

# INTERFACE INTERACTIVA EN LA UBICACIÓN ÓPTIMA DE CONDENSADORES EN SDDE

**Raúl Vilcahuamán S.**

Escuela de Post Grado -Departamento de Ingeniería Eléctrica  
Universidad Nacional del Centro del Perú  
Fax: (++51)(64) 891032  
Real 160, Huancayo, Perú  
[r.vilcahuaman@ieee.org](mailto:r.vilcahuaman@ieee.org)

**Hugh Rudnick V.D.W.**

Departamento de Ingeniería Eléctrica  
Pontificia Universidad Católica de Chile  
Fax: (++56)(2) 5522563  
Casilla 306, Correo 22, Santiago, Chile  
[h.rudnick@ieee.org](mailto:h.rudnick@ieee.org)

## 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. 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 propuesto por Grainger y Civanlar que permite ubicar y dimensionar bancos de condensadores reduciendo pérdidas y caídas del nivel de tensión. Se determina el mínimo banco de condensadores requeridos así como estrategias de conexión y desconexión que permitan 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 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. The program incorporates complete models for the electric components. The problem of volt/var control is solved with a 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 capacitor 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.

## 1. INTRODUCCION

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 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**[8].

La razón principal de utilizar gráficos interactivos es la velocidad de interpretación de los resultados y la comunicación entre el usuario y la computadora. Los datos se entienden mejor en forma de gráficos, histogramas que en forma tabular. Entendidas estas ventajas es que se han desarrollado los programas interactivos gráficos para el análisis, diseño y enseñanza de los sistemas eléctricos de potencia[2].

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 [1,4].

## 2. LOS SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

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. Las redes de distribución presentan características muy particulares, que las diferencian de las de transmisión.

Entre estas se distinguen: topologías radiales, razón R/X alta, múltiples conexiones(monofásicas, bifásicas, etc.), estructura lateral

compleja, cargas de distinta naturaleza, líneas sin transposiciones, cargas distribuidas, etc.[18].

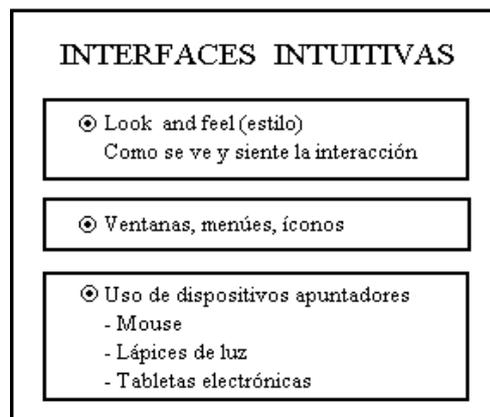
Dada la complejidad creciente de los sistemas de distribución, las empresas eléctricas han ido incorporando en forma creciente esquemas de automatización, control y medida remota de las redes. Se entiende por automatización de la distribución(AD), a la aplicación de las técnicas y recursos necesarios para que el sistema de distribución en conjunto pueda ser operado y controlado remotamente, coordinando el uso de sus distintos elementos en tiempo real. Los factores que motivan esto son fundamentalmente económicos y están asociados al énfasis que se pone hoy en día en lograr el uso eficiente de las instalaciones disponibles y aplazar lo más posible mientras sea económicamente justificable, la realización de nuevas construcciones e inversiones. Adicionalmente, ha aumentado la necesidad de ofrecer un suministro más seguro de energía, así como mejorar las técnicas de control de los sistemas y la calidad del servicio eléctrico ofrecido [1,4].

### 3. INTERFACE INTERACTIVA GRÁFICA EN SDDE

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[14,17].

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.



**Fig. 3.1** Interfaces intuitivas

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.

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

Es importante que la interfaz desarrollada, sea intuitiva, y cuente con botones, menús e iconos, los cuales son fáciles de interpretar y utilizar [17].

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 [1,6,14].

