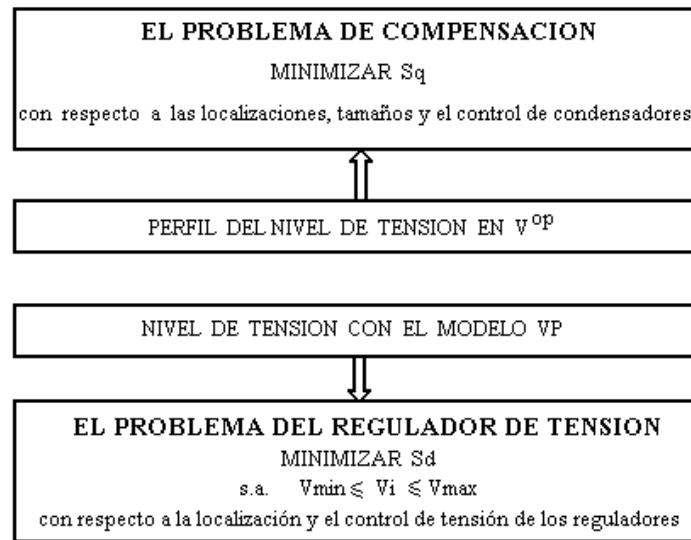
Cuando la potencia reactiva, es entregada solamente por la subestación de potencia, cada uno de los componentes del SDDE (alimentadores, transformadores, equipo de protección) debe ser dimensionado para dichos niveles de carga reactiva. Los condensadores flexibilizan esta necesidad debido a la disminución de la demanda de potencia reactiva que enfrenta la subestación de potencia, al reducir las corrientes de los alimentadores.

Beneficios de la instalación de condensadores:

- dependiendo del factor de potencia del sistema, la instalación de condensadores puede aumentar la capacidad de las subestaciones hasta en un 30% [19],
- capacidad liberada en el alimentador, existen menos exigencias térmicas sobre las líneas como consecuencia de la reducción de las corrientes. Por tanto, se dispone de una mayor capacidad de transmisión de potencia.
- mejor nivel de tensión, es decir mejor servicio al cliente.
- capacidad liberada en generación; al reducirse las pérdidas y,
- reducción de las pérdidas de capital que significa el perfeccionar o expandir un sistema [19,15,35].

El programa computacional analiza dos problemas, la compensación capacitiva y la regulación de tensión. El problema de compensación corresponde a la determinación, dimensionamiento y control óptimo en el tiempo de los bancos de condensadores que se instalarán en el sistema. El problema de la regulación, corresponde a la determinación del lugar en el alimentador del número mínimo de transformadores con control de derivaciones bajo carga, de forma que el perfil del nivel de tensión, se mantenga dentro de los límites preestablecidos.

Los algoritmos utilizados en la presente sección son los de: [15,37,38,39] y la modelación de los elementos se presenta en el anexo A [34].



**Figura 4.28** Diagrama de bloques del modelo reactivo desacoplado

La figura 4.28 muestra el diagrama de bloques del modelo reactivo desacoplado utilizado en la referencia [15]. En ella se utiliza una función de costos que puede expresarse como  $S = S_d + S_q$ . Un modelo desacoplado en que:

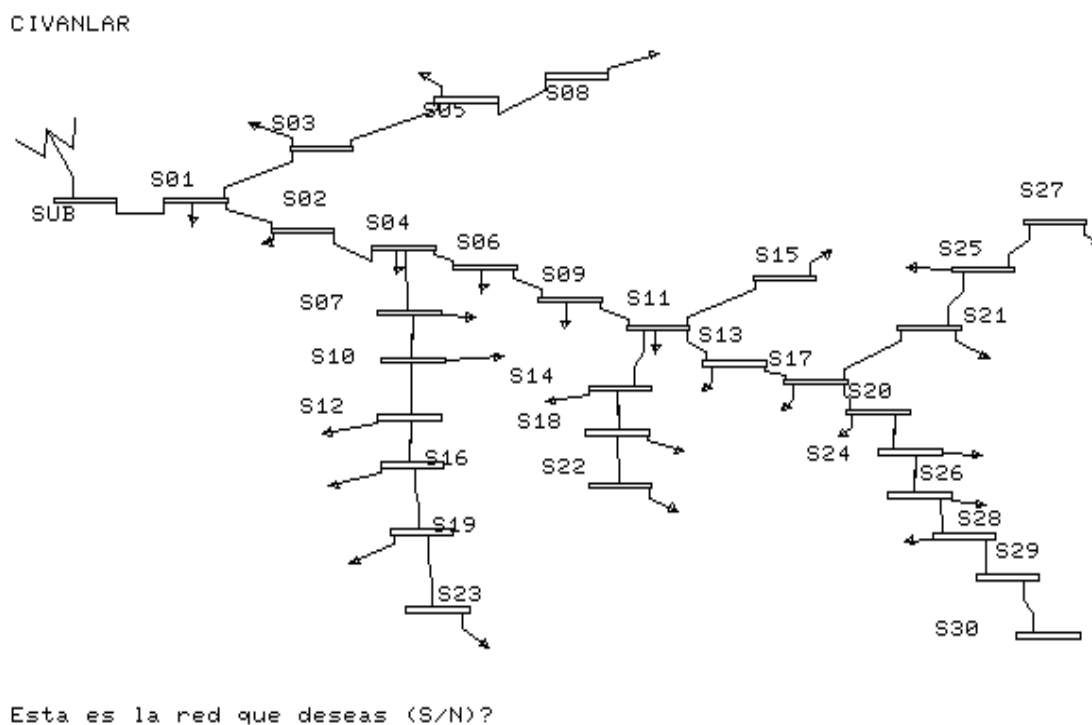
- **S<sub>d</sub>** corresponde a la localización del número mínimo de transformadores con control de derivaciones bajo carga y
- **S<sub>q</sub>** corresponde a la determinación de la localización, tamaño y control óptimos de "n" bancos de condensadores, se descompone el problema en dos sub problemas:

i) optimizar  $S_d$  en términos de las variables del problema del regulador de tensión

ii) optimizar  $S_q$  en términos de las variables del problema capacitivo.

Para efectos de validar el algoritmo de la referencia [15], que en este trabajo corresponde al módulo VOLPOT, se estudia la red Grainger y Civanlar [39].

El sistema Grainger y Civanlar cuenta con 30 nodos, y seis laterales. Opera a 23 [kV]. El unilíneal se ilustra en la figura 4.29 y los parámetros eléctricos se muestran en las tablas correspondientes.



**Figura 4.29** Diagrama unifilar de la red Civanlar y Grainger

**TABLA IV.1** Datos para el sistema de Civanlar y Grainger

DATOS DE LINEAS, SHUNT Y TRANSFORMADORES :

Inicio	Final	R[ohm/km]	X[ohm/km] o [kVAr]	T.Conex. (carga)	T.Linea	Largo [km] Ten.Base
SUB	S01	.1960	.6550	1		20 .50
S01	S02	.2790	.0150	1		20 .50
S02	S04	.4440	.4390	1		20 1.00
S04	S06	.8640	.7510	1		20 1.00
S06	S09	.8640	.7510	1		20 1.00
S09	S11	1.3740	.7740	1		20 1.50
S11	S13	1.3740	.7740	1		20 1.50
S13	S17	1.3740	.7740	+	1	20 1.50
S17	S20	1.3740	.7740	1		20 1.50
S20	S24	1.3740	.7740	1		20 1.50
S24	S26	1.3740	.7740	1		20 1.50
S26	S28	1.3740	.7740	1		20 1.50
S28	S29	1.3740	.7740	1		20 1.50
S29	S30	1.3740	.7740	1		20 1.50
S17	S21	.8640	.7510	1		20 1.00
S21	S25	1.3740	.7740	1		20 1.50
S25	S27	1.3740	.7740	1		20 1.50
S11	S14	.8640	.7510	1		20 1.00
S14	S18	.8640	.7510	1		20 1.00
S18	S22	1.3740	.7740	1		20 1.50

OPCIONES :

Redespliega  
Pag.Prox.  
Ayuda  
Retorno

T.Conex. = Tipo de conexion del consumo  
( 1 al 7 ).  
T.Linea = Tipo de conductor o transformador.  
Para detalles elija ayuda.

**TABLA IV.2** Datos para el sistema de prueba

DATOS DE LINEAS, SHUNT Y TRANSFORMADORES :

Inicio	Final	R[ohm/km]	X[ohm/km] o [kVAr]	T.Conex. (carga)	T.Linea	Largo [km] Ten.Base
S11	S15	.8640	.7510	1		20 1.00
S04	S07	.4440	.4390	1		20 1.00
S07	S10	.4440	.4390	1		20 1.00
S10	S12	.8640	.7510	1		20 1.00
S12	S16	.8640	.7510	1		20 1.00
S16	S19	.8640	.7510	1		20 1.00
S19	S23	1.3740	.7740	1		20 1.50
S01	S03	.2790	.0150	1		20 .50
S03	S05	1.3740	.7740	1		20 1.50
S05	S08	1.3740	.7740	1		20 1.50

+

OPCIONES :

Redespliega  
Pag.Previa  
Ayuda  
Retorno

T.Conex. = Tipo de conexion del consumo  
( 1 al 7 ).  
T.Linea = Tipo de conductor o transformador.  
Para detalles elija ayuda.

A fin de validar el módulo, se evaluaron dos casos, el primero considerando un costo discreto de condensadores, y el segundo con costos lineales. Se utilizaron los siguientes parámetros para el caso discreto:

Utilizo :	
Costo Discreto	
Clic [US\$/kVAr]	5.000
Udrop [ % ]	5.000
U se [ pu ]	1.000
Condensadores	5

DATOS GENERALES	
Costo de condensadores:	
- Discreto	
- Lineal	
Costo lineal [US\$/kVAr] (clic)	
Max. caída de tensión [ % ] (Udrop)	
Tensión en la S-E [ pu ]	
No. de condensadores	
Retornar al Menu Anterior	

**Figura 4.30** Caso discreto de la red Civanlar

Factor	3.000
Kp [US\$/kW/año]	120.000
Ke [US\$/kWh]	0.030
Kc1 [US\$/kVAr]	1857.00
Kc2 [US\$/kVAr]	3285.00
Kc3 [US\$/kVAr]	4428.00
Kc4 [US\$/kVAr]	5285.00
Kc5 [US\$/kVAr]	6200.00

COSTOS DE:	
Factor ( P = factor * Q )	
kW de potencia de punta ( Kp )	
kWh de energía ( Ke )	
Inst.(1 ...300) [ kVAr ] ( Kc1 )	
Inst.(300...600) [ kVAr ] ( Kc2 )	
Inst.(600...900) [ kVAr ] ( Kc3 )	
Inst.(900...1200) [ kVAr ] ( Kc4 )	
Inst.(1200 ... ) [ kVAr ] ( Kc5 )	
Retornar al Menu Anterior	

**Figura 4.31** Costos de condensadores

La optimización provee los siguientes resultados:

## UBICACION Y TAMAÑO DE CONDENSADORES :

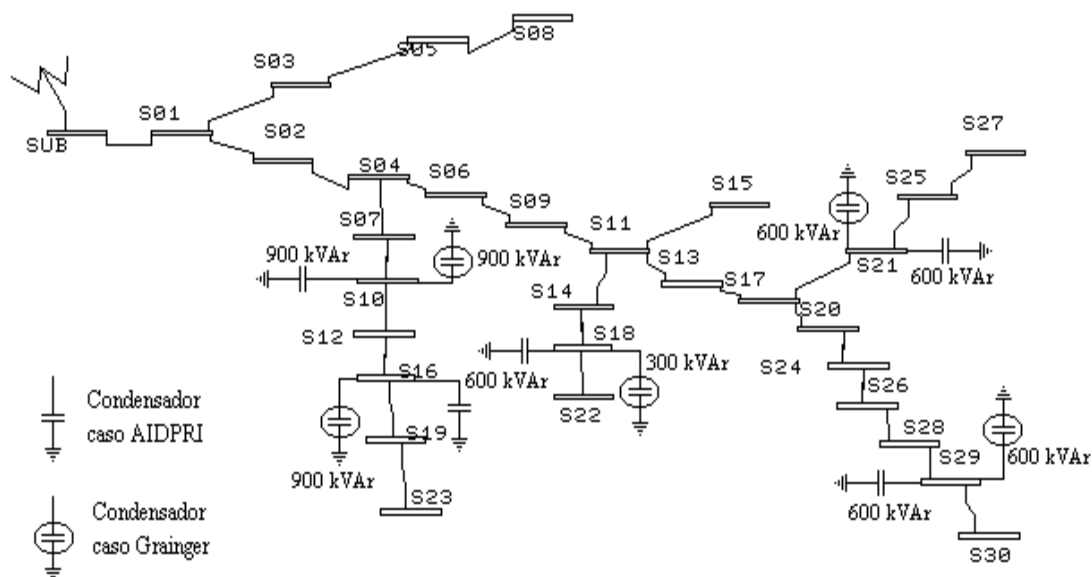
Condensador	Nodo_suc	Tamaño [ kVAr ]	[ US\$/C ]
1	10	900.00	5285.00
2	21	600.00	4428.00
3	29	600.00	4428.00
4	18	600.00	4428.00
5	16	600.00	4428.00



OPCION:

Continuar

**Figura 4.32** Ubicación y tamaño de condensadores



**Figura 4.33** Ubicación y tamaño de condensadores en el caso discreto

Los resultados para el caso discreto son similares a los obtenidos en las referencias [37,38,39].



El segundo estudio, se refiere a la misma red, pero considerando costo lineal de los condensadores, en 5 [US\$/kVAr]. Los demás parámetros se consideraron de igual magnitud.

