

ALGORITMO CON MINIMO ALMACENAMIENTO DE MEMORIA PARA EL CALCULO DE LA CAIDA DE TENSION EN REDES DE DISTRIBUCION

Ing. Santiago Sánchez Miño

Ing. Raúl Ruiz Ruiz

Promoción Eléctrica 1980

RESUMEN

El presente trabajo describe algunas técnicas de mínimo almacenamiento de matrices porosas. Se hace un análisis de las ventajas de uno de estos algoritmos sobre los métodos tradicionales que utilizan técnicas matriciales para resolver las redes de sistemas de energía eléctrica. Finalmente, se describe los programas de computación para aplicar el método de mínimo almacenamiento en el cálculo de la caída de tensión en redes de distribución.

INTRODUCCION Y CONCEPTOS BASICOS

La necesidad de encontrar soluciones óptimas a los problemas que enfrenta el hombre ha llevado a la permanente búsqueda de teorías y técnicas que aprovechen al máximo los recursos disponibles: humanos, técnicos y económicos. En el caso de la energía eléctrica, el desarrollo de estas técnicas ha tenido una importancia especial por las características propias que implican el análisis matemático de variable compleja.

Los fenómenos eléctricos se pueden explicar matemáticamente por un conjunto de ecuaciones lineales y no lineales, donde se aplican técnicas matriciales que permiten representar en forma lógica y ordenada el problema y su solución. El presente artículo trata de un problema común de la ingeniería eléctrica, cual es el del cálculo de la caída de tensión en redes de distribución. Si bien el planteamiento de este problema no constituye un sistema de ecuaciones como tal, para su solución se ha adoptado un algoritmo matricial, cuya formulación conlleva una metodología con pasos establecidos que permiten llegar a la solución deseada.

Las redes de energía eléctrica consisten de puntos de entrega, seccionamiento o generación de la energía, y de líneas de interconexión entre esos puntos. En una matriz, estos puntos constituyen los elementos diagonales, mientras que las líneas de interconexión constituyen los elementos fuera de la diagonal. Debido a la conformación física de la red, no todos los nodos se conectan entre sí, por lo que existe en la matriz posiciones cuyos valores son cero. Aquellas matrices que contienen elementos cero se las denomina matrices porosas o dispersas. Una medida de la porosidad de una matriz es el coeficiente de porosidad, que relaciona el número de elementos cero con el número total de elementos de la matriz, habiéndose llegado a determinar que para redes de energía eléctrica en nuestro país, este coeficiente varía entre 0.7 y 1.0, dependiendo de si es una red de distribución o una de transmisión.

De lo anteriormente expuesto, se concluye que solamente una parte de la matriz contiene la información necesaria para resolver el fenómeno en cuestión, lo que ha motivado se desarrollen algunas técnicas para explotar la porosidad de estas matrices con el propósito de reducir al mínimo los requisitos de memoria y de tiempo de procesamiento. En el artículo se detallan las técnicas más usuales de mínimo almacenamiento para matrices porosas, y se aplica una en particular para el cálculo de la caída de tensión en redes de distribución. Esta técnica se adapta a las metodologías aplicadas en nuestro medio, donde los ingenieros de distribución utilizan microcomputadoras. Estos equipos disponen en la actualidad de capacidades de procesamiento y memoria verdaderamente considerables, lo que podría hacer pensar

que tratar de aprovechar la memoria no tendría mayor importancia. Sin embargo, la posibilidad de utilizar técnicas de mínimo almacenamiento es atractiva por cuanto permite aprovechar al máximo los recursos y reducir el tiempo de procesamiento, manteniéndose vigentes aquellos criterios que impulsaron el desarrollo de estas técnicas en la década de los 60.

TECNICAS DE MINIMO ALMACENAMIENTO DE MATRICES POROSAS

Las redes de distribución en nuestro país se caracterizan por ser radiales, con un reducido grado de conexión entre los nodos. Esto implica un gran número de elementos cero en la matriz representativa de la red, con coeficientes de porosidad entre 0.7 y 0.9, y relación del número de tramos, sobre el número de nodos cercanos a uno. Existe la posibilidad de utilizar otras técnicas de solución de la caída de tensión, que no requieren de una representación matricial, pero tienen la dificultad de no considerar el problema en su totalidad y proporcionan soluciones limitadas con aplicaciones exclusivas para ciertos casos. La representación matricial permite una solución muy general, y el uso de técnicas de mínimo almacenamiento permite tratar a la matriz como un conjunto de vectores relacionados.

Para identificar la posición de los diversos elementos de una matriz, se requiere ubicar tanto las filas como las columnas. En el almacenamiento de matrices porosas, se puede identificar los elementos de acuerdo a diversos esquemas, tres de los cuales se ilustran a continuación, habiéndose utilizado para este artículo una modificación del último esquema. Se toma como ejemplo la siguiente matriz simétrica:

$$A = \begin{bmatrix} 4 & -1 & 0 \\ -1 & 3 & 0 \\ 0 & 0 & 2 \end{bmatrix}$$

a) Esquema 1

Según este esquema, el almacenamiento de los diversos elementos de una matriz está definido por medio de tres vectores: VALOR, que contiene el valor numérico del elemento, IFIL, que contiene el índice de la fila, e, ICOL, que representa el índice de la columna. Por lo tanto, la matriz A se almacena según este esquema, con la siguiente tabla de indexación o de porosidad:

LOC	1	2	3	4	5
VALOR	4	-1	-1	3	2
IFIL	1	1	2	2	3
ICOL	1	2	1	2	3

En este caso, el número de posiciones requeridas es de 15 (3n). Se puede tener una simplificación adicional en este esquema, ubicando los elementos de la diagonal en un nuevo vector llamado DIAG y separando la información en dos tablas, la una con los elementos diagonales (a_{ij}) y la otra con los elementos fuera de la diagonal (a_{ij}), lo que quedaría así:

Tabla I: DIAGONALES

LOC	1	2	3
DIAG	4	3	2

TABLA II: NO DIAGONALES

LOC	1	2
VALOR	-1	-1
IFIL	1	2
ICOL	2	1

Con estas variaciones se reduce el número de posiciones de 15 a 9.

b) Esquema 2

Este esquema permite identificar la posición de los elementos diferentes de cero por medio de un solo vector. A cada elemento diferente de cero de la matriz, y

cuyo valor numérico viene dado por el vector VALOR(k), es posible asociar un entero IPDS(k) que determina la respectiva fila y columna donde se ubica el elemento. Para un elemento a_{ij} (fila i, columna j) de una matriz de orden n, el valor de IPDS(k) se obtiene de la fórmula:

$$IPDS(k) = i + (j-1)*n$$

Usando este esquema, la matriz A quedaría almacenada de la siguiente manera:

LOC	1	2	3	4	5
VALOR	4	-1	-1	3	2
IPDS	1	4	2	5	9

Igualmente, se puede tener una modificación como en el caso del Esquema 1, utilizando el vector DIAG y dos tablas, como se indica a continuación:

Tabla I: DIAGONALES

LOC	1	2	3
DIAG	4	3	2

TABLA II: NO DIAGONALES

LOC	1	2
VALOR	-1	-1
IPDS	4	2

El número de posiciones utilizado en este caso es de 7. Los valores de la fila i y de la columna j, dado el índice IPDS, se obtienen de la siguiente manera:

$$i = IPDS(k) - (j-1)*n$$

$$j \text{ es el menor entero } > IPDS(k)/n$$

La ventaja de este sistema radica en la reducción del almacenamiento, pero a expensas de un mayor número de cálculos para determinar IPDS y luego reconstruir la matriz en base de las fórmulas anteriores.

c) Esquema 3

Este esquema consta de dos tablas de porosidad. La primera tabla está compuesta de tres vectores: VALOR (valor numérico del elemento diagonal), JCAP (índice de apuntador de la columna) y NOCE (número de elementos diferentes de cero fuera de la diagonal). La segunda tabla está compuesta por tres vectores: VALOR (valor numérico del elemento no diagonal), IFIL (índice de la fila) y CSIG (ubicación del siguiente elemento diferente de cero en la columna). Para la matriz A, estas tablas quedarían dadas por:

Tabla I: DIAGONALES

LOC	1	2	3
VALOR	4	3	2
JCAP	1	2	0
NOCE	1	1	0

TABLA II: NO DIAGONALES

LOC	1	2
VALOR	-1	-1
IFIL	2	1
CSIG	0	0

La configuración de las tablas se describe así: consideremos los tres elementos correspondientes a la ubicación k en la segunda tabla, entonces VALOR(k) da el valor numérico del elemento diferente de cero fuera de la diagonal, IFIL(k) indica la fila donde está ubicado dicho elemento y CSIG(k) indica la posición del próximo valor diferente de cero que aparece en la misma columna. Un valor de cero para CSIG indica que no hay más elementos diferentes de cero en dicha columna. Igualmente, si consideramos los tres elementos en la ubicación m en la primera tabla: DIAG(m) da el valor numérico del elemento diagonal de la columna m, JCAP(m) señala la ubicación en la segunda tabla del primer elemento diferente de cero fuera de la diagonal ubicado en la columna m, y NOCE(m) da el número total de elementos diferentes de cero fuera de la diagonal ubicado en la columna m.

De esta manera, cualquier columna de la matriz puede ser reconstruida fácilmente. Por ejemplo, el valor numérico del elemento diagonal correspondiente a la ubicación 2 en la primera tabla es 3. El valor de JCAP(2) es igual a 2, de manera que en la ubicación 2 de la segunda tabla podemos determinar la fila en que está ubicado el primer elemento diferente de cero fuera de la diagonal, por medio de IFIL(2) y el valor numérico de dicho elemento está dado por VALOR(2). El valor de CSIG(2) = 0 nos indica que no hay más elementos diferentes de cero en dicha

columna, lo cual está de acuerdo con el valor NOCE(2)=1, que indica que sólo hay un elemento diferente de cero fuera de la diagonal.

ALGORITMO DE MINIMO ALMACENAMIENTO UTILIZADO

En el caso del artículo, se ha utilizado una variación de los esquemas 2 y 3, que considera valores positivos y negativos para JCAP, lo que permite determinar la ubicación del primer elemento diferente de cero correspondiente a un nodo i en la fila o en la columna.

El algoritmo consiste en la elaboración de dos tablas de indexación. La primera tabla, o Tabla I, contiene la información de los elementos diagonales de la matriz (a_{ij}). La segunda tabla o Tabla II, contiene la información de los elementos diferentes de cero ubicados fuera de la diagonal de la matriz (a_{ij}). Hay que anotar que el algoritmo ha sido desarrollado para matrices simétricamente porosas, que es el caso más general de los sistemas de potencia; para matrices no simétricas se deberá efectuar ciertas modificaciones.