### 4. CONTROL DEL NIVEL DE TENSIÓN Y POTENCIA REACTIVA EN SDDE

Es conocido el hecho que el control del nivel de tensión y potencia reactiva juega un rol importante dentro de los esquemas de distribución automatizada que están desarrollándose. Los altos costos de generación y distribución de energía obligan a que se ponga especial atención en el control de demanda punta que se enfrenta el sistema y de las pérdidas de energía a lo largo del tiempo. La reducción de pérdidas de potencia y energía es un tópico de interés para toda empresa eléctrica, independiente del punto de la cadena generación-consumo final en que se encuentre. Desarrollos en distribución automatizada vía computadoras en las subestaciones y sistemas de recolección de información detallada sobre el sistema permiten reducir en forma efectiva las pérdidas que se producen en el sistema, mediante el control en tiempo real del perfil del nivel de tensión y del flujo de corrientes reactivas a lo largo del sistema[1,9,10,11].

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.

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 [19,1,10,11].

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: [9,10] y la modelación de los elementos esta detallada en [1].



Fig. 4.1 Diagrama de bloques del modelo reactivo desacoplado

La figura 4.1 muestra el diagrama de bloques del modelo reactivo desacoplado [9,10]. En ella se utiliza una función de costos que puede expresarse como:

$$S = S_d + S_q \quad (1)$$

Un modelo desacoplado en que:

- $S_d$  corresponde a la localización del número mínimo de transformadores con control de derivaciones bajo carga y
- $S_q$  corresponde a la determinación de la localización, tamaño y control óptimos de "n" bancos de condensadores, se descompone el problema en dos sub problemas:

- optimizar  $S_d$  en términos de las variables del problema del regulador de tensión
- optimizar  $S_q$  en términos de las variables del problema capacitivo.

#### 4.1 Compensación Reactiva Óptima

Corresponde a la determinación de la localización, tamaño y control óptimos de  $n$  bancos de condensadores de forma que se maximice la siguiente función:

$$S_q = K_p LP_q + K_e LE_d - \sum_{i=1}^n K_c (I_{ca}^o) I_{ca}^o \quad (2)$$

donde

$$LP_q = r \sum_{i=1}^s \int_0^4 \left( F_q^d(y_i, T)^2 - (F_q^{rc}(y_i, T) - F_{cq}^{rc}(y_i, T))^2 \right) dy_i \quad y$$

$$LE_d = r \int_0^T \sum_{i=1}^s \int_0^4 \left( F_q^d(y_i, \tau)^2 - (F_q^{rc}(y_i, \tau) - F_{cq}^{rc}(y_i, \tau))^2 \right) dy_i d\tau$$

Bajo el supuesto que:

$$V_i^{rc}(\tau) = V^{op}, \quad V_{\min} \leq V^{op} \leq V_{\max} \quad (5)$$

De la referencia [9], la componente real de la corriente capacitiva es muy pequeña:

$$F_{cq}^{rc} \gg F_{cd}^{rc} \quad (6)$$

se tiene que la componente real de carga es:

$$F_d^{rc} - F_{cd}^{rc} \approx F_d^{rc} \quad (7)$$

la corriente de carga real es mayor que la componente reactiva cuando existe compensación óptima, es decir:

$$|F_d^{rc}| \gg |F_q^{rc} - F_{cq}^{rc}| \quad (8)$$

La corriente de carga reactiva para cada rama es:

$$F_q^{rc}(y_i, \tau) = F_q(y_i) \alpha(\tau) \quad (9)$$

donde:

$$F_q(y_i) = \sum_{j \in S(y_i)} \frac{Q_j}{V^{op}} \quad (10)$$

y  $Q_j$  es la potencia reactiva pico en la barra  $j$ , mientras  $S(y_i)$  es el grupo conteniendo los índices de todas los nodos, que necesitan ser calculados (distribución de corriente) a la distancia  $y_i$  a lo largo de la rama  $i$ .