Los resultados obtenidos son:

UBICACION Y TAMAÑO DE CONDENSADORES :

Condensador	Nodo_suc	Tamaño [ kVAr ]	[ US\$/C ]
1	29	600.00	3000.00
2	21	600.00	3000.00
3	16	600.00	3000.00
4	18	600.00	3000.00
5	10	900.00	4500.00

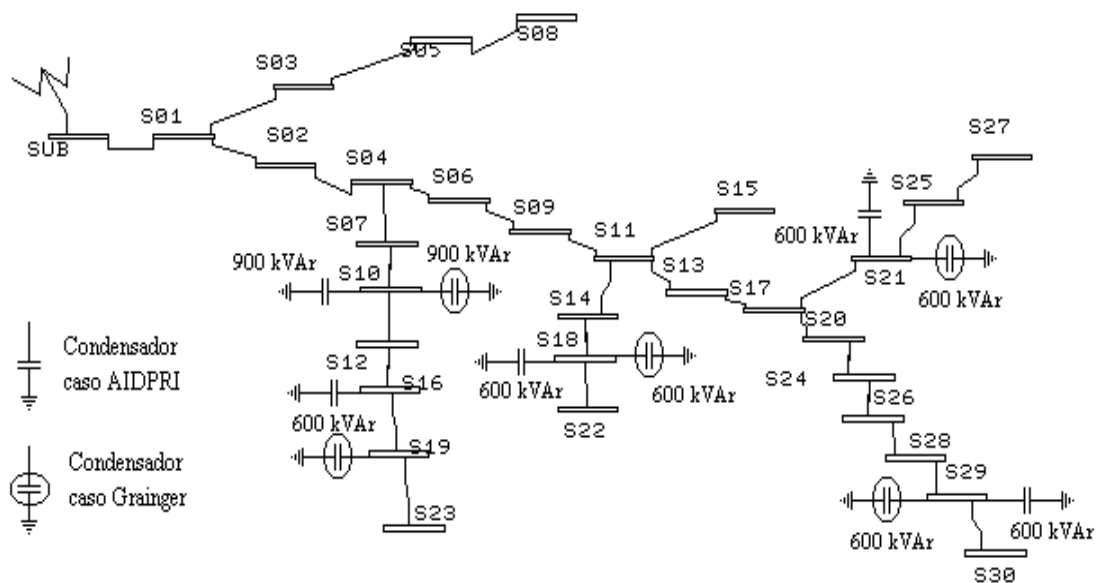


OPCION:

Continuar

**Figura 4.34** Ubicación de condensadores (caso lineal)

Los resultados son similares a [39]. Ambos casos se compararon también con [15] y los resultados obtenidos en la presente investigación son substancialmente mejores. La figura siguiente compara los resultados obtenidos por Grainger y por el programa AIDPRI.



**Figura 4.35** Ubicación y tamaño de condensadores en el caso lineal

El programa desarrollado acepta modificar los parámetros utilizados en el modelo, puesto que en un SDDE los consumos aumentan anualmente, lo que lleva consigo el crecimiento del sistema. Además los valores  $K_p$  y  $K_e$  (Costo de kW de potencia punta y del kWh de energía), pueden ir variando de año en año, aunque se mantenga la topología.

Las figuras 4.36 y 4.37 corresponden a los gráficos de salida del módulo VOLPOT, corresponden al perfil de tensiones con y sin regulación de acuerdo a lo establecido en la figura 4.30 y a la solución entregada para el control en el tiempo de los condensadores.

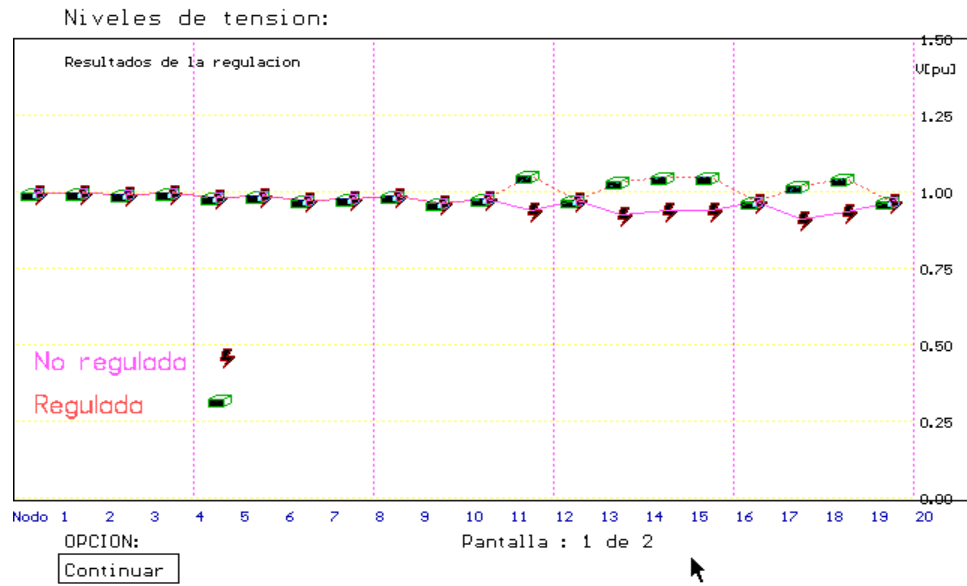


Figura 4.36 Nivel de tensión

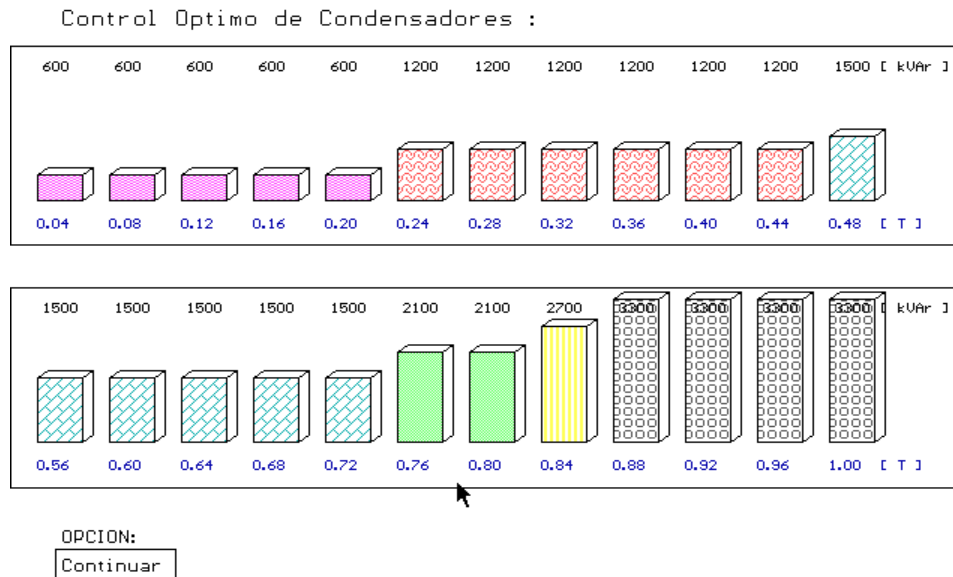


Figura 4.37 Control óptimo de condensadores

## **V. AIDPRI EN UN SISTEMA DE INFORMACIÓN**

### **5.1 Generalidades**

Los sistemas de distribución de energía eléctrica incluyen gran cantidad de elementos, y puntos de consumo, por lo que la labor del ingeniero de distribución se ve dificultada y se hace tediosa, por la gran cantidad de información que se debe utilizar.

Por ello, se hace atractivo el crear sistemas computacionales de gestión de datos, para el diseño y estudio de los SDDE. Los sistemas de información deben incluir módulos para la administración de datos de la red, dibujo, modificación, y estudios eléctricos propiamente tales. En esta línea se centran los desarrollos que algunas empresas eléctricas Chilenas han iniciado.

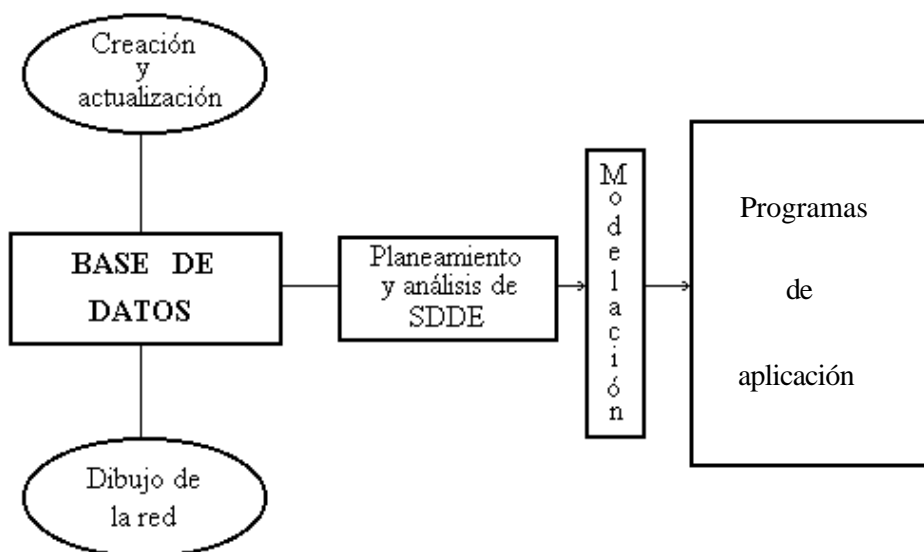
### **5.2 Un Sistema de Información de Red**

La confiabilidad y economía de la operación de las redes de distribución, ha llegado a ser cada día tan importante como la calidad del servicio. Esto significa que las compañías distribuidoras deben poseer herramientas eficientes para la administración de los datos de sus SDDE. La mayoría de las empresas distribuidoras no están dispuestas a destinar enormes cantidades de dinero, a fin de comprar grandes computadores, por ello un eficiente uso de la memoria del computador adquiere gran importancia.

Es decir con programas que ofrezcan una adecuada gestión de base de datos, se puede realizar tales operaciones en un P.C. estándar [1,45] .

La idea fundamental de un sistema de información de SDDE, es que todos los datos concernientes a las redes de distribución se almacenen en un sólo lugar, y de allí puedan ser accedados por cualquier rutina especializada, sin necesidad de redundar en almacenamiento.

Las partes principales de un sistema de información y diseño de la red son: la base de datos propiamente dicha, las rutinas de creación y actualización de datos, la de dibujo de la red, y la de filtrar los datos requeridos para cada programa de aplicación.



**Figura 5.1** Sistema de información y diseño de la red

### 5.3 Base de Datos de la Red y Arquitectura de Datos

La base de datos es una componente del sistema computacional, incluye los datos necesarios para el diseño de redes, dibujo del sistema y programas de aplicación. Está referido principalmente a la capacidad de almacenar información utilizada por el ingeniero en determinada red.

Paralelamente a la evolución de la AD, la gestión de datos ha ido evolucionando. Frente a esta realidad, es conveniente una arquitectura de datos orientada a la información tal como se demuestra con la siguiente tabla:

**Tabla V.1** Arquitectura de datos

<b>Arquitectura orientada a la información</b>	<b>Arquitectura orientada a la aplicación</b>
- Gestión de interface con el usuario - Herramientas de la interfaz	- Redundancia al almacenar los datos - Dificultad al desarrollo de nuevas funciones
- Gestor de aplicaciones - Herramientas para aplicaciones	- Interface básica con el usuario - Interface específica inserta en la aplicación.
- Gestor de información y modelos - Definición de modelos y métodos de acceso a los datos	- Algoritmos de aplicación - Modelos abstractos específicos implícitos en la aplicación
- Gestor de configuración - Elementos de entorno	- Accesos a datos específicos

Un aspecto relacionado con la organización de los datos y su tratamiento, es la forma en que estos datos han de ser presentados, tanto en su introducción, como en la salida de resultados.

#### **5.4 Aidpri como parte de un Sistema de Información**

La forma en que se construyó el paquete descrito en este trabajo, facilita la inclusión de AIDPRI en un sistema de información.

Efectivamente AIDPRI presenta los datos en forma clara, a través de tablas relacionales, en conjunto con menús de las opciones disponibles; los resultados se presentan en forma de histogramas, gráficos de barras, indicando claramente los parámetros involucrados.

Referente a la presentación de las imágenes, se comprobó que la técnica de puesta de pantalla gráfica a memoria produce los mejores resultados en cuanto a velocidad de presentación de gráficos, movimiento(scroll), etc., pero a costa de un consumo de memoria muy grande.

En el software desarrollado, los iconos son almacenados en coordenadas de elementos, dibujando cada vez la pantalla correspondiente. Esta técnica produce resultados menos vistosos en cuanto a velocidad, pero la memoria requerida es mucho menor.

AIDPRI almacena los datos agrupando los elementos que sean similares entre sí. Los datos de los SDDE se pueden modelar lo más exactos posibles, por ejemplo los consumos se pueden analizar de acuerdo al tipo de carga (residencial, comercial, o industrial).

La creación y mantenimiento datos de la red, utiliza gráficos computacionales además de comunicación interactiva e intuitiva. La base de datos utilizada no es un producto comercial, sino que se trata de uno especializado en la materia.

Al crear o actualizar los datos de los componentes de la red (en el dibujo), las coordenadas de estos también son almacenadas en la base de datos.

El paquete propuesto, cuenta con rutinas de mantenimiento de estructuras de datos amigables al usuario, favorece la ejecución rápida de aplicaciones, y elabora informes en formato ASCII [9].