El diagrama de la figura 1 corresponde a un circuito típico de distribución secundario radial de un transformador y se representa en forma matricial según muestra la matriz A.

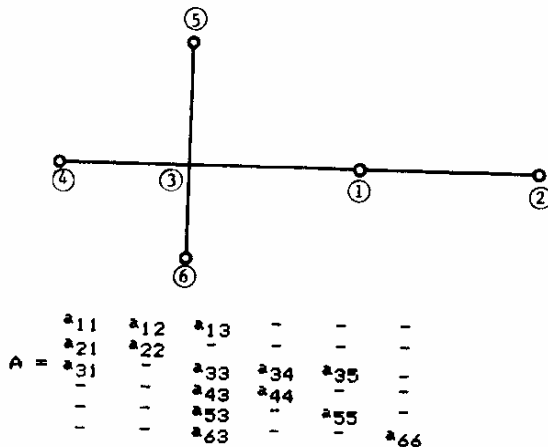


Figura 1: Ejemplo de red de distribución.

Los valores asignados a los elementos a_{ij} pueden variar dependiendo de la característica del problema, es decir si estamos resolviendo un flujo de carga, un cortocircuito o una red de distribución. Para el efecto del ejemplo, solo interesa determinar la presencia de esos elementos y sus posiciones; cuando se describa el cálculo de la caída de tensión, se asignará los valores.

Se observa que la matriz A es simétricamente porosa; es decir que tiene una distribución similar tanto de los elementos de la parte triangular superior, como de los elementos de la parte triangular inferior de la matriz. Para mayor facilidad en la descripción del método, se ha considerado que la matriz es también simétrica en los valores, o sea que los elementos a_{ij} son iguales a los elementos a_{ji} . La nueva representación de la matriz A en su forma simétrica sería entonces:

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & - & - & - & - & - \\ a_{21} & a_{22} & - & - & - & - \\ a_{31} & - & a_{33} & a_{44} & - & - \\ - & - & a_{43} & a_{44} & - & - \\ - & - & a_{53} & - & a_{55} & - \\ - & - & a_{63} & - & - & a_{66} \end{bmatrix}$$

El método se desarrolla en base de esta matriz A simétrica, y se sigue, para el caso del ejemplo, los siguientes pasos:

Paso 1: Llenar las tablas de porosidad I y II con los datos que se dispone:

TABLA I: ELEMENTOS DIAGONALES (a_{ij})

LOC	1	2	3	4	5	6
JCAP	0	0	0	0	0	0
VALOR	a_{11}	a_{22}	a_{33}	a_{44}	a_{55}	a_{66}
NOCE	2	1	4	1	1	1

TABLA II: ELEMENTOS NO DIAGONALES (a_{ij})

LOC	1	2	3	4	5
VALOR	a_{12}	a_{13}	a_{14}	a_{15}	a_{16}
IFIL	2	3	4	5	6
CSIG	0	0	0	0	0
ICOL	1	1	3	3	3
FSIG	0	0	0	0	0

donde:

- JCAP: Posición del primer elemento diferente de cero en la Tabla II. Si es positivo vaya a FSIG (por filas), si es negativo vaya a CSIG (por columnas).
- NOCE: Número de elementos diferentes de cero en el nodo i . Puede llenarse a medida que se ingresa los datos de los tramos.
- IFIL: Número del nodo de destino.
- CSIG: Posición del siguiente elemento diferente de cero en la columna.
- ICOL: Número del nodo de origen (ICOL<IFIL).
- FSIG: Posición del siguiente elemento diferente de cero en la fila. Si es negativo entonces da la posición del siguiente elemento en la columna (CSIG).

Se nota que en la Tabla I, el vector LOC nos da la posición del nodo con el que estamos trabajando (i). En la Tabla II, la posición LOC nos da el tramo o sección con el que estamos trabajando.

Paso 2: Tomemos el nodo 1 ($i=1$) y vayamos por la fila 1. El primer elemento es a_{11} . Nos preguntamos ¿existe elemento a_{12} ? ($j=2$), la respuesta es SI, en la posición 1 de la Tabla II. Por cuanto para llegar a a_{12} dimos la vuelta de la fila 1 a la columna 1 ($j>i$), entonces cambiamos de signo, JCAP(1)=-1.

Paso 3: Seguimos en la columna 1. Nos preguntamos ¿existe un elemento a_{13} ? ($j=3$), la respuesta es SI, en la posición 2 de la Tabla II, entonces CSIG(1)=2. No hay cambio de signo pues nos hemos mantenido en la columna. Nos preguntamos ¿hay otro elemento en la columna 1? ¿ a_{14} ? NO, ¿ a_{15} ? NO, ¿ a_{16} ? NO. Hemos llegado al tope de la columna 1 sin encontrar otro elemento, entonces CSIG(2)=0. Hemos terminado con el nodo 1.

Paso 4: Tomemos el nodo 2 ($i=2$) y vayamos por la fila 2. Nos preguntamos ¿existe un elemento a_{21} ? ($j=1$) SI, en la posición 1 de la Tabla II, entonces JCAP(2)=1. Por cuanto aún no llegamos a la esquina ($j=i$) entonces no hay cambio de signo. El siguiente elemento es a_{22} , nos preguntamos ¿existe un elemento a_{23} ? NO, ¿ a_{24} ? NO, ¿ a_{25} ? NO, ¿ a_{26} ? NO. Como no llegamos a dar la vuelta por la esquina ($j>i$), y nos quedamos en la fila 2 sin encontrar otro elemento, entonces FSIG(1)=0.

