

NUEVO MÉTODO PARA CALCULAR LAS PERDIDAS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN ELECTRICA CON ALTAS PÉRDIDAS NO TÉCNICAS

MENTOR POVEDA, MSEE

Resumen

Este trabajo presenta un nuevo método para dividir por subsistemas y por causas, las pérdidas de distribución en sistemas eléctricos donde las pérdidas no técnicas son relevantes. En éste tipo de sistemas, el método tradicional ha dado lugar a errores por carga no registrada. El nuevo método está basado en la naturaleza de las pérdidas: las pérdidas resistivas obtenidas de la relación cuadrática entre la demanda horaria y la demanda máxima, en cada subsistema; las pérdidas en el núcleo del transformador no relacionadas con las variaciones de la demanda de la carga y por último las pérdidas no técnicas con un perfil de demanda similar al de la carga ya que representan carga no registrada. El método utiliza los perfiles de carga registrados en los medidores electrónicos modernos. Este trabajo demuestra la diferencia entre las pérdidas obtenidas con éste nuevo método y las obtenidas con el método tradicional del factor de pérdidas.

I.- Introducción

A continuación se presenta un resumen del método empleado para el cálculo de las pérdidas por componente y por subsistema eléctrico. Se trata de un nuevo método que se aparta del tradicional basado en el factor de pérdidas calculado a partir del factor de carga y que toma en cuenta la forma de la curva de carga de cada subsistema. En el método tradicional, se desprecian efectos como, por ejemplo, que las pérdidas resistivas se concentran en los picos, al ser función del cuadrado de la corriente. Esta particularidad no ha permitido conocer la verdadera relación de la demanda de potencia con la energía de las pérdidas. Tal como demuestra el artículo [1]* que sirve de referencia para la metodología, presentado y publicado en la 1999 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference del Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., el verdadero factor de pérdidas está lejos de aquel calculado a partir del factor de carga.

* Nota: Los números en corchetes se refieren a las referencias bibliográficas listadas al final del trabajo.

II.- Bases del cálculo

Si la energía medida en la subestación al inicio del alimentador primario se la denomina como "Energía Suministrada" (E_S) e igualmente, se denomina como "Energía Registrada" (E_R) a la suma de energía facturada, la destinada al alumbrado público y los consumos en las instalaciones propias de la empresa eléctrica, las "Pérdidas Totales" (E_{TL}) en energía resultan de la diferencia entre la "Energía Suministrada" y la "Energía Registrada", tal como muestra la ecuación (1). Dichas pérdidas comprenden el conjunto de pérdidas técnicas y pérdidas no técnicas, cuya magnitud será el dato de partida para la separación de las pérdidas en cualquier punto del sistema eléctrico.

$$E_{TL} = E_S - E_R \quad (1)$$

Los registradores digitales disponibles en la actualidad permiten obtener la curva de demandas y al mismo tiempo, la energía suministrada en el punto de medición. La curva de demandas se presenta como una matriz con los siguientes vectores-columna: fecha (d), hora (t), demanda de potencia activa (D_P [kW]) y demanda de potencia reactiva (D_Q [kvar]). El intervalo de demanda normalmente puede ser seleccionado a voluntad del operador, pero el más empleado es de 15 minutos. La matriz de registro se muestra como en la ecuación (2). El período de registro puede ser de un año completo, con vectores columna de 35,040 elementos en total. Sin embargo, se considera como mínimo emplear un registro con 672 datos de una semana completa representativa de cada estación del año.

$$\text{Registro} = \begin{bmatrix} 2/15/98 & 00:00 & 2,345 & 1,225 \\ 2/15/98 & 00:15 & 2,360 & 1,325 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ 2/21/98 & 23:45 & 2,450 & 1,345 \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} d & t & D_P & D_Q \end{bmatrix} \quad (2)$$