## **VI. APLICACIÓN A UN SDDE REAL**

### **6.1 Introducción**

Para ilustrar las características y bondades del paquete reportado, se detalla el estudio de una red típica de distribución de la Compañía General de Electricidad Industrial (CGEI). Se describirá las condiciones de la red, se tendrán los datos topológicos, parámetros de los alimentadores, y consumos. En esta sección se adjuntan los principales gráficos necesarios para el análisis de la red mencionada.

### **6.2 Sistema CGEI**

El sistema en estudio corresponde a una típica red de distribución urbano-rural de CGEI. La red en cuestión tiene como nivel de tensión de distribución 15[kV], 75 nodos, y topología radial.

Las cargas en su mayoría son trifásicas, exceptuando cinco que son de naturaleza bifásica. Los transformadores trifásico bajan la tensión a 400[V] fase-fase para la distribución trifásica en BT.

Los transformadores monofásicos utilizados en las conexiones bifásicas, reducen el nivel de tensión a 231 [v] fase-neutro. El alimentador no posee retornos por tierra en MT, sin embargo posee compensación capacitiva en un nodo aguas abajo.

### 6.3 Estudio del Sistema CGEI

Para iniciar el estudio del sistema, existen dos posibilidades: una proceder a su construcción y edición de datos tal como se describió en el capítulo anterior, o caso contrario, recuperar uno de la base de datos, la cual se entiende editada con anticipación, tal como lo muestra la figura 6.1.

```

Recupera archivos PUBLICOS.
Seleccione el archivo a recuperar o una opcion.
Archivos de SISTEMAS disponibles...
1  S  A  E  S  A  C  O  D  1
2  S  A  E  S  A  U  S  E  R
3  S  A  E  S  A
4  C  G  E  I
5  F  R  O  N  T  E  L  C  .  Y  .
*** FIN DE ARCHIVOS PUBLICOS ***

```

+

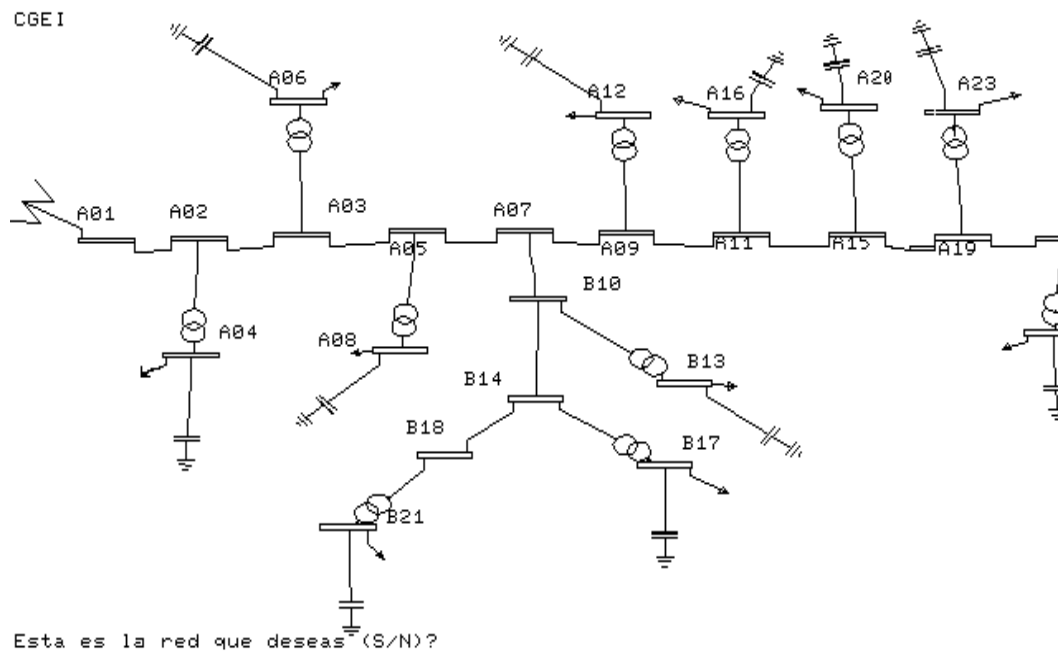
```

OPCIONES:-
Sale de recuperar archivos

```

**Figura 6.1** Recupera archivo CGEI

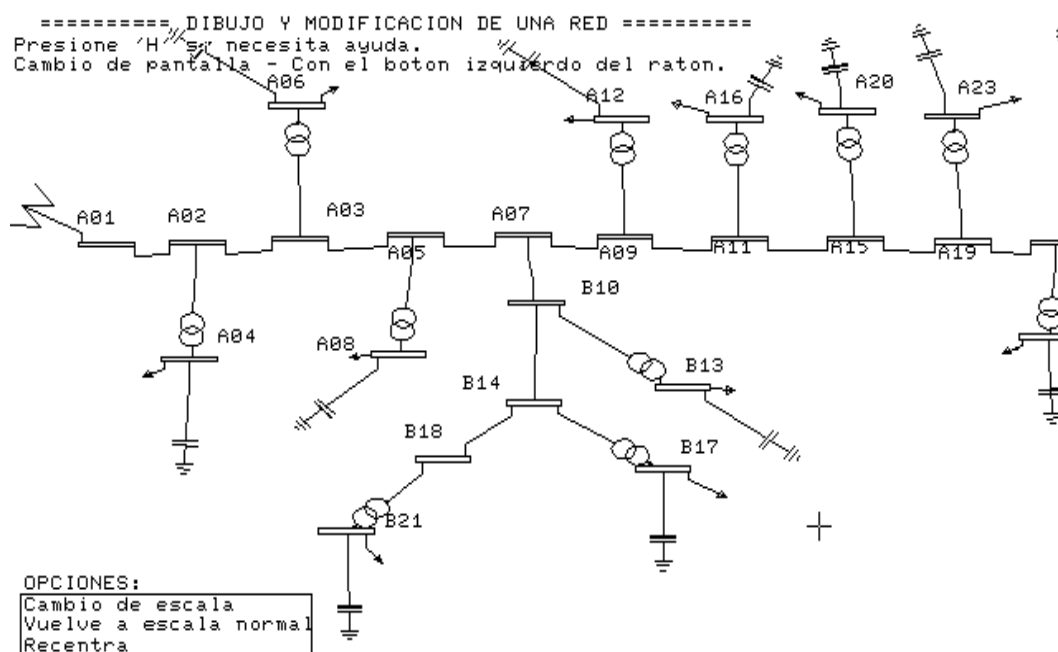
La red al ser relativamente grande, no alcanza a visualizarse completa en el monitor del computador. La figura 6.2 sólo visualiza parte de ella.



**Figura 6.2** Parte inicial del sistema CGEI

Es posible, en el algoritmo desarrollado deslizar la imagen de arriba a abajo, de izquierda a derecha (o viceversa), o sino utilizar el zoom de alejamiento o acercamiento. El ingeniero de distribución tiene muchas posibilidades de donde elegir.

La figura 6.3 muestra las opciones de visualización de redes tanto como recentrar y variar su escala.



**Figura 6.3** Opciones de dibujo

Con una de las posibilidades, anteriormente descritas, es que se logra en la figura 6.4, representar en su totalidad al sistema CGEI; se utilizó un factor de escala de 0.30.



**Figura 6.4** Red CGEI

Los consumos nominales del sistema se dan a continuación, los cuales serán evaluados por la rutina de modelación de carga, según el carácter del alimentador.

**Tabla VI.1** Consumos, nodos A01 al B17

DATOS DE NODOS :

Nodos	Carga[kW]	Carga[kVAR]
A01		
A02		
A03		
A04	64.80	31.40
A05		
A06	94.50	45.76
A08	180.00	87.18
A07		
A09		
A11		
A12	54.00	26.15
A16	21.60	10.46
A15		
A20	127.50	79.02
A19		
A23	11.25	
B10		
B13	86.40	41.85
B14		
B17	38.25	23.71

OPCIONES :

Redespliega
Pag.Prox.
Ayuda
Retorno

+

**Tabla VI.2** Consumos, desde el nodo B18 al C42

DATOS DE NODOS :

Nodos	Carga[kW]	Carga[kVAR]
B18		
B21	255.00	158.03
A22		
A25	12.75	7.90
A24		
A27	212.50	131.70
A26		
A29	127.50	79.02
A28		
A31	255.00	158.00
A30		
A33	17.00	10.53
A32		
A35	16.20	7.85
A34		
C36		
C39	54.00	26.15
C38		
C43	135.00	65.38
C42		

OPCIONES :

Redespliega
Pag.Prox.
Pag.Previa
Ayuda
Retorno

+

Al tratarse de varios datos, el programa automáticamente genera múltiples ventanas, a fin de visualizarlos con detalle.

**Tabla VI.3** Consumos, desde C47 al A61

DATOS DE NODOS :

Nodos	Carga[kW]	Carga[kVAR]
C47	8.50	5.26
C46		
C51	4.25	2.63
C50		
C53	12.75	7.92
A37		
A41	44.55	21.58
A40		
A45	135.00	65.38
A44		
A49	12.75	7.90
A48		
A52		
A55	1275.00	790.20
A54		
A57	63.75	39.51
A56		
A59	8.50	5.30
A58		
A61	17.00	10.54

OPCIONES :

Redespliega
Pag.Previa
Pag.Previa
Ayuda
Retorno

+

**Tabla VI.4** Consumos, del A60 al A75

DATOS DE NODOS :

Nodos	Carga[kW]	Carga[kVAR]
A60		
A63	12.83	6.21
A62		
A65	12.75	7.90
A64		
A67	127.50	79.01
A66		
A69	38.25	23.71
A68		
A70		
A72	255.00	158.03
A71		
A74	127.50	79.02
A73		
A75	30.38	14.71

OPCIONES :

Redespliega
Pag.Previa
Ayuda
Retorno

+

Los parámetros de los alimentadores, shunts y transformadores, se dan a continuación. Los datos de las líneas pueden ser ingresados por su respectivo código. El ingeniero de distribución, puede también ingresar los datos a su libre elección. AIDPRI permite especificar el tipo de conexión del consumo, es decir especifica si es monofásico, bifásico o trifásico.

Cuando el nodo inicial es similar al final, se está considerando un shunt instalado en ese lugar.

**Tabla VI.5** Shunts en el sistema CGEI

DATOS DE LINEAS, SHUNT Y TRANSFORMADORES :						
Inicio	Final	R[ohm/km]	X[ohm/km] o [kVAr]	T.Conex. (carga)	T.Linea	Largo [km] Ten.Base
A04	A04		75.0000			
A06	A06		150.0000			
A08	A08		250.0000			
B13	B13		100.0000			
B17	B17		45.0000			
B21	B21		300.0000			
A12	A12		100.0000			
A16	A16		30.0000			
A20	A20		150.0000			
A23	A23		25.0000			
A25	A25		15.0000			
A27	A27		250.0000			
A29	A29		150.0000			
A31	A31		300.0000			
A33	A33		20.0000			
A35	A35		30.0000			
C39	C39		100.0000			
C43	C43		200.0000			
C47	C47		10.0000			
C51	C51		5.0000			

+

OPCIONES :	
Redespliega	T.Conex. = Tipo de conexion del consumo ( 1 al 7 ).
Pag.Prox.	T.Linea = Tipo de conductor o transformador.
Ayuda	Para detalles elija ayuda.
Retorno	

**Tabla VI.6** Datos de líneas y shunts

DATOS DE LINEAS, SHUNT Y TRANSFORMADORES :

Inicio	Final	R[ohm/km]	X[ohm/km] o [kVAr]	T.Conex. (carga)	T.Linea	Largo [km] Ten.Base
C53	C53		15.0000			
A41	A41		45.0000			
A45	A45		150.0000			
A49	A49		15.0000			
A48	A48		450.0000			
A55	A55		1500.0000			
A57	A57		75.0000			
A59	A59		10.0000			
A61	A61		20.0000			
A63	A63		15.0000			
A65	A65		15.0000			
A67	A67		150.0000			
A69	A69		45.0000			
A72	A72		300.0000			
A74	A74		150.0000			
A75	A75		45.0000			
A01	A02			1	3	.10
A02	A03			1	3	.30
A02	A04	.0400		1	50	13200.00
A03	A05			1	3	.30

OPCIONES :  
 Redespiega  
 Pag.Prox.  
 Pag.Previa  
 Ayuda  
 Retorno

T.Conex. = Tipo de conexion del consumo  
 ( 1 al 7 ).  
 T.Linea = Tipo de conductor o transformador.  
 Para detalles elija ayuda.

**Tabla VI.7** Datos de líneas y shunts sistema CGEI

DATOS DE LINEAS, SHUNT Y TRANSFORMADORES :

Inicio	Final	R[ohm/km]	X[ohm/km] o [kVAr]	T.Conex. (carga)	T.Linea	Largo [km] Ten.Base
A03	A06		.0400	1	50	13200.00
A05	A07			1	3	.35
A05	A08		.0400	1	50	13200.00
A07	A09			1	3	.30
A07	B10			1	2	.20
A09	A11			1	3	.40
A09	A12		.0400	1	50	13200.00
A11	A15			1	2	.60
A11	A16		.0400	1	50	13200.00
A15	A19			1	2	.20
A15	A20		.0400	1	50	13200.00
A19	A22			1	2	.40
A19	A23		.0400	1	50	13200.00
A22	A24			1	2	.20
A22	A25		.0400	1	50	13200.00
A24	A26			1	2	.15
A24	A27		.0400	1	50	13200.00
A26	A28			1	2	.30
A26	A29		.0400	1	50	13200.00
A28	A30			1	2	.20

OPCIONES :  
 Redespiega  
 Pag.Prox.  
 Pag.Previa  
 Ayuda  
 Retorno

T.Conex. = Tipo de conexion del consumo  
 ( 1 al 7 ).  
 T.Linea = Tipo de conductor o transformador.  
 Para detalles elija ayuda.