Paso 5: Tomemos el nodo 3 ($i=3$) y vayamos por la fila 3. Nos preguntamos ¿existe un elemento a_{31} ? ($j=1$), SI, en la posición 2 de la Tabla II, entonces JCAP(3)=2, positivo, pues $j<i$. Seguimos en la fila 3 y nos preguntamos ¿existe un elemento a_{32} ? ($j=2$), NO. Llegamos a a_{33} ($i=j$) y nos preguntamos ¿existe un elemento a_{34} ? ($j=4$), SI, en la posición 3. Como estábamos en la fila 3 y pasamos a la columna 3, dimos la vuelta por la esquina, entonces FSIG(2)=-3. Estamos en la columna 3. Nos preguntamos ¿existe un elemento a_{35} ? ($j=5$), SI, en la posición 4, entonces CSIG(3)=4. ¿Existe un elemento a_{36} ? ($j=6$), SI, en la posición 5, entonces CSIG(4)=5. Como es el último elemento entonces CSIG(5)=0.

Paso 6: Tomemos el nodo 4 ($i=4$) y vayamos por la fila 4. Nos preguntamos ¿existe un elemento a_{41} ? NO, ¿ a_{42} ? NO, ¿ a_{43} ? ($j=3$), SI, en la posición 3, entonces JCAP(4)=3. Positivo, pues aún $j<i$. Llegamos a a_{44} ($i=j$) y nos preguntamos ¿existe un elemento a_{45} ? NO, ¿ a_{46} ? NO, entonces FSIG(3)=0.

Paso 7: Procediendo de igual manera que en el Paso 6, encontramos JCAP(5)=4, FSIG(4)=0, JCAP(6)=5, FSIG(5)=0.

De esta manera hemos llegado a completar las tablas de porosidad:

TABLA I: ELEMENTOS DIAGONALES (a_{ij})

LOC	1	2	3	4	5	6
JCAP	-1	1	2	3	4	5
VALOR	a_{11}	a_{22}	a_{33}	a_{44}	a_{55}	a_{66}
NOCE	2	1	4	1	1	1

TABLA II: ELEMENTOS NO DIAGONALES (a_{ij})

LOC	1	2	3	4	5
VALOR	a_{12}	a_{13}	a_{34}	a_{35}	a_{36}
IFIL	2	3	4	5	6
CSIG	2	0	4	5	0
ICOL	1	1	3	3	3
FSIG	0	-3	0	0	0

El número de pasos descritos para el ejemplo es solamente indicativo del procedimiento, pues dependen del tipo de red. Se presenta en el Apéndice I un listado del programa de computación desarrollado en lenguaje BASIC, para elaborar las tablas de porosidad según el procedimiento descrito. El programa es general y su uso es directo para cualquier problema, sea de flujos de carga, de

distribución, o de resolución de ecuaciones lineales. En el programa no se hace uso de un recurso que puede disminuir drásticamente el tiempo de procesamiento para la elaboración de las tablas, ya que no se toma en cuenta el número de elementos diferentes de cero en cada iteración, para los valores de $i=1$ a n . Se podría optimizar el programa utilizando la información del vector NOCE(i), de la Tabla I.

Si comparamos el número de elementos de las tablas de porosidad, con los que se tiene en una matriz, se puede determinar las ventajas del método adoptado. Esto se refleja con mayor detalle en la figura 2, que muestra el número de elementos totales en función del número de nodos de la red.

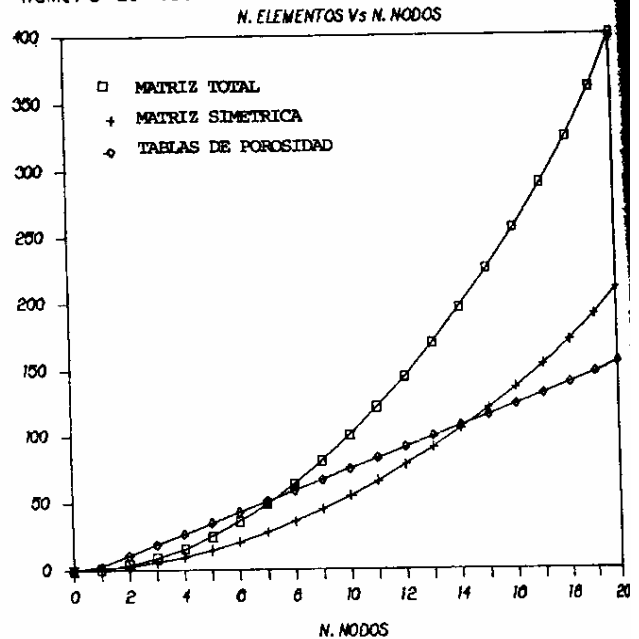


Figura 2: Curva de número de elementos vs. número de nodos para matriz y tablas de porosidad.