#### 4.2 Regulación Óptima del Nivel de Tensión

El problema corresponde a la localización del número mínimo de transformadores con control de derivaciones bajo carga de forma que se maximice la siguiente función:

$$S_d = K_p LP_d + K_e LE_d \quad (11)$$

sujeto a las restricciones del nivel de tensión

$$V_{\min} \leq V_i^{rc}(\tau) \leq V_{\max} \quad (12)$$

$$0 \leq \tau \leq T; \quad i = 1, 2, \dots, m$$

donde:

$$LP_d = r \sum_{i=1}^s \int_0^4 \left( F_q^d(y_i, T)^2 - F_d^{rc}(y_i, T)^2 \right) dy_i \quad (13)$$

$$LE_d = r \int_0^T \sum_{i=1}^s \int_0^4 \left( F_q^d(y_i, \tau)^2 - F_d^{rc}(y_i, \tau)^2 \right) dy_i d\tau \quad (14)$$

Ambos problemas se pueden analizar en forma independiente, pero en la realidad ellos se encuentran relacionados y no pueden llevarse a la práctica uno sin el otro, debido a que el modelo de regulación requiere de la existencia de un sistema compensado y el problema de compensación necesita de un perfil del nivel de tensión dentro de una estrecha banda.

#### 5. ESTRUCTURA DE LA SOLUCIÓN

Con el problema desacoplado equivalente de la figura 4.1 asigna automáticamente el número de condensadores y determina cuáles deben ser conectados simultáneamente para el control óptimo. El algoritmo presentado en [9] incorpora en su función objetivo los costos no lineales de instalación de condensadores. Los transformadores con control de derivaciones bajo carga son dispositivos de muy alto costo comparado con el resto de los costos que se consideran en la maximización de la función objetivo  $S$ , por tanto se utilizará el mínimo número de transformadores de manera que el nivel de tensión a lo largo del sistema se mantenga dentro de los límites deseados [1,9,10]. Los condensadores cumplen también un papel importante en la regulación del nivel de tensión. Al abordar el problema de regulación se considera la presencia de bancos de condensadores y su control. La estructura de solución propuesta del problema desacoplado sigue los siguientes diagramas:

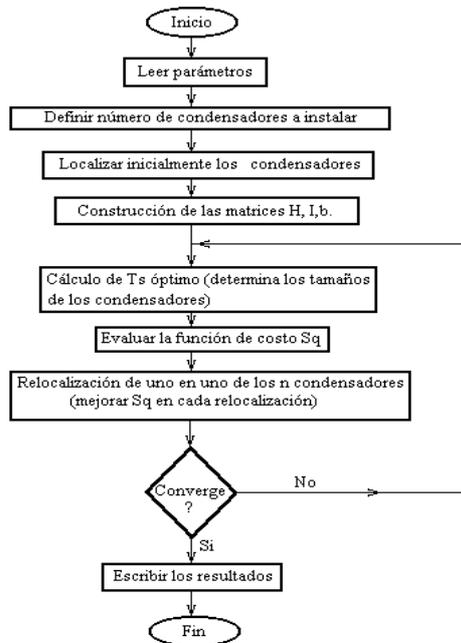


Fig. 5.1 Diagrama de bloques para la compensación[9,10]

Luego de terminar con esta etapa se procede a:

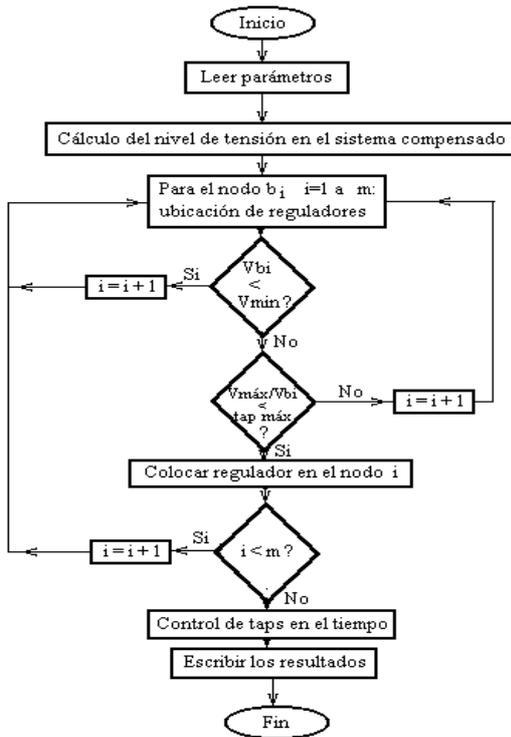


Fig. 5.2 Diagrama de bloques para la regulación[9,10]

## 6. SISTEMA EJEMPLO

Se detalla el estudio de una red típica de distribución eléctrica urbana, corresponde al Sistema Huancayo salida III, correspondiente a la compañía Electrocentro S.A. Los datos son de [13,20]. La red en cuestión corresponde a un alimentador radial, operando en 10 [kV]. El alimentador no posee retornos por tierra.