**Tabla VI.8** Datos de líneas y shunts desde A28 al A59

DATOS DE LINEAS, SHUNT Y TRANSFORMADORES :

Inicio	Final	R[ohm/km]	X[ohm/km] o [kVAr]	T.Conex. (carga)	T.Linea	Largo [km] Ten.Base
A28	A31		.0400	1	50	13200.00
A30	A32			1	2	.20
A30	A33		.0400	1	50	13200.00
A32	A34			1	2	.40
A32	A35		.0400	1	50	13200.00
A34	A36			1	2	.10
A34	A37			1	2	.40
A37	A40			1	2	.40
A37	A41		.0400	1	50	13200.00
A40	A44			1	2	1.00
A40	A45		.0400	1	50	13200.00
A44	A48			1	2	.40
A44	A49		.0400	3	50	13200.00
A48	A52			1	2	.30
A52	A54			1	9	1.10
A52	A55		.0400	1	50	13200.00
A54	A56			1	9	.50
A54	A57		.0400	1	50	13200.00
A56	A58			1	9	.75
A56	A59		.0400	2	50	13200.00

## OPCIONES :

Redespliega  
Pag.Prox.  
Pag.Previa  
Ayuda  
Retorno

T.Conex. = Tipo de conexion del consumo  
( 1 al 7 ).  
T.Linea = Tipo de conductor o transformador.  
Para detalles elija ayuda.

**Tabla VI.9** Datos de líneas y shunts desde A58 al B18

DATOS DE LINEAS, SHUNT Y TRANSFORMADORES :

Inicio	Final	R[ohm/km]	X[ohm/km] o [kVAr]	T.Conex. (carga)	T.Linea	Largo [km] Ten.Base
A58	A60			1	9	.30
A58	A61		.0400	1	50	13200.00
A60	A62			1	9	.20
A60	A63		.0400	1	50	13200.00
A62	A64			1	9	.70
A62	A65		.0400	1	50	13200.00
A64	A66			1	9	1.20
A64	A67		.0400	1	50	13200.00
A66	A68			1	9	.80
A66	A69		.0400	1	50	13200.00
A68	A70			1	2	.50
A70	A71			1	2	1.50
A70	A72		.0400	1	50	13200.00
A71	A73			1	2	2.50
A71	A74		.0400	1	50	13200.00
A73	A75		.0400	1	50	13200.00
B10	B13		.0400	1	50	13200.00
B10	B14			1	2	.50
B14	B17		.0400	1	50	13200.00
B14	B18			1	2	.10

## OPCIONES :

Redespliega  
Pag.Prox.  
Pag.Previa  
Ayuda  
Retorno

T.Conex. = Tipo de conexion del consumo  
( 1 al 7 ).  
T.Linea = Tipo de conductor o transformador.  
Para detalles elija ayuda.

**Tabla VI.10** Datos de líneas y shunts desde B18 al C51

DATOS DE LINEAS, SHUNT Y TRANSFORMADORES :

Inicio	Final	R[ohm/km]	X[ohm/km] o [kVAr]	T.Conex. (carga)	T.Linea	Largo [km] Ten.Base
B18	B21		.0400	1		50 13200.00
C36	C38			1		2 1.20
C38	C42			1		2 .50
C42	C46			1		2 1.00
C46	C50			1		2 .20
C50	C53		.0400	4		50 13200.00
C36	C39		.0400	1		50 13200.00
C38	C43		.0400	1		50 13200.00
C42	C47		.0400	2		50 13200.00
C46	C51		.0400	3		50 13200.00

+

OPCIONES :

Redespiega  
Pag.Previa  
Ayuda  
Retorno

T.Conex. = Tipo de conexion del consumo  
( 1 al 7 ).  
T.Linea = Tipo de conductor o transformador.  
Para detalles elija ayuda.

Los parámetros requeridos de la fuente son:

DATOS EN FUENTE Y ADICIONALES :

Barra	V[base]	Vse[pu]	Cod. C.	F.C.A.	F.C.R.	Tol.Mod.	Tol.Ang.
A01	8545.000	1.000		.40000	.40000	.00010	.00045

Vse[pu] = Tension en la subestacion [ pu ].  
Cod. C. =Codigo del tipo de consumo.  
F. C. A. = Factor de carga activo.  
F. C. R. = Factor de carga reactivo.  
Tol. Mod. = Tolerancia en el modulo de la tension.  
Tol. Ang. = Tolerancia en el angulo de la tension.  
Para detalles elija ayuda.

OPCIONES :

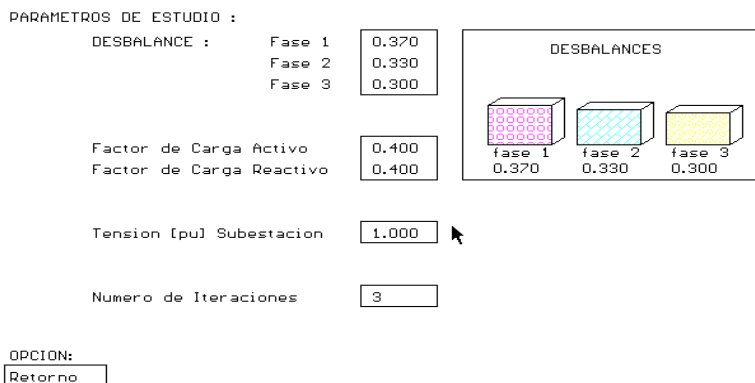
Redespiega  
Ayuda  
Retorno

+

**Figura 6.5** Parámetros en la subestación

## 6.4 Análisis Trifásico del Sistema

Los datos son los utilizados en [15], la tolerancia a utilizar para el flujo de potencia se recomienda que sea del orden de  $1E-4$ . Los desbalances asumidos son: 0.37, 0.33 y 0.30, sin retornos por tierra en MT. Se trabaja con factor de carga activo de 0.40 y reactivo de 0.40.



**Figura 6.6** Resultados generales de la simulación

Las empresas de distribución tienen por objetivo minimizar las pérdidas activas y reactivas, tratando de que estas sean menores de un 5% en lo referente a pérdidas activas. Es común encontrar SDDE con valores que varíen entre 10 y 15 % [54].

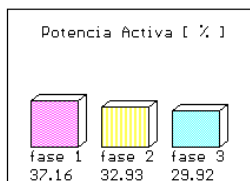
POTENCIAS ACTIVAS Y REACTIVAS :

Potencia Activa [ kW ]

Fase 1	610.522
Fase 2	541.022
Fase 3	491.631
Total :	1643.175

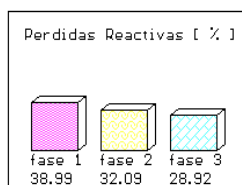
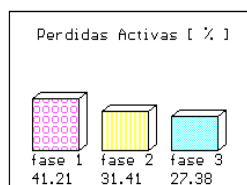
Potencia Reactiva [ kUAr ]

Fase 1	215.366
Fase 2	174.228
Fase 3	144.936
Total :	534.531



[ . ] Presione para continuar

**Figura 6.7** Potencias activas y reactivas



Perdidas Activas [ kW ]

Fase 1	26.114
Fase 2	19.908
Fase 3	17.350
Total :	63.371

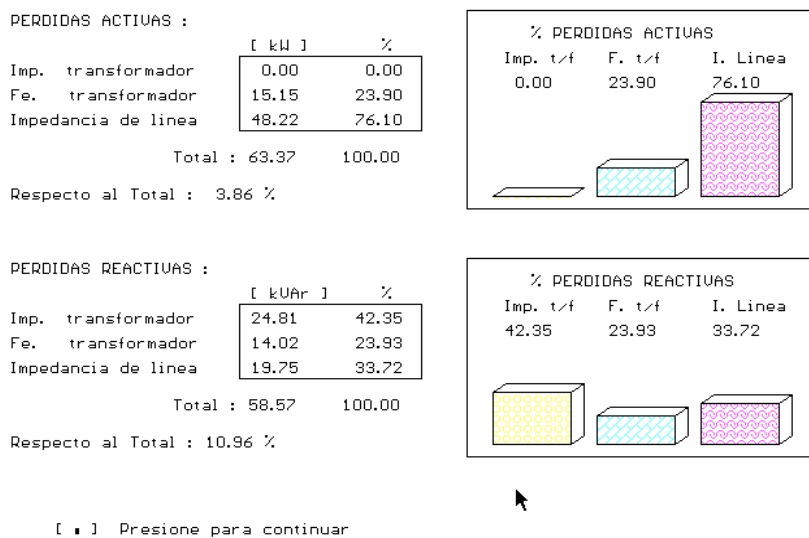
Perdidas Reactivas [ kUAr ]

Fase 1	22.84
Fase 2	18.79
Fase 3	16.94
Total :	58.57

Factor de potencia = 0.951

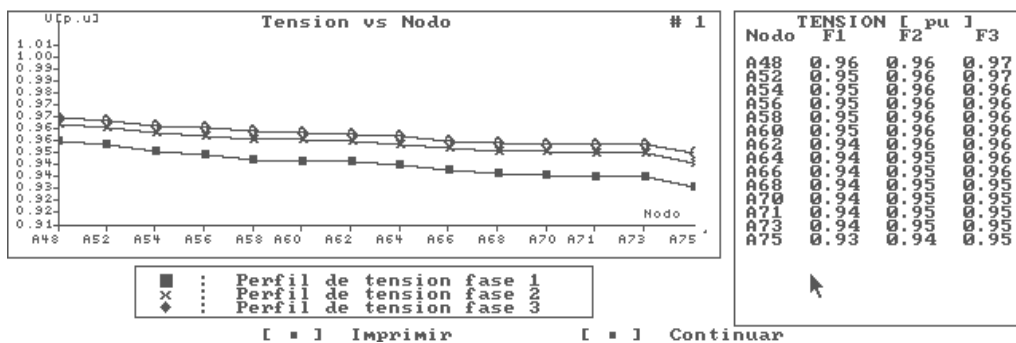
[ . ] Presione para continuar

**Figura 6.8** Pérdidas en el sistema y factor de potencia



**Figura 6.9** Pérdidas en el sistema respecto al total

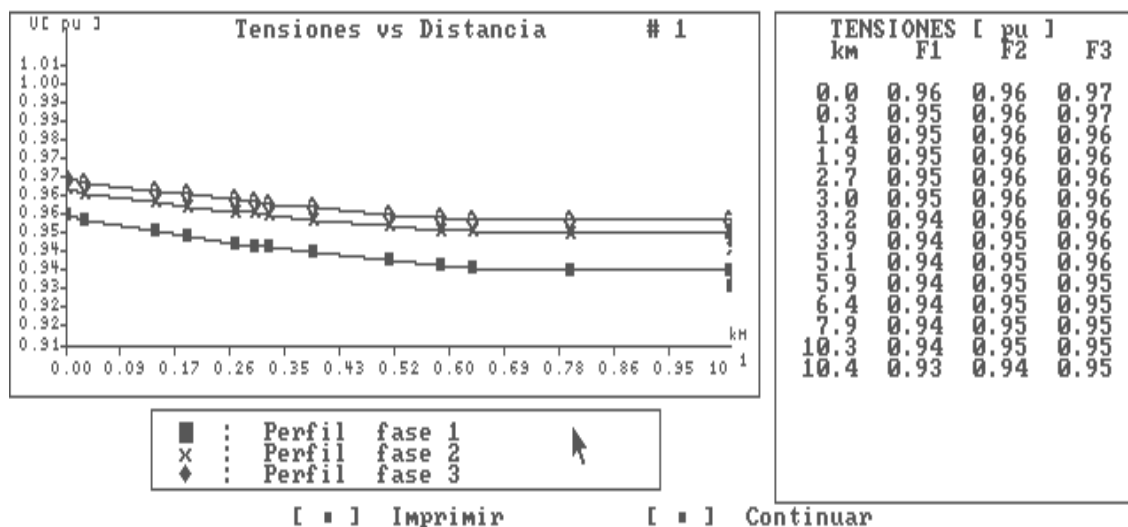
De acuerdo a lo establecido en el artículo 59° del Reglamento de Explotación, las variaciones de tensión respecto a los valores nominales, para sistemas de distribución, no debe exceder al + 7.5 % [53].



**Figura 6.10** Nivel de tensión versus nodo

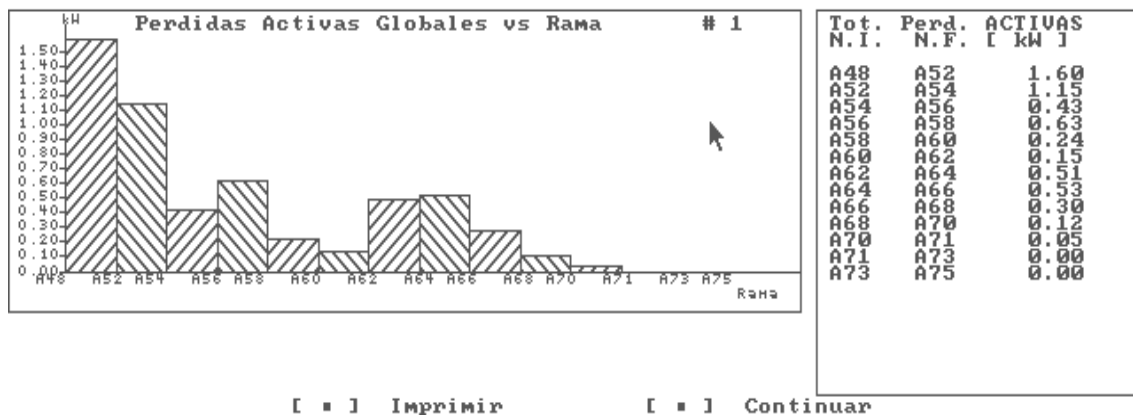
La figura 6.10 muestra que el nodo A75, el más lejano eléctricamente, no sobrepasa la caída de tensión del 7.5%, en ninguna de las tres fases.