La sumatoria de los elementos del vector D_P multiplicado por el tiempo del intervalo de demanda empleado es la energía de todo el período considerado en el registro, ecuación (3). Esto se cumplirá solo si se trata de demandas, es decir potencias promedio en cada intervalo, debido a que estas provienen de la integración de las potencias instantáneas, o sea de la misma energía [2].

$$kWh = \sum_{i=1}^n D_{P_i} \times (\text{intervalo de demanda}) \quad (3)$$

La metodología se sustenta en la naturaleza de cada componente de las pérdidas y en su relación con respecto a la demanda en el intervalo de registro correspondiente. Como las pérdidas en el intervalo de demanda máxima se calculan con los modelos para flujos de carga o a través de la modelación del sistema primario de distribución; sobre la base de esos valores se calcula la magnitud de cada componente para el resto de los intervalos de demanda de todo el período considerado.

Las pérdidas técnicas en el sistema de distribución de la empresa eléctrica comprenden las pérdidas resistivas de los alimentadores primarios, las pérdidas en los transformadores de distribución (resistivas en los devanados y en el núcleo), las pérdidas resistivas en redes secundarias, las pérdidas resistivas en acometidas y las pérdidas en contadores de energía.

Pérdidas resistivas. Las pérdidas resistivas se calculan con base en la expresión I^2R . En cada subsistema se calculan las pérdidas resistivas para la demanda máxima de la carga por los métodos usuales y con esa base se obtienen las pérdidas resistivas en un intervalo dado a través de la relación cuadrática entre la demanda en dicho intervalo y la demanda máxima, como se demuestra a continuación. El procedimiento descrito se puede aplicar para todas las pérdidas resistivas, es decir, en las líneas de los sistemas de transmisión y distribución, en las líneas primarias, para las pérdidas resistivas de los transformadores de subtransmisión y distribución, para las líneas secundarias y para los conductores de las acometidas.

Para el caso de las pérdidas resistivas de los transformadores de distribución, se puede considerar como primera aproximación la misma curva de demanda registrada al inicio del alimentador primario, cuando no se dispone de registros en los transformadores.

De la relación entre la demanda de pérdida resistiva (D_{RL-max}) a demanda máxima de la carga (D_{Pmax}) y la demanda de pérdida resistiva (D_{RL-i}) a una demanda i cualquiera de la carga (D_{Pi}), permite calcular la pérdida a la demanda i mediante la ecuación (4).

$$D_{RL-i} = \left(\frac{D_{Pi}}{D_{Pmax}} \frac{\cos \phi_{max}}{\cos \phi_i} \right)^2 D_{RL-max} \quad (4)$$

La ecuación (4) se aplica para cada una de las demandas de la carga y se obtiene la curva de demandas de las pérdidas resistivas. El procedimiento resulta correcto porque la demanda es una función escalón en el intervalo; por lo tanto, la relación se cumple durante el intervalo completo y produce como resultado la demanda de pérdida, que es otra función escalón.

Al obtener las demandas de las pérdidas resistivas, se cumple lo expresado en la ecuación (3), es decir que la sumatoria de las demandas multiplicado por el tiempo del intervalo de demandas es la energía de la pérdida resistiva en el período de registro.

Pérdidas en el núcleo de los transformadores. Tomando en cuenta que las pérdidas en el núcleo (D_{CL}) dependen de la densidad de flujo magnético en el mismo, la cual a su vez depende del voltaje de alimentación al transformador, puede ser considerada como independiente de la variación de la demanda es decir, permanece constante durante el período de análisis.

$$D_{CL} = N \neq f(D) \quad (7)$$

Calculada la potencia de la pérdida en el núcleo de los transformadores se tiene la curva de demandas correspondiente a dicha pérdida que será totalmente plana durante todo el período de registro.