La figura 6.1 ilustra parte de la red visualizada en el monitor (la red al ser relativamente grande, no alcanza a visualizarse completa).

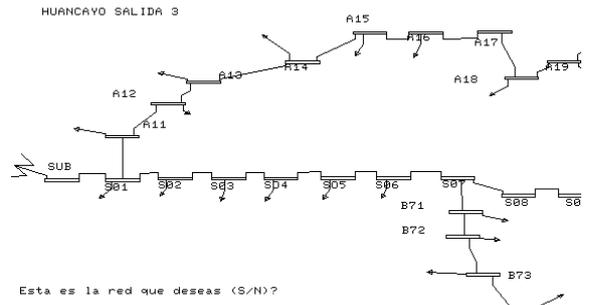


Fig. 6.1 Parte inicial del sistema Huancayo salida III

El programa AIDPRI (Análisis Interactivo Gráfico de Distribución Primaria)[1] ofrece la posibilidad de deslizar la imagen de arriba a abajo, de izquierda a derecha (o viceversa), y utilizar zoom de alejamiento o acercamiento. La figura 6.2 muestra la utilización de un factor de escala de 0.30.

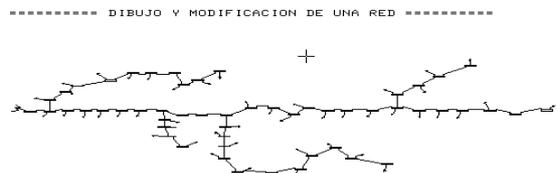


Fig. 6.2 Red Huancayo salida III

La siguiente figura muestra una ventana de datos de los alimentadores-líneas, shunts y transformadores. Los datos de las líneas pueden ser ingresados con códigos que representan conductores standard, o por medio de resistencias y reactancias entregadas por el usuario[1,3,4,14].

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
S20	S21	.6188	.4425	1	20	.20	
S21	S22	2.7931	.4775	1	20	.40	
S22	S23	2.7931	.4775	1	20	.34	
S23	S24	2.7931	.4775	1	20	.53	
S01	A11	.9825	.4600	1	20	.08	
A11	A12	.9825	.4600	1	20	.23	
A12	A13	.9825	.4600	1	20	.02	
A13	A14	.9825	.4600	1	20	.06	
A14	A15	.9825	.4600	1	20	.27	
A15	A16	.9825	.4600	1	20	.21	
A16	A17	.9825	.4600	1	20	.16	
A17	A18	.9825	.4600	1	20	.20	
A18	A19	.9825	.4600	1	20	.21	
A19	A20	.9825	.4600	1	20	.37	
S07	B71	1.5600	.4760	1	20	.23	
B71	B72	1.5600	.4760	1	20	.10	
B72	B73	1.5600	.4760	1	20	.20	
B73	B74	1.5600	.4760	1	20	.31	
S10	C01	.3890	.4210	1	20	.05	
C01	C02	.3890	.4210	1	20	.08	

OPCIONES :

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

Fig. 6.3 Datos de líneas, shunts y transformadores

Se ilustra una salida gráfica de las pérdidas dada por AIDPRI[1], los desbalances son 0.25,0.35 y 040, sin retornos por tierra, factor de carga activo y reactivo de 0.5.

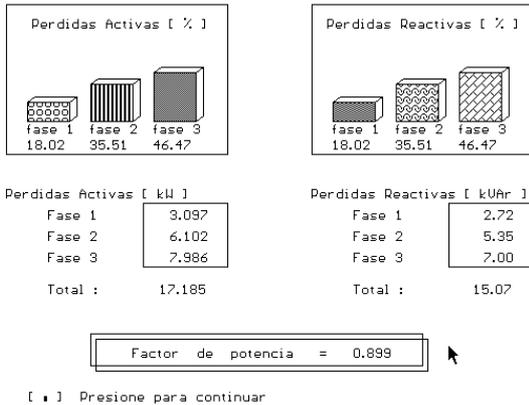


Fig. 6.4 Pérdidas en el sistema Huancayo salida III

En el análisis óptimo reactivo, como datos en el estudio Huancayo Salida III, se utilizará para el factor de potencia, los costos de potencia, energía de punta, y costos de instalación de condensadores discretos. Estos valores son 0.899, 120 y 0.030, respectivamente.