El paquete computacional también cuenta con la opción de graficar el nivel de tensión versus la distancia, la cual es útil en la etapa de planeamiento de un sistema [19,26].

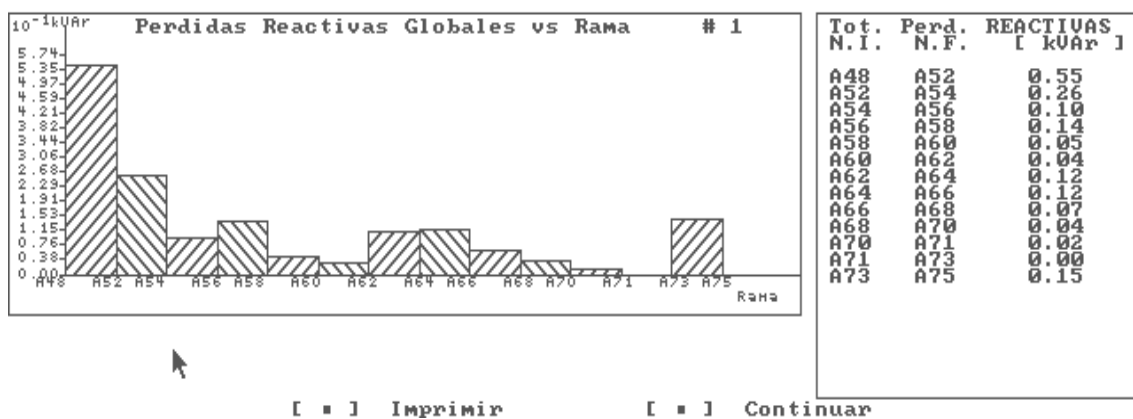


**Figura 6.11** Nivel de tensión versus distancia

En los siguientes histogramas, las pérdidas activas y reactivas pueden visualizarse en forma separada, y especificando el tramo que interese.



**Figura 6.12** Pérdidas activas versus rama



**Figura 6.13** Pérdidas reactivas versus rama

En las siguientes curvas, se presenta las pérdidas activas y reactivas, esta vez en función de las distancias.

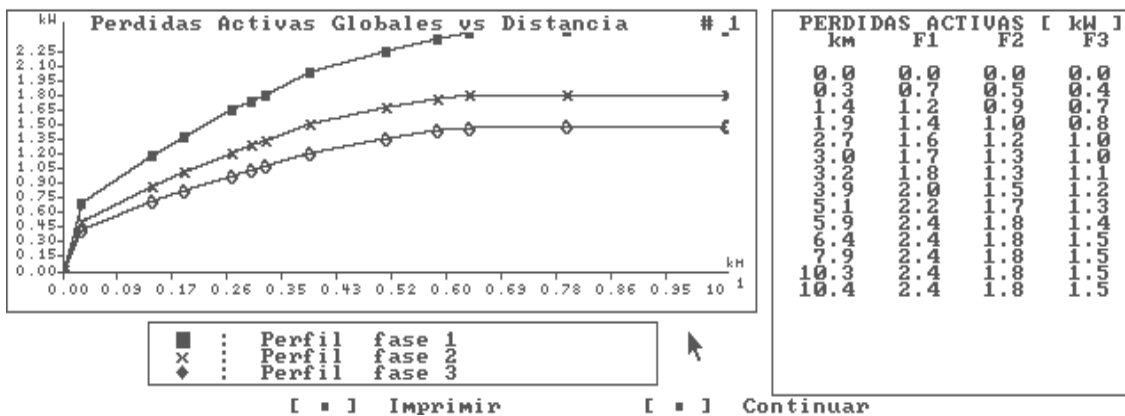


Figura 6.14 Pérdidas activas versus distancia

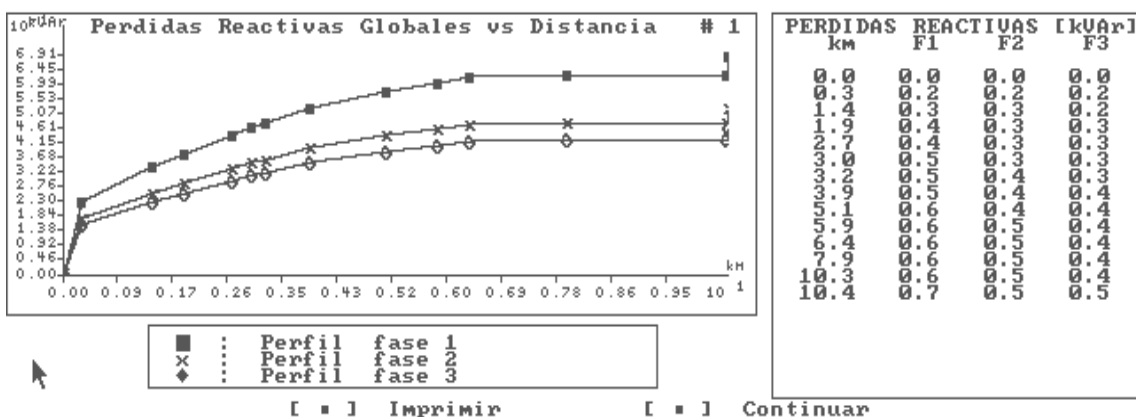
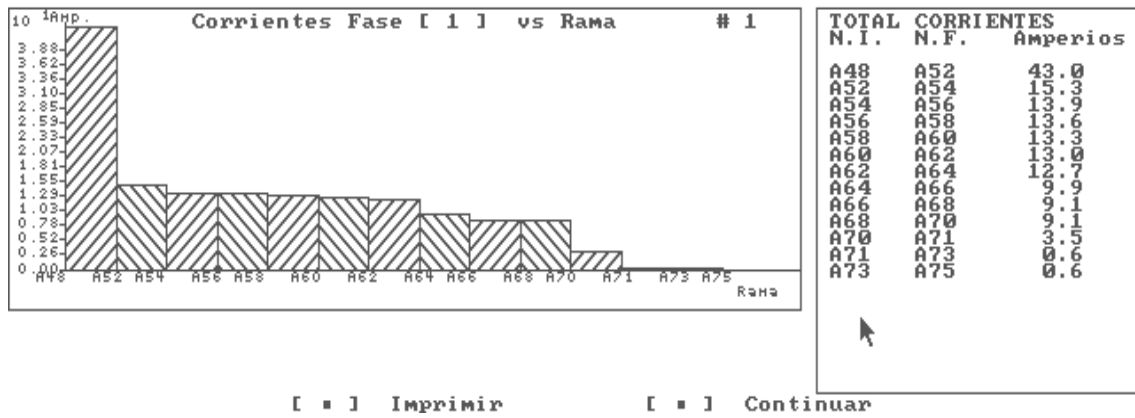


Figura 6.15 Pérdidas reactivas versus distancia

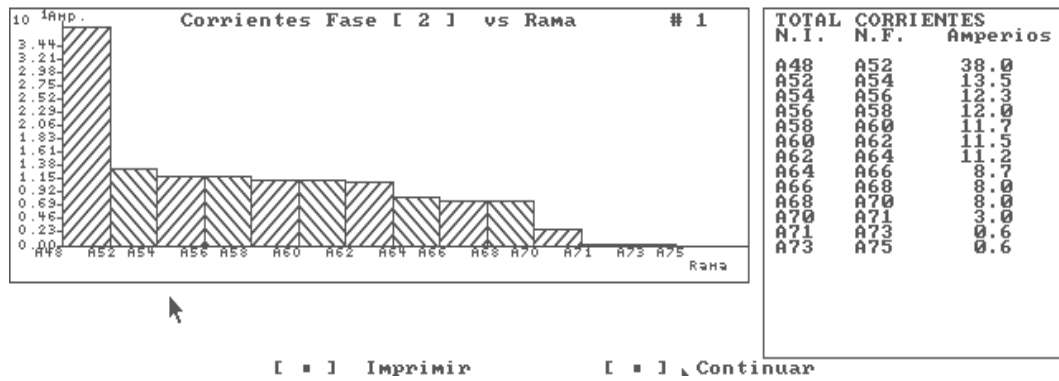
La intensidad de corriente eléctrica es un interesante parámetro a conocer, de ella dependen el dimensionamiento de los equipos, la caída de tensión, pérdidas, sección de conductores(planeamiento), etc. Para el caso en estudio, se tiene:



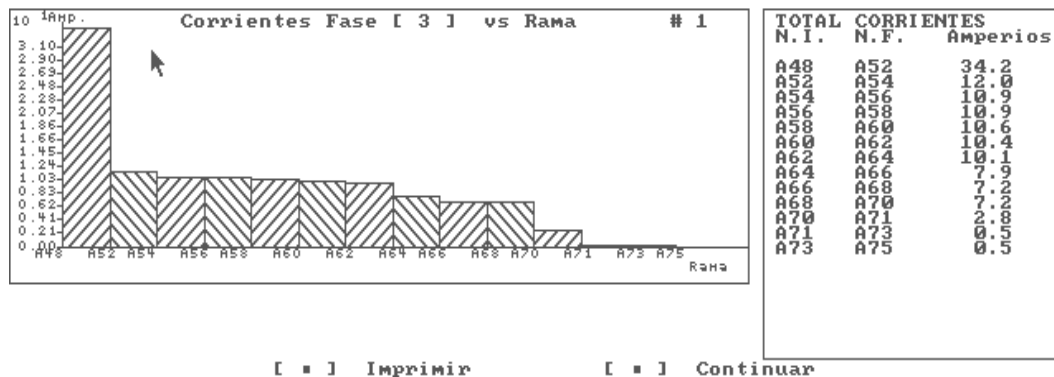


**Figura 6.16** Corriente fase uno en cada rama de la red

Los intensidad de corriente puede visualizarse por rama.



**Figura 6.17** Corriente de la fase dos en cada rama de la red



**Figura 6.18** Corriente fase tres en cada rama de la red

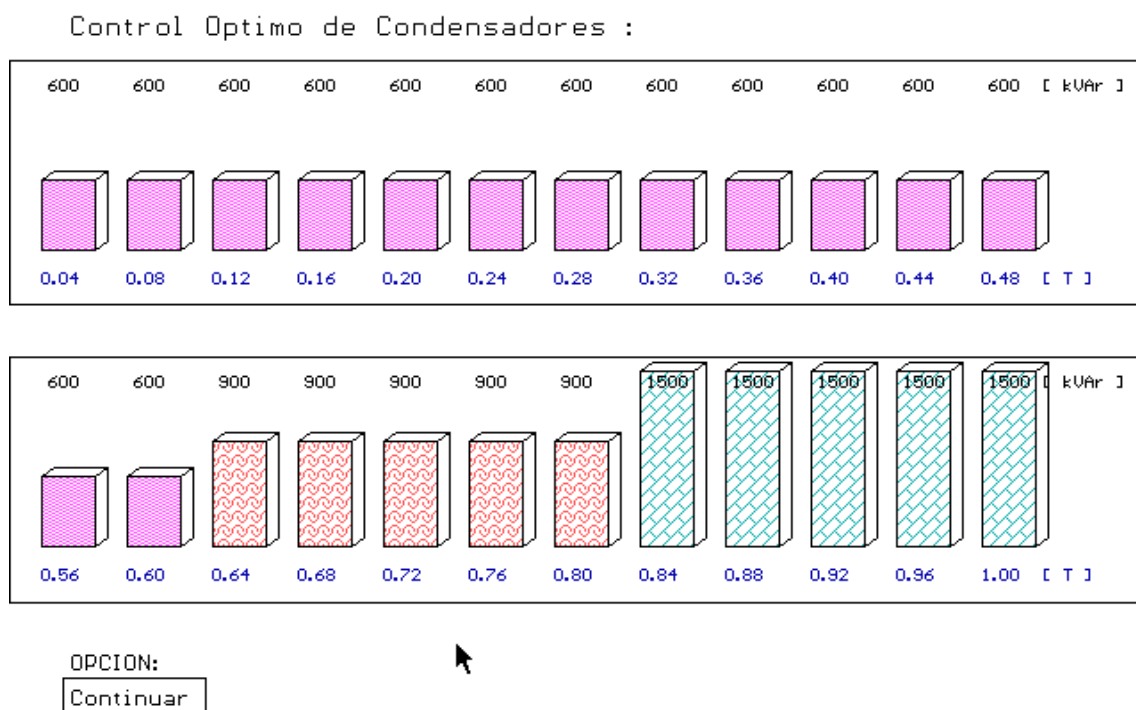
## 6.5 Ubicación y Tamaño de Condensadores

El paquete incorpora una opción de análisis de reactivos que permite determinar la localización, tamaño óptimo de condensadores, el control de los mismos así como la utilización de reguladores de tensión.

Como datos en el estudio CGEI, se utiliza para el factor de potencia, los costos de potencia, energía de punta, y costo de instalación de condensadores discretos. Estos valores son 0.9, 36.48 y 0.0289, respectivamente.