Se muestra también la curva para el caso de una matriz simétrica, la cual puede almacenarse en forma de vector. Para determinar el número de elementos necesarios se consideró que en una red de distribución radial, generalmente el número de tramos es igual al número de nodos menos uno, llegándose a determinar las siguientes fórmulas:

Cálculo del número de elementos:

Matriz completa : n^2
 Matriz simétrica : $n + ((n^2 - n) / 2)$
 Tablas de porosidad : Tabla I = $3n$
 Tabla II = $5(n-1)$
 Total = $8n-5$

Se observa que mientras en el caso de la matriz, el crecimiento es cuadrático, en las tablas de porosidad el crecimiento es lineal. De la figura 2 se deduce en forma empírica que las tablas de porosidad tienen menor número de elementos que una matriz

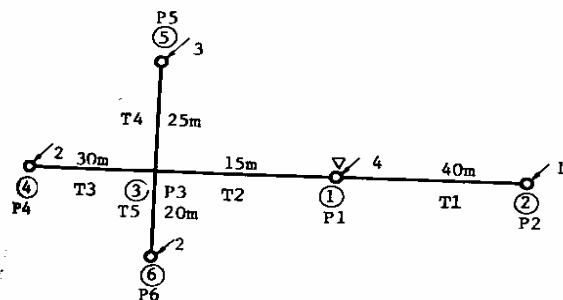
simétrica almacenada en forma de vector cuando el número de nodos es mayor a 14, en tanto que para el caso de una matriz normal este número se reduce a 7.

APLICACION EN EL CALCULO DE LA CAIDA DE TENSION

El programa ha sido desarrollado en base de la metodología descrita en las Normas para Sistemas de Distribución de la Empresa Eléctrica Quito S.A. El cálculo de la caída de tensión consiste en la determinación de la demanda acumulada en cada nodo de la red, la cual depende del número de usuarios conectados a ese nodo y de la demanda máxima unitaria proyectada DMUP, que son datos. Se calcula luego la caída de tensión en cada tramo asociándola al nodo más alejado del centro de transformación, multiplicando la demanda acumulada en el nodo por la longitud del tramo, y dividiendo este resultado por la capacidad de conducción del cable correspondiente, que también es dato. Finalmente, una vez determinada la caída de voltaje parcial en cada nodo, se suma las caídas desde el nodo donde se ubica el centro de transformación hasta los nodos extremos, para encontrar la caída total.

El algoritmo de mínimo almacenamiento descrito se ajusta al procedimiento para el cálculo de la caída de tensión, pues permite diferenciar los nodos de los tramos y ubicar separadamente la información de cada elemento. Las secciones se manejan independientemente, lo cual facilita el cálculo para casos de cambios de calibre de la sección, o de ubicación del centro de transformación.

Las tablas de porosidad deben complementarse para el uso en la caída de tensión, mediante la inclusión de otros vectores. Poniendo valores al ejemplo de la figura 1, tenemos la red de la figura 3:



Usuario tipos: B
 Calibre del conductor: 2/0
 Material del conductor: AAAC
 Capacidad de conducción del cable: 710 KVA
 Número de fases: 3
 Instalación: aérea
 Demanda máxima unitaria proyectada: 5 KVA

Figura 3: Red de la figura 1 con datos numéricos.

Las tablas de porosidad con los datos disponibles para el caso del ejemplo, son las siguientes:

TABLA I: NODOS

LOC	1	2	3	4	5	6
JCAP	-1	1	2	3	4	5
NODOS	P1	P2	P3	P4	P5	P6
NUS	4	1	0	2	3	2
NOCE	2	0	0	0	0	0
CVOLT	0	0	0	0	0	0

TABLA II: TRAMOS

LOC	1	2	3	4	5
TRAM#	T1	T2	T3	T4	T5
TLN	40	15	30	25	20
IFIL	2	3	4	5	6
CSIG	2	0	4	5	0
ICOL	1	1	3	3	3
FSIG	0	-3	0	0	0
TCK	1	1	1	1	1
DKVA	0	0	0	0	0
PCV	0	0	0	0	0

donde los vectores nuevos se definen así:

- NODOS: nombre o código del nodo.
- NUS: número de usuarios que se conectan al nodo.
- BUS: número de usuarios acumulado en el nodo.
- CVOLT: caída de voltaje total en el nodo.
- TRAM#: nombre o código del tramo.
- TLN: longitud del tramo en metros.
- DKVA: demanda del tramo.
- TCK: indicador de cambios del conductor del tramo. Da un direccionamiento a otro vector que contiene los datos de: calibre, capacidad de conducción y límite térmico.
- PCV: caída de voltaje parcial en el tramo.

Los vectores que se ha aumentado permiten resolver el cálculo y la impresión de los resultados. El vector de VALOR, en la Tabla I, se ha desglosado en: NODOS y NUS. El vector VALOR, de la Tabla II, se ha desglosado en TRAM# y TLN. Se nota que los vectores se refieren a distintos tipos de datos: KVA, metros, número de usuarios, etc.

El Apéndice 2 contiene un listado del programa para el cálculo de la caída de tensión en lo que tiene relación con el procedimiento del cálculo, donde se utiliza los vectores de las tablas de porosidad y se va llenando en forma iterativa para cada nodo los vectores de resultados. Este procedimiento se divide en dos etapas: la primera, el cálculo de la caída parcial a partir del último nodo (i=n), con lo que se llenan los vectores de resultados: DKVA, PCV, y BUS; y, la segunda, el cálculo de la caída total a partir del primer nodo (i=1) con lo que se llena el vector de resultados CVOLT.

Los resultados del cálculo para el caso de la red de la figura 3, se resumen en las tablas del Apéndice 3, que muestra como se van llenando los vectores de resultados para cada iteración.