Se especifico que el nivel de tensión no varíe en mas de 5%, tanto para el límite superior como para el inferior. Los resultados de diversas simulaciones estan detalladas en la tabla I.

TABLA VI-I. LOCALIZACION Y TAMAÑO HASTA CUATRO CONDENSADORES

n	Sq	LOCALIZACIÓN				TAMAÑO			
		Lc. 1	Lc. 2	Lc. 3	Lc. 4	Tam 1	Tam2	Tam 3	Tam 4
1	41104	S10				1770			
2	64084	S10	S10			1400	1400		
3	38463	S10	A14	A11		1660	300	300	
4	37407	S10	A14	A11	S03	1620	300	300	300

El número óptimo de condensadores a instalar es de dos, y éste corresponde para un Sq máximo (máximo ahorro neto de costos por reducción de pérdidas de potencia y energía).

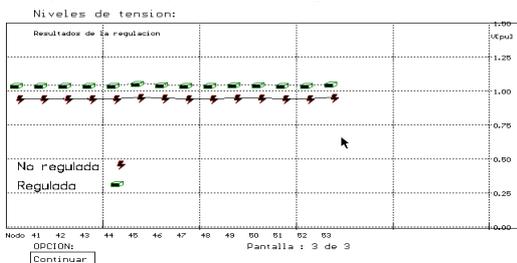


Fig. 6.5 Nivel de tensión

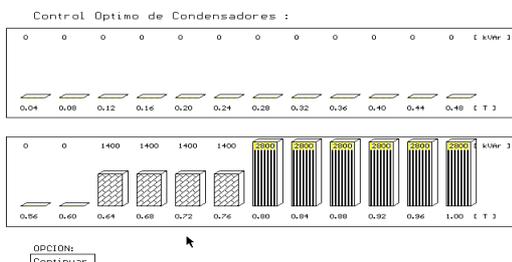


Fig. 6.6 Control óptimo de condensadores

El programa sugiere que se instalen dos reguladores, el primero en el nodo C06 y el segundo en S14.

## 7. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS

El presente trabajo presenta el desarrollo y utilización de AIDPRI[1] 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 en el análisis reactivo hacen del programa una herramienta fácil de utilizar en un ambiente profesional. La aplicación de interfaces gráficas interactivas, sumado a la utilización de diagramas unifilares, iconos y datos tabulados, facilitan la labor del ingeniero de distribución. 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 El programa determina la localización, dimensionamiento y control en el tiempo de bancos de condensadores y transformadores con el control de derivaciones bajo carga en SDDE, de tal forma que se maximicen las utilidades económicas derivas de un ahorro en las pérdidas de energía. También parece atractiva la posibilidad de relacionar el paquete con bases geográficas tipo GIS (Geographic Information Systems).

## APÉNDICE

Las distribuciones de corriente real y reactiva

$$F_d(y_i, \tau) = \sum_{j \in S(y_i)} \frac{P_j(\tau) \cos \delta_j(\tau) + Q_j(\tau) \sin \delta_j(\tau)}{V_j(\tau)} \quad (A.1)$$

$$y F_q(y_i, \tau) = \sum_{j \in S(y_i)} \frac{P_j(\tau) \sin \delta_j(\tau) - Q_j(\tau) \cos \delta_j(\tau)}{V_j(\tau)} \quad (A.2)$$