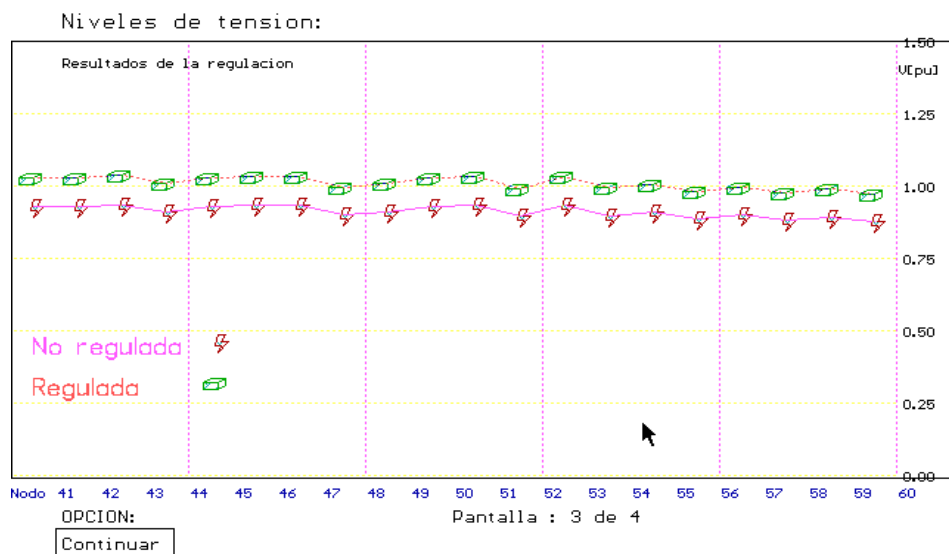
Se consideró un costo discreto de instalación de los dos condensadores. Se especificó que el nivel de tensión no varíe en más de 5%, tanto para el límite superior como para el inferior. Los resultados de la aplicación se encuentran a continuación.

Se determina que la ubicación óptima de los condensadores sería: un primero en el nodo A52, con un tamaño de 900[kVAr], y un segundo en el nodo A24, de 600[kVAr]. El control de los condensadores on/off en el tiempo es el siguiente:

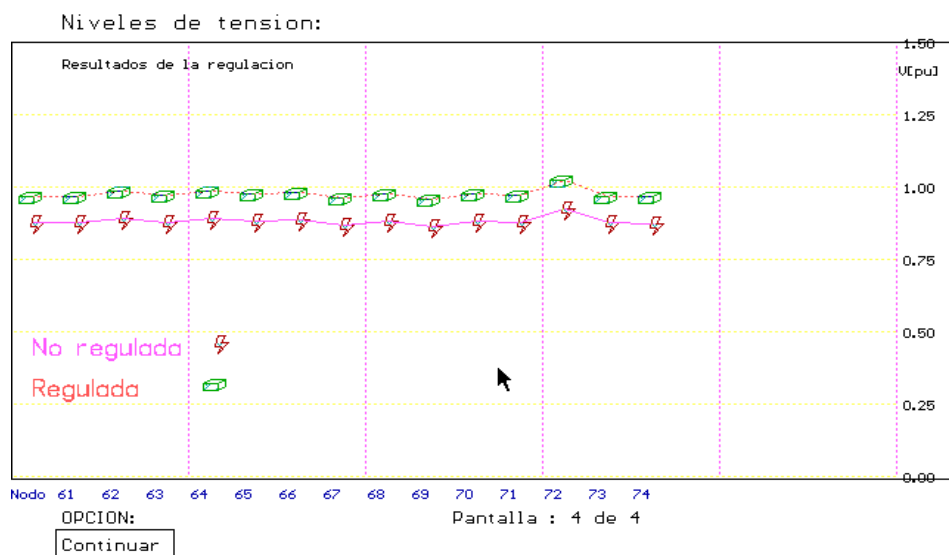


**Figura 6.19** Control de condensadores

Los resultados de la regulación de tensión, se visualizan en los siguientes figuras. Se determina el menor número de reguladores de tensión. El número óptimo de reguladores resultante es uno, el cual debe ubicarse en el nodo A26.



**Figura 6.20** Tensiones reguladas ventana 3



**Figura 6.21** Tensiones reguladas ventana 4

Los gráficos muestran el perfil total del nivel de tensión. El icono de rayo representa caída en el nivel de tensión no regulado, mientras que el paralelepipedo muestra el regulado.

## **6.6 Potencialidad de la Herramienta**

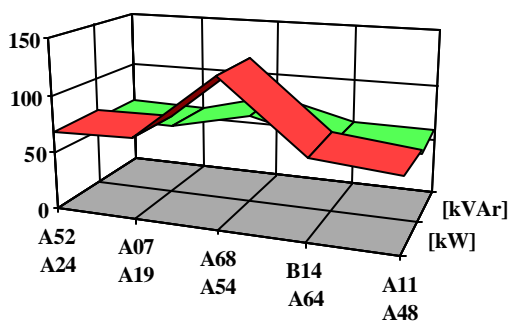
AIDPRI, es una herramienta de potencial que puede simular múltiples condiciones de operación. Además los cálculos los realiza con bastante rapidez, debido a la utilización de algoritmos especializados.

A continuación se presentan estudios comparativos del sistema CGEI, suponiendo una operación desbalanceada y otra balanceada, y además se analiza como influye esto en el comportamiento de la red.

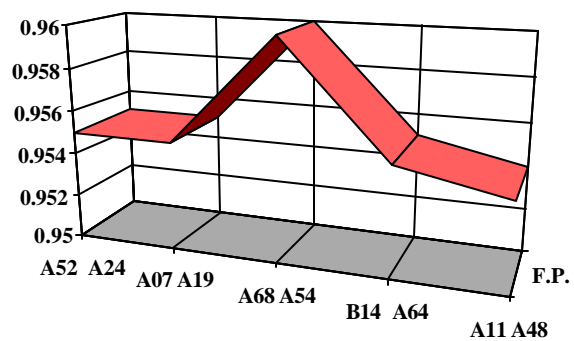
En las siguientes figuras se compara el efecto de ubicar dos condensadores ( 900 [kVAr] y 600[kVAr] ) en determinados nudos seleccionados en forma arbitraria.

El primer caso, ubicación de condensadores en A52 y A24 corresponde a la solución que el programa entrega como óptima.

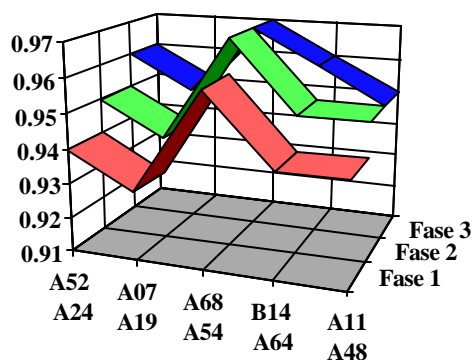
Estas primeras figuras corresponden al sistema desbalanceado.



**Figura 6.22** Pérdidas activas y reactivas para distintas ubicaciones de condensadores

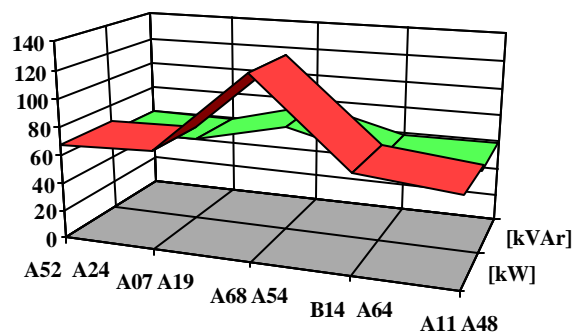


**Figura 6.23** Factor de potencia para distintas ubicaciones de condensadores

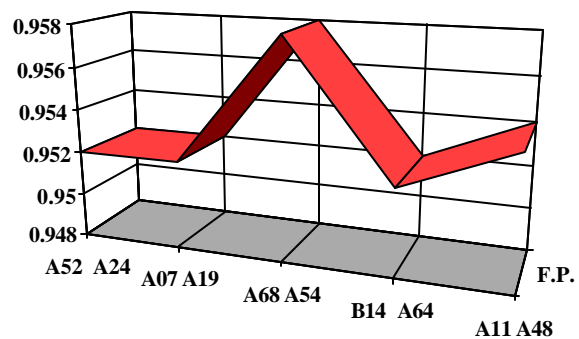


**Figura 6.24** Nivel de tensión por fase en el nodo A75 para distintas ubicaciones de condensadores

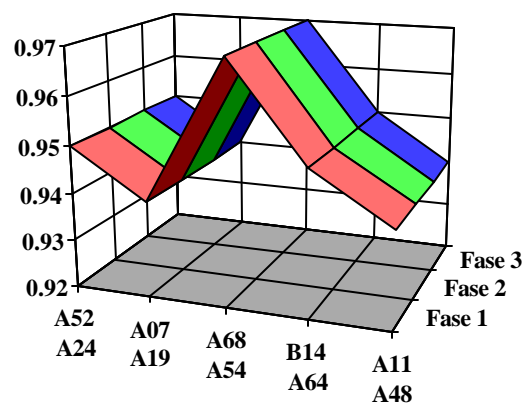
Los resultados que se presentan a continuación corresponden a la misma red, pero en esta oportunidad se considera el sistema balanceado.



**Figura 6.25** Pérdidas activas y reactivas para distintas ubicaciones de condensadores



**Figura 6.26** Factor de potencia versus ubicación de condensadores



**Figura 6.27** Nivel de tensión en el nodo A75 para distintas ubicaciones de condensadores



Los estudios presentados se realizan con suma facilidad, lo que permite al Ingeniero de Distribución suponer variadas condiciones de operación a fin de ir entrenándose para posibles condiciones reales de operación.

## **VII CONCLUSIONES Y COMENTARIOS**

### **7.1 Conclusiones**

El presente trabajo presenta el desarrollo y utilización de un paquete computacional para el diseño y estudio de redes de distribución eléctrica, utilizable en computadores personales. La utilización de interfaces interactivas e intuitivas, en el dibujo de la red y creación de la base de datos, y en el cálculo del flujo de potencia trifásico y análisis reactivo, hacen del programa una herramienta fácil de utilizar en un ambiente profesional.

De las simulaciones con los algoritmos propuestos en el anexo A, se concluye que el método Suma de Potencias es el adecuado para el estudio de SDDE, pues presenta eficientes características de rapidez y exactitud en su aplicación.

El análisis del flujo de potencia en conjunto con una rigurosa modelación de los elementos en los SDDE y una interfaz gráfica amigable proveen de resultados en forma de histogramas, rápidas y precisas.

AIDPRI integra las características de los sistemas de distribución, como son topología radial, R comparable a X, etc.

El programa propuesto permite hacer directamente análisis de las potencias activas y reactivas por fase a lo largo del alimentador, evaluar el factor de potencia, pérdidas en líneas y transformadores de distribución, niveles de tensión, etc. Las pérdidas en los transformadores incluyen pérdidas en la impedancia serie y en el núcleo.

El programa determina la localización, dimensionamiento y control en el tiempo de bancos de condensadores y transformadores con control de derivaciones bajo carga en SDDE, de tal forma que se maximicen las utilidades económicas derivadas de un ahorro en las pérdidas de energía. También cuenta con un adecuado resumen gráfico de resultados.

Con la utilización de AIDPRI se pueden realizar numerosos estudios, entre ellos se citan:

- análisis de sobrecarga
- estudios del nivel de tensión
- cálculo de pérdidas de potencia
- compensación capacitiva
- efecto del desbalance de carga, etc.

Se considera al programa numéricamente robusto, pues se obtuvieron resultados positivos al realizar simulaciones en los casos: CGEI, FRONTEL, SAESA y GRAINGER, con lo que queda corroborado la confiabilidad del programa en mención.

En el área de AD, se propone una nueva clasificación de funciones, atendiendo a la utilización de los recursos existentes para conseguir el funcionamiento correcto de la red (operación) y aquellas que atienden a las necesidades que van surgiendo (planificación).

La aplicación de interfaces gráficas interactivas, sumado a la utilización de diagramas unifilares, iconos y datos tabulados, facilitan la labor del ingeniero de distribución.

Se produce una efectiva retroalimentación en la construcción de un modelo de la red, pues la imagen permite la verificación topológica, ubicación de consumos y elementos reactivos en paralelo.

La herramienta también puede ser útil en un ambiente de docencia.

El programa es adecuado para la gestión y manejo de gran cantidad de datos, correspondientes a los diversos parámetros de las redes de distribución de energía eléctrica, pues cuenta con una adecuada administración de los parámetros involucrados.

Se publicó un resumen de la presente tesis en el X Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica, realizado en la ciudad de Valdivia, del 22 al 26 de Noviembre de 1993.

## 7.2 Desarrollo Futuro

Entre las opciones que se considera incluir a futuro en el programa destacan:

- reconfiguración óptima de alimentadores,
- ubicación óptima de subestaciones y
- diseño óptimo de redes de distribución.

También parece atractiva la posibilidad de relacionar el paquete con bases geográficas, tipo GIS (Geographic Information Systems)

Podría considerarse la construcción de la red eléctrica vía digitalizador, conservando las mismas características interactivas.

El paquete integra tres módulos de programación, los que están en distintos lenguajes de programación. Una opción a futuro con miras a optimizar uso de la memoria y tiempo es reprogramar completamente los módulos, tarea que va más allá de los objetivos formulados en este trabajo.

**ANEXO**

## **ANEXO A**

### **FLUDIS**

Flujos en distribución (FLUDIS) es un programa interactivo de propósito general, destinado a resolver problemas de flujos de potencia en sistemas radiales de distribución eléctrica, fue desarrollado en base a los algoritmos propuestos en [11].

El código fuente está escrito en lenguaje C++.

#### **ESTRUCTURA DEL PROGRAMA**

FLUDIS se divide en tres bloques principales, que son: ESCA, CORR, y POTE, estos a su vez interactúan con los 'include': ENT\_WIN.RVS y DOBLEPOL.RVS.

#### **ENT\_WIN.RVS**

Esta cabecera(header) del programa se encarga del ingreso de datos que requiere FLUDIS, realiza la escritura en ficheros ASCII, y modela adecuadamente los consumos a través de las "ventanas de carga".