Como ejemplo, los valores de los vectores en la primera iteración de la tabla a) del Apéndice 3, se obtienen así:

$$\begin{aligned}
 DKVA(5) &= NUS(6) * DMUP / FDIU(NUS(6)) \\
 &= 2 * 5 / 1.31 = 7.63 \\
 PCV(5) &= DKVA(5) * TLN(5) / MKVA \\
 &= 7.63 * 20 / 710 = 0.215 \\
 BUS(3) &= BUS(3) + BUS(6) \\
 &= 0 + 2 = 2
 \end{aligned}$$

En el caso de la tabla b) del Apéndice 3, el cálculo para la primera iteración es:

$$\begin{aligned}
 CVOLT(2) &= CVOLT(1) + PCV(1) \\
 &= 0 + 0.281 = 0.281
 \end{aligned}$$

De esta manera se han aplicado las tablas de porosidad al cálculo de la caída de tensión. El número de vectores adicionales para el cálculo serían los mismos que si se utilizara otra técnica, por lo que el análisis del ahorro de memoria queda inalterado.

PROGRAMA DE CALCULO DE LA CAIDA DE TENSION

Se ha desarrollado un programa general para el cálculo de la caída de tensión que contempla el uso de las técnicas de almacenamiento mínimo y del procedimiento para el cálculo descritos en este artículo. El programa permite adicionalmente:

- a) Obtener los resultados impresos de los cálculos en los formatos estandarizados por la EEGSA.
- b) Almacenar en archivos magnéticos los datos y los resultados del circuito.
- c) Efectuar cambios en la red, sea en el calibre del conductor de un tramo o en la ubicación del transformador, como medidas para reducir la caída de tensión en la red.

El programa, cuyo flujograma se muestra en el Apéndice 4, ha sido desarrollado para una microcomputadora IBM, y ocupa aproximadamente 18 Kbytes de memoria. Está concebido para que los resultados del cálculo de la caída de tensión presentados en la forma de los vectores de las tablas de porosidad puedan utilizarse para preparar el listado de materiales de la red, ya que al código de cada nodo puede asociarse una estructura tipo, al igual que para el caso de los códigos de los tramos.

CONCLUSIONES

Se ha descrito en detalle una técnica de mínimo almacenamiento para matrices porosas, que se ajusta a la metodología utilizada para resolver el cálculo de la caída de tensión en redes de distribución. Para evaluar las ventajas de este método sobre la aplicación de métodos matriciales, se muestra la tabla de la figura 4 donde se puede observar el considerable ahorro de memoria. El análisis comparativo se ha hecho en base de un mismo programa de computación que se ha modificado para resolver el cálculo de la caída de tensión por el método matricial y por el método de mínimo almacenamiento, para varios ejemplos donde se ha modificado el número de nodos.

NODOS	MINIMO ALMACENAMIENTO			MATRICIAL	
	MEMORIA (bytes)	TIEMPO TOTAL (s)	TIEMPO CALCULOS (s)	MEMORIA (bytes)	TIEMPO TOTAL (s)
7	1499	0,976	0,546	1418	0,601
14	2009	2,359	0,992	2889	1,922
20	2451	3,789	1,367	4775	3,570
35	3562	8,836	2,414	11985	9,610
50	4626	15,929	3,450	22812	18,790

Figura 4: Resultados numéricos en memoria y tiempo de almacenamiento para los métodos de mínimo almacenamiento y matricial.

Los resultados de la figura 4 ratifican lo expuesto en forma teórica en la figura 2. El ahorro de memoria se incrementa a medida que crece el número de nodos, lo que evidencia las ventajas del método y su posible aplicación en otras áreas de sistemas de potencia.

En lo que a tiempo de proceso se refiere, los valores consideran el tiempo necesario para efectuar los cálculos, que para el caso de mínimo almacenamiento son también menores que cuando se utiliza la técnica matricial. Si se toma en cuenta además el tiempo necesario para elaborar las tablas de porosidad, este tiempo aumenta, aunque puede reducirse notablemente mediante la optimización del programa. Se nota, sin embargo que cuando el número de nodos es mayor de 35, con el programa utilizado el método de mínimo almacenamiento también tiene tiempos totales menores.

La modularidad del programa general para el cálculo de la caída de tensión en circuitos secundarios de distribución, permite su integración a un sistema que posibilitaría efectuar el diseño de las redes con la utilización óptima de los recursos disponibles: humanos, técnicos y económicos.

BIBLIOGRAFIA

1. A. Brameller, R. N. Allan, Y. M. Haman, Sparsity, Pitman Publishing, London, 1976.
2. Computer Applications on Power Systems, Iowa State University, 1981. Apuntes de clase.
3. H. M. Markowitz, "The Elimination Form of the Inverse and Its Application to Linear Programming", Management Science, pp. 281-285, 9, 1957.
4. M. Morozowski, Matrices Esparcas en Redes de Potencia, LTC/Electrobras/FEESC, Brasil, 1981.
5. Normas para Sistemas de Distribución, Empresa Eléctrica Quito S.A., enero 1979.
6. W. F. Tinney, "Some Examples of Sparse Matrix Methods for Power Network Problems", Power Systems Computer Conference, Rome, 1969.
7. W. F. Tinney, C. E. Hart, "Power Flow Solution by Newton's Method", IEEE TPAS, pp. 1449-1460, 1967.
8. N. Sato, W. F. Tinney, "Techniques for Exploiting the Sparsity of the Network Admittance Matrix", IEEE TPAS, pp. 944-950, 1963.