$\delta_j(\tau)$  Ángulo del nodo j en el tiempo  $\tau$

$V_j(\tau)$  Magnitud del nivel de tensión en el nodo j en el tiempo  $\tau$

$P_j(\tau)$  Carga real en el nodo jésimo en el tiempo  $\tau$

$Q_j(\tau)$  Carga reactiva en el nodo jésimo en el tiempo  $\tau$

$a(\tau)$  Curva normalizada de duración de la carga que enfrenta la subestación

Puesto que las potencias real y reactiva se comportan de acuerdo a  $a(\tau)$ ,

las expresiones A.1 y A.2 se pueden reducir a:

$$P_j(\tau) = P_j a(\tau), \quad Q_j(\tau) = Q_j a(\tau) \quad (A.3)$$

Las distribuciones de corrientes del condensador tanto real como reactivas debido al tiempo  $\tau$  variando los condensadores intermunicipales, se puede calcular de la siguiente forma:

$$F_{ca}(y_i, \tau) = \sum_{j \in S(y_i)} Q_{c_j} \sin \delta_{c_j}(\tau) V_{c_j}(\tau) \quad (A.4)$$

$$y F_{cq}(y_i, \tau) = \sum_{j \in S(y_i)} Q_{c_j} \cos \delta_{c_j}(\tau) V_{c_j}(\tau) \quad (A.5)$$

donde  $Q_{c_j}$  son los kvar nominales de salida del jésimo condensador.

Los superíndices b y  $\pi$  son aplicables donde es adecuado.

## NOMENCLATURA

$LE_p, LE_q$	Reducciones de pérdidas de potencia punta debido a las componentes real e imaginaria de corriente respectivamente, por la instalación de condensadores y reguladores de tensión
$LE_d, LE_q$	Reducciones de energía debido a las componentes real e imaginaria de corriente, también por la instalación de condensadores y reguladores de tensión.(d:direct q:quadrature)
$V_{max}, V_{min}$	Limites máximo y mínimo del nivel de tensión.
$V_i^{rc}(\tau)$	Nivel de tensión en nodo i del alimentador regulado y compensado en el tiempo $\tau$
$K_p, K_e$	Costo de kW de potencia de punta y del kwh de energía
$K_c(I_{ci}^o)I_{ci}^o$	Costo de instalación del condensador iésimo con una capacidad $I_{ci}^o$
n,m	Núm. de condensadores y núm. de nodos del sistema.
$\tau$	Tiempo medido a lo largo de la curva de carga característica del sistema que se esté analizando(generalmente se emplea la curva que enfrenta la subestación).
T	Periodo de diseño.
$F_d^b(y_i, \tau)$	Distribución de corrientes real y reactiva en el alimentador antes de regular el nivel de tensión y
$F_q^b(y_i, \tau)$	colocar bancos de condensadores, a la distancia $y_i$ , en el tiempo $\tau$ , debida a las cargas (caso base)
$F_d^{rc}(y_i, \tau)$	Distribución de corrientes real y reactiva debidas a la carga, para el sistema con compensación y regulación,
$F_q^{rc}(y_i, \tau)$	a la distancia $y_i$ en el tiempo $\tau$
$F_{cd}^{rc}(y_i, \tau)$	Distribución de corrientes real y reactiva debida a los condensadores con alimentador regulado, a la distancia
$F_{cq}^{rc}(y_i, \tau)$	$y_i$ en el tiempo
r	Resistencia uniforme equivalente[9].
s	Número de ramas del sistema
S	Utilidades anuales en US\$ por concepto de reducción de pérdidas y costo de condensadores.
$y_i$	Distancia medida desde el nodo de comienzo de la rama iésima, hasta un punto cualquiera de ella.
$l_i$	Longitud de la iésima rama.