Cuenta con las siguientes rutinas:

**entra\_fp():** Rutina de entrada de datos por teclado; se le indica el número de tramos a estudiar, nivel de tensión en la fuente, los factores de carga activo y reactivo, datos de las líneas, resistencia, reactancia, información topológica, y el tipo de consumo. Si el usuario lo desea estos datos serán escritos en un archivo.

**lector\_fp():** Rutina de entrada de datos, similar al anterior, pero ésta lo hace a través de la lectura de un archivo.

**cabecera():** Encargado de escribir en el monitor, los datos del sistema de distribución, como son nodos de salida, llegada, resistencia reactancia, longitud de la línea, y tipo de consumo.

**intro():** Control de pantalla, pues si excede determinado número de datos, congela la imagen.

**pito():** Función de alerta, indica alguna acción impropia ó congelamiento de pantalla.

**ven\_p():** Ventana de carga activa que contiene los modelos polinomiales, en función del nivel de tensión, de los distintos tipos de consumo. FLUDIS permite cuatro códigos: 0 si P o Q son constantes, 1 si el consumo es del tipo residencial, 2 en caso de ser comercial y 3 si es industrial.



**ven\_qu():** Ventana de carga reactiva, análoga al anterior.

## **DOBLEPOL.RVS**

Conjunto de rutinas (include) dedicado exclusivamente a las operaciones fasoriales básicas necesarias por ESCA, CORR y POTE, trabaja en el modo de doble precisión. Devuelve sus resultados en forma polar y rectangular.

## **DESCRIPCIÓN DE LOS DATOS**

FLUDIS orienta al operador en el ingreso de datos a medida que avanza en el programa.

El archivo de datos generado por el programa tiene la siguiente estructura.

```

Archivo.:LIBER_V.DAT
2 10000.00  0.0000  0.42  0.45
=====
                Calle_Libertad_salida_1_con_ventanas
=====
                DATOS DEL SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN
                Nodos Resistencia Reactancia Longitud Consumos
tr..nsal.nlle..[ohm/m].....[ohm/m].....[m].....[watts].....[vars].....TC
1 2  21  9.8250e-04  4.6000e-04  135.000  135000.00  65383.48  1
2 21 22  9.8250e-04  4.6000e-04  350.000   90000.00  43588.90  1
=====rcvs=====

```

Como primer dato, en el fichero se tiene el nombre del archivo, el número siguiente indica la cantidad de tramos de la red, luego siguen el módulo del nivel de tensión en la fuente con su respectivo ángulo, y los factores de carga activo y reactivo respectivamente. Se tiene a continuación una línea divisoria, para dar entrada al comentario del sistema en estudio.

Otra línea indica el paso a los datos propiamente dichos del sistema de distribución, como son: información topológica (tramo, nodo de salida y llegada), resistencia, consumos, y tipo de carga. El archivo de datos se cierra con una línea conteniendo las iniciales del programador.

Los datos que asume el programa computacional por defecto son: la potencia base igual a 100 [kVA] y la tolerancia para la convergencia igual a  $1E-5$ . El número máximo de iteraciones es de 100. El archivo de salida es sencillo de interpretar, presenta en forma secuencial las respuestas obtenidas, como son nivel de tensión para cada nodo, corrientes en los tramos ya definidos, flujos de potencia, pérdidas, y los datos generales, como son el número de iteraciones de convergencia del método, las bases asumidas, tolerancia, y factores de carga.

## **REQUERIMIENTOS**

Se recomienda al menos el uso de un computador AT 80386, con monitor VGA.

## MODELACIÓN UTILIZADA EN FLUDIS

Un alimentador típico en distribución involucra unas tres fases y/o dos fases y una fase única en líneas laterales. La mayoría de alimentadores son cargados de una manera no-balanceada, esto causa dificultad en el análisis de un alimentador en distribución, porque los métodos convencionales de componentes simétricas se tornan difíciles de utilizar [34].

En los alimentadores de distribución, las pérdidas ocurren por las siguientes razones:

- pérdidas en las líneas por fase en los conductores,
- pérdidas en el conductor de tierra y tierra,
- pérdidas en el núcleo del transformador y por fugas,
- pérdidas excesivas debido a escasez de coordinación de los elementos reactivos,
- pérdidas excesivas de acuerdo a las características de carga,
- pérdidas excesivas debido a la carga no-balanceada de las fases.

La selección conveniente de la sección de los conductores limita las pérdidas en la línea.

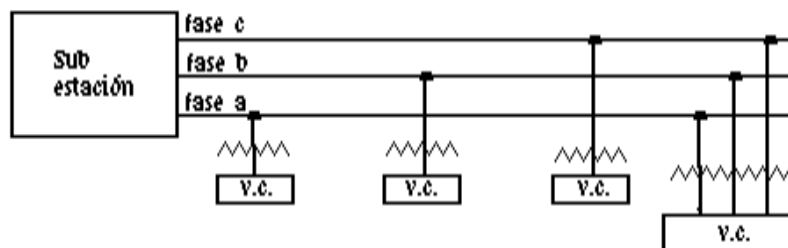
La introducción de sistemas monofásicos, y sistemas bifásicos causan pérdidas adicionales en los conductores a tierra. Las cargas no balanceadas también adicionan pérdidas en línea, en el conductores de tierra.

Las pérdidas en los núcleos de los transformadores de distribución son sensibles a la magnitud de la tensión del sistema; la calidad del transformador también afecta en las pérdidas en el núcleo. Debido a que las cargas varían del día a la noche y de estación a estación, el factor de potencia a lo largo del alimentador también varía.

Las características de carga también juegan un rol importante en las pérdidas del sistema. Durante los períodos de carga máxima, la tensión a lo largo del alimentador puede caer significativamente por debajo de los valores nominales. Es importante conocer las características de carga, para poder realizar un modelo más exacto y calcular las pérdidas de potencia, y por consiguiente mejorar la eficiencia del sistema.

La modelación utilizada en el programa se divide en cuatro principales categorías: cargas; líneas y cables; transformadores de distribución; elementos shunt var (modelo del condensador shunt).

Un método para acomodar la composición de carga, que varía por día, hora, estación, etc., es usado en el presente trabajo. El modelaje de todos los circuitos de distribución en una base por fase permite una representación más exacta del sistema para cargas monofásicas, o trifásicas. Un distintivo importante de este procedimiento de modelación es la capacidad para modelar cargas no-balanceadas, particularmente para cargas trifásicas.



**Figura A.1** Modelación de carga en alimentadores.

En una "ventana de carga" se incorpora la carga total, que debe ser previamente identificada por métodos apropiados de reconocimiento, encuestas, conocimiento general de las características de carga y su composición, etc. El porcentaje de los elementos individuales en la demanda total es dependiente de la época del año del día, la localización geográfica, condiciones socioeconómicas, etc.

La calidad y cantidad de información concerniente a las cargas varía entre empresas eléctricas.

El concepto de "ventana de carga" a una base por fase, permite un nivel más detallado de modelos de carga, los cuales son importantes para un análisis con mayor precisión de las pérdidas de potencia en la red.

Todas las principales aplicaciones y equipos en residencias, industriales y comercios son expresados como consumo de potencia activa (P) y reactiva (Q).

Las demandas de estas potencias son función de varios factores. Sobresalen aquí las variaciones con respecto al valor nominal de tensión y frecuencia. Esta funcionalidad puede aproximarse mediante modelos polinomiales, generalmente de segundo y tercer orden en dichas variables.

En la tabla A.1, se entregan los detalles de dichos modelos. Los modelos presentados corresponden a investigaciones efectuadas por el Electric Power Research Institute (EPRI).

Los métodos de J.R. Carson y W.A. Lewis son usados para calcular las impedancias de los circuitos tanto para los conductores aéreos como para los subterráneos, con neutro y retorno por tierra.

Los transformadores monofásicos son representados por una serie de impedancias de fuga y en función de pérdidas en el núcleo en el terminal secundario. Los circuitos equivalentes de los transformadores trifásicos son modelados como tres transformadores monofásicos conectados en estrella, con las pérdidas en el núcleo representadas en cada terminal de carga.

**Tabla A.1** Síntesis de los componentes de modelos de carga en régimen permanente.

TIPO DE CARGA	POTENCIA ACTIVA	POTENCIA REACTIVA
TRANFOR. DE DISTR. (PERD.NUCLEO)	$0.00346 V + 0.01164*\Delta V + 0.0474*\Delta V^2 + 0.0709*\Delta V^3$	$0.001 +(7.4 + 61.8*\Delta F - 64*\Delta F^2)*10^{-10} * \text{EXP}((15.25 -24*\Delta F + 152*\Delta F^2)*(1.0 + \Delta V))$
LUZ FLUORESCENTE	$(0.545 + 0.455*\tanh(15.0*(\Delta V+ 0.203)))*(1.0 +\Delta F)*(1.0 + \Delta V)^{0.9}$	$( 8.7 + 66765*(\Delta V + 0.25)^4)^{-1} -0.588*(1.0 + \Delta V)^2 * (1.0+ \Delta F)^{-1} + (0.0486 + 0.166*\Delta V -0.36*\Delta F^2) * \text{EXP}((2.58 - 6.7*\Delta F + 10*\Delta F^2) * (1.0 + \Delta V))$
LUZ INCANDESCENTE	$1.0 + 1.552*\Delta V + 0.459 * \Delta V^2$	0
REFRIGERACIÓN	$0.798 + 0.606*\Delta V + 1.146*\Delta V^2 + 0.418*\Delta F - 2.69*\Delta V*\Delta F$	$0.624 + 1.540*\Delta V + 3.37*\Delta V^2 - 0.889*\Delta F - 7.37*\Delta V*\Delta F$
LAVADORAS SECADORAS	$0.995 + 2.03*\Delta V + 0.990*\Delta V^2 + 0.590*\Delta V^3$	$0.130 + 0.425*\Delta V + 0.669 * \Delta V^2 + 0.467*\Delta V^3 - 0.342*\Delta F - 0.670*\Delta V*\Delta F$
CARGA RESISTIVA	$1.0 + 2.0*\Delta V + 1.0*\Delta V^2$	0
CALEFACCIÓN	$0.992 + 1.553*\Delta V + 0.848*\Delta V^2 + 0.508*\Delta F - 0.747* \Delta V * \Delta F$	$0.146 + 0.349*\Delta V + 1.173\Delta V^2 -0.1701*\Delta F -3.44*\Delta V*\Delta F$
AIRE ACONDICIONADO (TIPO VENTANA)	$0.828 + 0.3871*\Delta V + 1.623*\Delta V^2 + 0.466*\Delta F - 2.39*\Delta V*\Delta F - 2.39*\Delta V * \Delta F$	$0.571+1.407*\Delta V +3.22*\Delta V^2 + 6.34*\Delta V^3 +44.48*\Delta V^4 -1.604*\Delta F - 11.74*\Delta V * \Delta F$
AIRE ACONDICIANDO (MONOFÁSICO)	$0.964 + 0.1943*\Delta V + 1.6*\Delta V^2 - 8.78*\Delta V^3 + 0.869*\Delta F - 2.09*\Delta V*\Delta F$	$0.234 + 0.538*\Delta V + 6.77*\Delta V^2 - 6.31*\Delta V^3 - 0.624*\Delta F - 9.12*\Delta V*\Delta F$
AIRE ACONDICIONADO (TRIFÁSICO)	$0.887 + 0.0783*\Delta V + 0.311*\Delta V^2 + 0.869*\Delta F -2.09*\Delta V*\Delta F$	$0.473 +1.185*\Delta V +4.621*\Delta V^2+ 2.074*\Delta V^3 - 0.624*\Delta F - 9.12*\Delta V*\Delta F$

Para el propósito de modelación, los condensadores pueden ser tratados como elementos de admitancia constante en una base por fase (en una conexión estrella), permitiendo que los kVAr inyectados a la red varíen con la tensión de la barra. Otro modelo sería, suponer una inyección constante de kVAr independiente de la tensión en el nodo, dentro de un determinado porcentaje de variación de la tensión. Este es el que frecuentemente se usa en distribución y es el que se utiliza en este trabajo.

## **MÉTODOS DE FLUJO DE POTENCIA RADIAL**

Existen numerosos algoritmos, reportados para los sistemas de distribución radial[11,27].

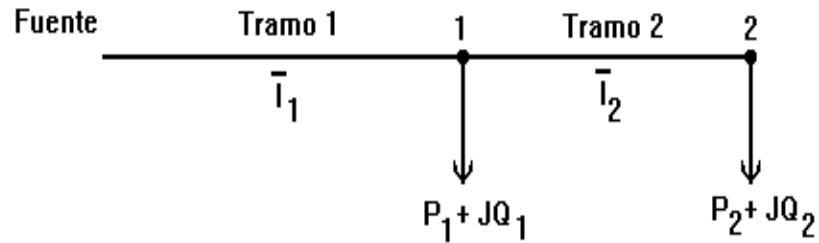
Se presentan los algoritmos más comunes, a fin de realizar un estudio comparativo; tales métodos son: método escalera, método de suma de corrientes y el método de suma de potencias. El último de los nombrados esta detallado en el ítem 4.6.

### **EL MÉTODO ESCALERA**

Fue propuesto inicialmente por Kersting y otros [11]. Este método presenta un procedimiento en reversa, hacia la fuente, cuando las tensiones nodales son calculados por simple adición de caídas de tensión y luego aplicando una corrección para contabilizar y dar la magnitud de la fuente de tensión.



Las ecuaciones siguientes son desarrollados para tres nodos, dos secciones de línea, y un sistema monofásico.