APENDICE 1: LISTADO DEL PROGRAMA PARA ELABORAR LAS TABLAS DE POROSIDAD

```

8000 REM *** SUBROUTINA TABLAS POROSIDAD ***
8010 LD=NNODOS
8020 LV=NTRAM
8100 FOR I=1 TO LD
8110 : B=0
8120 : IF I=1 THEN B310
8130 : Y=0:T=I
8140 REM ** POR FILAS **
8150 : FOR J=1 TO LV
8160 : IF IFIL(J)<>I THEN B180
8165 : Y=1:B=B+1
8170 : IF (ICOL(J)<T) THEN T=ICOL(J)
      : JCAP(I)=J:C=J
8180 : NEXT J
8190 : IF (Y=0)OR(B=1)THEN B310
8210 : FOR H=1 TO B-1
8220 : A=I
8230 : FOR J=1 TO LV
8240 : IF IFIL(J)<>I THEN B260
8250 : IF (ICOL(J)>T) AND (ICOL(J)<A)
      : THEN A=ICOL(J):FSIG(C)=J:D=J
8260 : NEXT J
8270 : C=D:T=A
8280 : NEXT H
8300 : REM ** POR COLUMNAS **
8310 : IF I=LD THEN B520
8320 : E=LD:G=0
8330 : FOR K=1 TO LV
8340 : IF ICOL(K)<>I THEN B410
8350 : G=G+1
8360 : IF IFIL(K)>E THEN B410
8370 : E=IFIL(K):F=K
8380 : IF (Y=0)OR(I=1)THEN
      : JCAP(I)=-K:GOTO B400
8390 : FSIG(C)=-K
8400 : IF B=1 THEN FSIG(C)=-K
8410 : NEXT K
8420 : IF (G=0)OR(G=1)THEN B520
8440 : FOR H=1 TO G-1
8450 : M=LD
8460 : FOR L=1 TO LV
8470 : IF ICOL(L)<>I THEN B490
8480 : IF (IFIL(L)>E) AND (IFIL(L)<=M)
      : THEN M=IFIL(L):CSIG(F)=L:D=L
8490 : NEXT L
8500 : E=M:F=D
8510 : NEXT H
8520 NEXT I
8530 RETURN

```

APENDICE 2: LISTADO DEL PROGRAMA PARA CALCULAR LA CAIDA DE TENSION

```

7000 REM ***** SUBROUTINA CVSEC *****
7010 REM ** CAIDA DE VOLTAJE PARCIAL **
7020 FOR I=1 TO NNODOS
7030 : BUS(I)=NUS(I)
7040 NEXT I
7100 FOR I=NNODOS TO 1 STEP -1
7110 : NC=NCX(I):IJ=JCAP(I)
7115 : CK=TCK(ABS(IJ))
7120 : IF IJ<=0 THEN IJ=-IJ
7130 : NDE=ICOL(IJ):NA=IFIL(IJ)
7140 : ANUS=BUS(NA)
7150 : IF ANUS=0 AND NC=1 THEN 7230
7160 : MKVA=DCAL(CK,2)
7170 : IF ANUS>40 THEN ANUS=40
7180 : FD=FDIV%(ANUS,US)/100
7190 : D=ANUS*DMUP/FD
7200 : PCV(IJ)=D*TLN(IJ)/MKVA
7210 : DKVA(IJ)=D
7220 : BUS(NDE)=BUS(NDE)+BUS(NA)
7230 NEXT I

```

```

7300 REM ** CAIDA DE VOLTAJE TOTAL **
7310 FOR I=1 TO NNODOS
7320 : C=0:R=0
7330 : IJ=JCAP(I)
7340 : IF IJ<=0 THEN CS=CSIG(-IJ)
      : C=1:GOTO 7360
7350 : IF IJ>0 THEN CS=FSIG(IJ):R=1
7360 : JI=ABS(IJ)
7370 : J=IFIL(JI)
7380 : IF J<=I THEN 7400
7390 : CVOLT(J)=CVOLT(I)+PCV(JI)
7400 : IF CS=0 THEN 7460
7410 : IJ=ABS(CS)
7420 : IF C=1 AND CS>0 THEN CS=CSIG(IJ)
      : C=1:GOTO 7360
7430 : IF C=1 AND CS<0 THEN CS=FSIG(IJ)
      : R=1:GOTO 7360
7440 : IF R=1 AND CS>0 THEN CS=FSIG(IJ)
      : R=1:GOTO 7360
7450 : IF R=1 AND CS<0 THEN CS=CSIG(IJ)
      : C=1:GOTO 7360
7460 NEXT I
7470 RETURN