## REFERENCIAS

- [1] VILCAHUAMÁN, R. (1993) **Análisis Interactivo Gráfico de Sistemas Eléctricos de Distribución Primaria**. Tesis de Magister en Ciencias de la Ingeniería, Departamento de Ingeniería Eléctrica, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [2] LI, S. y SHAHIDEHPOUR, S.(1993) An object oriented power system graphics package for personal computer environment. **IEEE Transactions on Power Systems, Vol.8**, No. 3, 1054 - 1060.
- [3] FOLEY, M., BOSE, A., MITCHELL, W. y FAUSTINI, A. (1993) An object based graphical user interface for power systems. **IEEE Transactions on Power Systems, Vol.8**, No.1,97-104.
- [4] VILCAHUAMÁN, R. y RUDNICK, H. (1993) Análisis interactivo gráfico de sistemas eléctricos de distribución primaria. **X Congreso Chileno de Ingeniería Eléctrica**. Universidad Austral de Chile, 22-26 Noviembre de 1993, Valdivia-Chile.
- [5] ALVARADO, F., LASSETER, R., y LIU, Y. (1988) An integrated engineering simulation environment. **IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 3**, 245 - 253.
- [6] YU, D., 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.8**, No.2, 628-631.
- [7] 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.
- [8] CHAN, K. y DING, J. (1990) Interactive network planning and analysis on a personal computer. **IEEE CAP, Vol. 3**, No.1, 43 - 47.
- [9] CIVANLAR, S. y GRAINGER, J. (1985) Volt/var control on distribution systems with lateral branches using switched capacitor and voltage regulators, parts I-II-III. **IEEE Trans. on PAS., Vol. 104**, No. 11, 3278-3297.
- [10] CASTILLO, M. y PARDO, G. (1989) **Control de Voltajes y Potencia Reactiva en Sistemas de Distribución**. Memoria para optar al título de Ingeniero Civil de Industrias mención Eléctrica. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Pontificia Universidad Católica de Chile.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] VILCAHUAMÁN, R. y PAUCAR, V. (1993) Flujos de potencia en sistemas de distribución eléctrica. **Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica Eléctrica y ramas afines, XI CONIMERA**. Museo de la Nación, 21-25 Junio de 1993, Lima-Perú.
- [14] CALE, K. (1976) **Interactive Power Systems Analysis**. M.Sc. Thesis, Electrical Engineering Department, The University of Manchester Institute of Science and Technology, Inglaterra.
- [15] ALVAREZ, C. y ROLDAN, C. (1992) **Curso Eficiencia Seguridad y Calidad en los Sistemas de Distribución**. Departamento de Ingeniería Eléctrica, Universidad Politécnica de Valencia, España.
- [16] EISKAMP, K. (1989) **Power Graphics Using Turbo C**. John Wiley and Sons, Inc. Canada.
- [17] BAEZA, R. (1992) **Curso Interfaces Gráficas**. XV Taller de Ingeniería de Sistemas., I Encuentro de Ingenieros Civiles Industriales. Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad de Chile.
- [18] CESPEDES, R. (1990) New method for the analysis of distribution network. **IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5**, No 1, 391 - 396.
- [19] GÖNEN, T. (1986) **Electric Power Distribution System Engineering**. McGraw Hill Book Company. EE. UU.

[20] REVOLO, M. y BASTIDAS, F. (1991) Coordinación y protección del sistema de distribución de la ciudad de Huancayo. **III Seminario de Distribución Electrocentro S.A.** 4 al 7 de Diciembre de 1991, Ayacucho - Perú.

[21] VILCAHUAMÁN, R. y RUDNICK, H.(1994) Análisis interactivo gráfico de la compensación reactiva de redes de distribución de energía eléctrica. **IV Seminario de Ingeniería de Potencia IEEE Chile, I Seminario de Distribución de Energía Eléctrica.** Del; 16 al 19 de Agosto de 1994. Santiago - Chile

[22] VILCAHUAMÁN, R., y ARIAS, J.(1994) Modelación y análisis digital en sistemas de distribución eléctrica **Congreso y Exposición de la Energía Eléctrica. Asociación Electrotécnica Argentina** 28 de Noviembre al 2 de Diciembre de 1994. Buenos Aires, Argentina.

#### **AGRADECIMIENTOS**

Se agradece el apoyo de Fondecyt(Fondo de Desarrollo Científico y Tecnológico) y del PNUD (Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo) a las investigaciones y desarrollos realizados.

#### **RAUL VILCAHUAMÁN SANABRIA**

Magister en Ciencias de la Ingeniería(Pontificia Universidad Católica de Chile), Ingeniero Electricista (Universidad Nacional del Centro del Perú) Profesor de la Escuela de Post grado y del Departamento de Ingeniería Eléctrica Universidad Nacional del Centro del Perú.

#### **HUGH RUDNICK VAN DE WYNGARD**

Doctor of Philosophy(University of Manchester, Inglaterra), Profesor Titular Departamento de Ingeniería Eléctrica Pontificia Universidad Católica de Chile