**Figura A.2** Sistema radial con dos tramos

$$\bar{I}_{2[k]} = \frac{\bar{S}_2^*}{\bar{V}_{2[k]}^*} \quad [1]$$

$$\bar{V}_{1[k]} = \bar{V}_{2[k]} + \bar{Z}_2 \bar{I}_{2[k]} \quad [2]$$

$$\bar{I}_{1[k]} = \left[ \frac{\bar{S}_1}{\bar{V}_{1[k]}} \right]^* + \bar{I}_{2[k]} \quad [3]$$

$$\bar{V}_s[k] = \bar{V}_{1[k]} + \bar{Z}_1 \bar{I}_{1[k]} \quad [4]$$

$$\text{Error} = \left| \bar{V}_s - \bar{V}_s[k] \right| \quad [5]$$

$$\bar{V}_{2[k+1]} = \bar{V}_{2[k]} + \text{Error} \quad [6]$$

En cualquier iteración  $k$ , la  $V_{err}(k)$  es chequeada para la convergencia. Si se presentan laterales, existen sub-iteraciones ejecutables en cada lateral, las cuales deben realizarse en cada iteración principal.

## EL MÉTODO SUMA DE CORRIENTES

El presente algoritmo de flujo de potencia, fue reportado por Shirmohammadi y otros [55]. Usa un procedimiento ágil después de sumar las corrientes en las secciones de línea. Usando la figura B.2 y comenzando con los estimados iniciales para todas las tensiones nodales ( $k=0$ ), las corrientes de tramo de línea son calculados de las corrientes de carga.

$$\bar{I}_{2[k]} = \frac{\bar{S}_2^*}{\bar{V}_{2[k]}^*} \quad [7]$$

$$\bar{I}_{1[k]} = \left[ \frac{\bar{S}_1}{\bar{V}_{1[k]}} \right]^* + \bar{I}_{2[k]} \quad [8]$$

Ahora empezando del nodo fuente, las otras tensiones son recalculadas,

$$\bar{V}_{1[k++]} = \bar{V}_s - \bar{Z}_1 \bar{I}_{1[k]} \quad [9]$$

$$\bar{V}_{2[k++]} = \bar{V}_{1[k++]} - \bar{Z}_2 \bar{I}_{2[k]} \quad [10]$$

La convergencia es verificada para cada tensión nodal

$$\left| \bar{V}_{1[k++]} - \bar{V}_{1[k]} \right| \leq \varepsilon \quad [11]$$

$$\left| \bar{V}_{2[k++]} - \bar{V}_{2[k]} \right| \leq \varepsilon \quad [12]$$

Cuando los laterales están presentes, la división de corrientes tiene que ser asumida en un punto bifurcación.

## REFERENCIAS

- [1] PARTANEN, J., JUUTI P. y LAKERVI, E. (1992) **A User Friendly Network Information System for Public Electricity Distribution Systems.** Power Engineering Group, Tampere University of Technology, Finlandia.
  
- [2] CHAN, K. y DING J. (1990) Interactive network planning and analysis on a personal computer. **IEEE CAP, Vol. 3, N° 1, 43-47.**
  
- [3] YU, D. C., CHEN, S., y KALSCHEUR, R. (1990) A PC based interactive graphical simulation and analysis package for a power plant electrical auxiliary system. **IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 5, N° 2, 628-631.**
  
- [4] LANDMAN, R. y LOUIE, B. (1992) Fiberoptic SCADA system safeguards underground distribution network. **IEEE CAP, Vol.5, N° 2, 39 - 44.**
  
- [5] CHAN, S. (1990) Interactive graphics interface for power system network analysis. **IEEE CAP, Vol. 3, N° 1, 34-38.**
  
- [6] IMHOF, K. y ARIAS, C. (1990) Show It with colors connectivity, status, and value information in energy management systems. **IEEE CAP, Vol. 3, N° 4, 11-16.**

- [7] LAKERVI, E. y HOLMES, E.J. (1989) **Electricity Distribution Network Design**. Peter Peregrinus Ltd. on behalf of the Institution of Electrical Engineers, Inglaterra.
- [8] CEGREL, T. (1992) Automatización de sistemas electricos : sistemas SCADA/EMS. **Departamento de Sistemas de Control Industrial Royal Institute of Technology**, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [9] ALVAREZ, C. y ROLDAN, C. (1992) Eficiencia seguridad y calidad en los sistemas de distribución. **Departamento de Ingeniería Eléctrica Universidad Politécnica de Valencia, España**. Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [10] CEGRELL, T. (1986) **Power System Control Technology**. Prentice Hall International, EE.UU.
- [11] KHAN, A. H., BROADWATER, R. P. y CHANDRASEKARAN A. (1988). A comparative study of three radial power flow methods. **Proceedings of the IASTED International Symposium, High Technology in the Power Industry**. Arizona EE.UU.

- [12] RUDNICK, H. y MOYA, O. (1978) **Aplicación de Computadoras al Análisis y Control de Sistemas Eléctricos de Potencia**. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [13] RUDNICK, H. (1975) Flujos de potencia. **Departamento de Ingeniería Eléctrica**, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [14] MUÑOZ, C. (1989) **Flujo de Potencia Trifásico para Sistemas de Distribución**. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Electricista. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [15] CASTILLO, M. y PARDO, G. (1989) **Control de Voltajes y Potencia Reactiva en Sistemas de Distribución**. Memoria para optar el título de Ingeniero Civil de Industrias mención Eléctrica. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [16] CARVAJAL, R. (1989) **Instalación Óptima de Reactivos en Una Red de Distribución para Minimización de Pérdidas**. Memoria para optar el título de Ingeniero Civil Electricista. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad de Chile.
- [17] PERKINS, P. E. (1989) **Hands on CAD**. Cassell Publishers Ltd. Artillery House. Artillery Row. London Swip IRT. Londres.

- [18] SCOTT y SCOTT (1991) **Distribution Primary Analysis / Graphics**. Scott and Scott Integrated Software Solutions. Seattle, WA 98121-2375. EE. UU.
- [19] GÖNEN, T. (1986) **Electric Power Distribution System Engineering**. McGraw Hill Book Company. EE. UU.
- [20] BARKER, P. P., TRAGER, B. J., y REDMON, J.R. ( 1988 )  
Communications systems for distribution automation. **IEEE tutorial Course DISTRIBUTION AUTOMATION 88EH0280-PWR** EE. UU.
- [21] CALE, K. (1976) **Interactive Power Systems Analysis**. M.Sc. Thesis, Electrical Engineering Department, The University of Manchester Institute of Science and Technology, Inglaterra.
- [22] WEISKAMP, K. (1989) **Power Graphics Using Turbo C**. John Wiley and Sons, Inc. Canada.
- [23] CEBALLOS, J. (1991) **Curso de Programación C++ Orientada a Objetos**. Rama Editorial Ctra de Canillas, Madrid.
- [24] O'BRIEN, S. (1991) **Turbo Pascal 6 : The Complete Reference**. McGraw-Hill , Inc. EE.UU.

- [25] N.,L y E.,I (1984) **Enciclopedia Practica de la Informatica**. Ediciones Nueva Lente y Ediciones Ingelek, S.A. Madrid.
- [26] PANSINI, A. (1987) **Basic Electrical Power Distribution**. Vol. 1-2. Hayden Book Company Inc. EE.UU.
- [27] CESPEDES, R. (1990) New method for the analysis of distribution network. **IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5**, No 1, 391 - 396.
- [28] FINK, D.G., BEATY, H.W. y CARROLL, J.M. (1984) **Manual Practico de Electricidad para Ingenieros**. Editorial Reverté, España.
- [29] CLINARD, K.N. (1986) An overview of distribution automation. **Rural Electrical Power Conference**. IEEE 86-CH-2316-8. EE. UU.
- [30] RAMIREZ, I. J. (1991) **Computer Aid Design of Electric Power Distribution Networks: Solutions Via Multiobjective Optimization**. Ed. Universidad de Zaragoza España.
- [31] SMITH, W. M. (1989) Utility planning perspectives: a review. **IEEE Transaction on Power Systems, Vol. 4**, N° 2, 452 - 456.

- [32] BUNCH, J., DEMIAN, L., y FIEDLER, H. (1985) Distribution automation. **IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol PAS-104**, N° 11, 3169 - 3175.
- [33] Mc CALL, L. (1988) Distribution automation functions. **IEEE Tutorial Course Distribution Automation**, 88 EH0280-8-PWR EE.UU.
- [34] SUN, D. I. H., ABE, S., SHOULTS, R. R., CHEN, M.S., EICHENBERGER y FARRIS D. (1980) Calculation of energy losses in a distribution system. **IEEE Trans on PAS, Vol. PAS-99**, N° 4. 1347-1356.
- [35] BARAN, M. E. y WU, F. (1989) . Optimal sizing of capacitors placed on a radial distribution system. **IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4**, N°1, 735 - 743.
- [36] BARAN, M. E. y WU, FELIX (1989). Optimal capacitor placement on radial distribution systems. **IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 4**, N°1, 725 - 734.
- [37] CIVANLAR, S. y GRAINGER, J. (1985) Volt/Var control on distribution systems with lateral branches using switched capacitors and voltage regulators, part I: the overall problem. **IEEE Trans. on PAS, Vol. 104**, N° 11, 3278 -3283.



- [38] CIVANLAR, S. y GRAINGER, J. (1985). Volt/Var Control on distribution systems with lateral branches using switched capacitors and voltage regulators, part II: the solution method. **IEEE Trans. on PAS, Vol. 104**, N°11, 3284 - 3290.
- [39] CIVANLAR, S. y GRAINGER, J. (1985) Volt/Var control on distribution systems with lateral branches using switched capacitors and voltage regulators, part III: the numerical results. **IEEE Trans. on PAS, Vol. 104**, N°11, 3291- 3297 .
- [40] KAPLAN, M.(1984) Optimization of number, location,size, control type and control setting of shunt capacitor on radial distribution feeders. **IEEE Trans. on PAS, Vol. 103**, N° 9, 2659 - 2665.
- [41] SKM (1992) **DAPPER DISTRIBUTION ANALYSIS FOR POWER PLANNING EVALUATION AND REPORTING**. SKM Systems Analysis, Inc. Power Tool, Electrical Engineering Software, EE.UU.
- [42] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACION, INN - CHILE (1983) **Norma Chilena Oficial NCH 712.OF72, Arquitectura y Urbanismo - Simbolos eléctricos para planos**. Descriptores: Planos, simbolos, ingeniería eléctrica, INN. Matías Cousiño No. 64, 6º piso, Santiago, Chile.

- [43] GRASS, J. E (1992) Analisis y diseño Orientado al Objeto. **XV Taller de Ingenieria de Sistemas, XII Congreso de Metodologias en Ingenieria de Sistemas, I Encuentro de Ingenieros Civiles Industriales.** Departamento de Ingenieria Industrial, Universidad de Chile.
- [44] BAEZA, R. (1992) Interfaces gráficas. **XV Taller de Ingenieria de Sistemas, XII Congreso de Metodologias en Ingenieria de Sistemas, I Encuentro de Ingenieros Civiles Industriales.** Departamento de Ingenieria Industrial, Universidad de Chile.
- [45] BROADWATER, R., THOMPSON, J., y McDERMOTT, T. (1991) **Pointers and Linked Lists In Electric Power Distribution Circuit Analysis.** Bradley Department of Electrical Engineering, Virginia Polytechnic Institute and State University Blacksburg, EE.UU.
- [46] GRAINGER, J., CIVANLAR, S. y CLINARD, K. (1984) Optimal voltage dependent continuous-time control of reactive power on primary feeders. **IEEE Trans. on PAS, Vol. 103, N° 9, 2714 - 2722.**
- [47] RUDNICK, H., CASTILLO, M., y PARDO, G. (1990) Ubicación optima de reactivos en redes de distribución. **Tercer Seminario IEEE Ingeniería de Potencia.** Universidad Técnica Federico Santa María, 204 - 209, Chile.

- [48] RUDNICK, H. y MUÑOZ, M. (1990) Influence of modeling in load flow analysis of three phase distribution systems. **Proceedings of the 1990 IEEE Colloquium in South America**, 173 - 176, Chile.
- [49] MUÑOZ, C. y RUDNICK, H. (1989) Programa de Flujo de Potencia Trifásico para Sistemas de Distribución.. **Anales del VIII Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica**. Universidad del Bio Bio, 206 - 211, Chile.
- [50] EDSA (1992) **The Power Behind the Design**. EDSA Micro Corporation, 1751 St. Johns Ct. Bloomfield Hills, Michigan 48302 U.S.A.
- [51] BELENGUER, E. (1992) **Entorno Informático Orientado a Objetos para la Gestión de la Distribución de Energía Eléctrica**. Proyecto F.C. ETSII-UPV 1992. España.
- [52] ROJAS A. R. (1987) **Flujo de Carga para Sistemas de Distribución Eléctrica**. Trabajo para optar al título de Ingeniero Civil Electricista. Universidad Técnica Federico Santa María. Valparaíso, Chile.
- [53] INSTITUTO NACIONAL DE NORMALIZACIÓN(1991). **Manual Oficial de Normas Técnicas Eléctricas Vigentes en la República de Chile. Electricidad Tensiones Normales para Sistemas e Instalaciones NSEG 8. E.n. 75**. Vimaya Editores. Amunátegui 31 - Of. 701. Santiago.

- [54] RUDNICK, H., MOYA, R., y INOSTROZA, J. (1989) IEE 3350  
Sistemas de Distribución. **Copias del curso del Departamento de Ingeniería Eléctrica.** Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [55] SHIRMOHAMMADI, D., HONG, H. W., SEMLYEN, A., y LUO  
G.X. J. (1988) A compensation based power flow method for weakly  
meshed distribution and transmission networks. **IEEE Trans. PAS., Vol. 3,**  
N° 2, 753-762.
- [56] VILCAHUAMÁN, R. (1990) **Programas.** Publicaciones HC -  
2001, Editorial ASIEMA. Huancayo - Perú