```

APENDICE 3: TABLAS DE POROSIDAD PARA CADA ITERACION

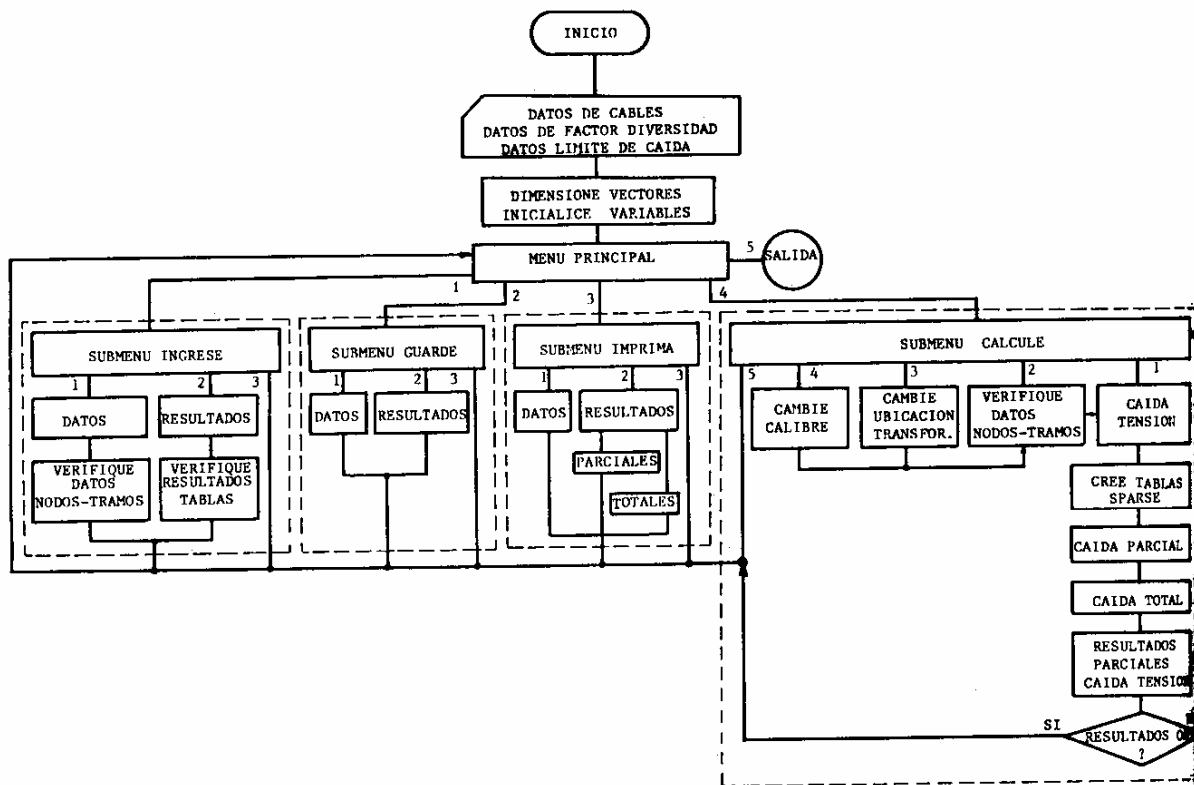
a) Caída Parcial

LOC	1	2	3	4	5	6
NOOD	1	2	3	4	5	6
TRAMO	1-2	1-3	3-4	3-5	3-6	6
----- ITERACION = 0 -----						
DKVA	0	0	0	0	0	
PCV	0	0	0	0	0	
BUS	4	1	2	2	3	2
----- ITERACION = 1 -----						
DKVA	0	0	0	0	7.63	
PCV	0	0	0	0	0.215	
BUS	4	1	2	2	3	2
----- ITERACION = 2 -----						
DKVA	0	0	0	10.0	7.63	
PCV	0	0	0	0.352	0.215	
BUS	4	1	5	2	3	2
----- ITERACION = 3 -----						
DKVA	0	0	7.63	10.0	7.63	
PCV	0	0	0.322	0.352	0.215	
BUS	4	1	7	2	3	2
----- ITERACION = 4 -----						
DKVA	0	18.52	7.63	10.0	7.63	
PCV	0	0.391	0.322	0.352	0.215	
BUS	11	1	7	2	3	2
----- ITERACION = 5 -----						
DKVA	5.0	18.52	7.63	10.0	7.63	
PCV	0.281	0.391	0.322	0.352	0.215	
BUS	12	1	7	2	3	2
----- ITERACION = 6 -----						
DKVA	5.0	18.52	7.63	10.0	7.63	
PCV	0.281	0.391	0.322	0.352	0.215	
BUS	13	1	7	2	3	2

b) Caída Total

LOC	1	2	3	4	5	6
NOOD	1	2	3	4	5	6
TRAMO	1-2	1-3	3-4	3-5	3-6	6
----- ITERACION = 1 -----						
CVOLT	0	0	0	0	0	0
----- ITERACION = 2 -----						
CVOLT	0	0.281	0	0	0	0
----- ITERACION = 3 -----						
CVOLT	0	0.281	0.391	0	0	0
----- ITERACION = 4 -----						
CVOLT	0	0.281	0.391	0.713	0	0
----- ITERACION = 5 -----						
CVOLT	0	0.281	0.391	0.713	0.743	0
----- ITERACION = 6 -----						
CVOLT	0	0.281	0.391	0.713	0.743	0.686

APENDICE 4: FLUJOGRAMA GENERAL DEL PROGRAMA PARA EL CALCULO DE LA CAIDA DE TENSION EN REDES DE DISTRIBUCION.



BIOGRAFIAS



SANCHEZ MINO SANTIAGO J. Nació en Quito, Ecuador, el 16 de septiembre de 1956. Obtuvo el título de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional en agosto de 1980 y el título de Master of Electrical Engineering en Iowa State University, Ames, USA, en mayo de 1982.

Actualmente trabaja en el Fondo Nacional de Preinversión. Es miembro del CIEEPI.



RUIZ RUIZ RAUL A., Nació en Ibarra, Ecuador, el 19 de abril de 1956. Se graduó de Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional, en diciembre de 1981, y obtuvo el título de Master of Science en The University of Manchester Institute of Science and Technology, England, en diciembre de 1986.

Trabaja en la Empresa Eléctrica Quito S.A., en el Departamento de Sistemas de Potencia. Es miembro del CIEEPI y del IEEE.