Pérdidas en redes secundarias. A través de un muestreo de las redes secundarias del alimentador se pueden calcular las pérdidas resistivas en el grupo de secundarios (D_{SL}) pertenecientes a dicho primario. El cálculo de las pérdidas para los secundarios de la muestra, se realiza con base en los registros de la curva de demanda en los bornes de bajo voltaje de los transformadores de distribución que los alimentan, con base en por lo menos una semana representativa de cada estación del año. Luego, se obtiene una curva típica para aplicar sobre ella el procedimiento general para las pérdidas resistivas descrito previamente; tomando como base las pérdidas a demanda máxima obtenidas de la modelación de las redes secundarias de la muestra.

Pérdidas en acometidas. Las acometidas se agrupan en los tamaños más usuales y se consideran las longitudes más empleadas para definir la potencia de pérdidas resistivas a demanda máxima del cliente correspondiente. A partir de la potencia de pérdidas para demanda máxima se emplea el procedimiento general para determinar las pérdidas en las acometidas (D_{sdl}), con la curva de demandas registrada a los bornes del transformador de distribución más próximo a la carga correspondiente, pero considerando la demanda máxima individual en lugar de la demanda máxima diversificada.

Pérdidas en contadores de energía. Los contadores de energía tienen una pérdida (D_{mL}) que se debe fundamentalmente a la excitación de las bobinas voltimétricas; es decir que se puede considerar que no depende de la carga. Puede calcularse de las familias de contadores presentes en el sistema.

Pérdidas no técnicas. Como se mencionó antes, las pérdidas no técnicas corresponden a la carga no registrada es decir a aquella que, por una razón u otra, no se factura. Desde el punto de vista del cálculo de las pérdidas, la curva de demandas de esta componente de las pérdidas tiene una forma similar a la curva de la carga; es decir, puede ser obtenida a través de una relación con la demanda de la carga. La curva de demandas de la carga se obtiene de restar de la curva de demanda registrada al inicio del alimentador todas las componentes de las pérdidas técnicas.

III.- Metodología de Estimación

Con los procedimientos descritos en la sección anterior, se obtienen las curvas de demanda de cada componente de las pérdidas técnicas, es decir el valor de la demanda por componente para cada intervalo del período en estudio.

En cada intervalo de la curva registrada para el suministro en el alimentador, del valor de la demanda al inicio del alimentador se restan: la demanda de pérdidas resistivas en la línea del alimentador y en los devanados de los transformadores de distribución, la demanda de pérdidas en el núcleo de los transformadores de distribución y las pérdidas en los contadores de energía. Se restan, igualmente, las demandas de pérdidas para las redes secundarias y para las acometidas, tomando en cuenta que estos valores toman como base la curva de demanda registrada a los bornes del secundario de los transformadores de distribución y tipificada para el grupo de muestra de los secundarios del alimentador primario.

Puesto que, del registro de demandas al inicio del alimentador se han restado todas las pérdidas técnicas, el resultado que se obtiene es la curva de demanda para la verdadera carga. Sin embargo, esta carga comprende la "Carga Registrada" y la "Carga No Registrada". La primera corresponde a la definición que se hizo en la sección anterior de la "Energía Registrada" mientras la última, equivale a las pérdidas no técnicas.

En la matriz obtenida del registro al inicio del alimentador y definida en la ecuación (2), se añaden los vectores columna correspondientes a cada componente de las pérdidas y la columna de la demanda de la verdadera carga (D_L) como se presenta en la ecuación (5), la misma que puede manejarse en una hoja electrónica para realizar todos los cálculos implícitos en las ecuaciones, necesarios para obtener D_L .

$$\begin{bmatrix} d & t & D_P & D_{RL} & D_{CL} & D_{SL} & D_{sdL} & D_{mL} & D_L \end{bmatrix} \quad (5)$$

Para lograr el cierre de la estimación es necesario recordar que la división entre pérdidas no técnicas y "Carga Registrada" se realiza considerando que ambas componentes tienen la misma naturaleza y por lo tanto tienen la misma forma de curva de demandas, es decir el mismo factor de carga.

La energía correspondiente a las Pérdidas No Técnicas (E_{NT}) está perfectamente definida después del cálculo de la energía correspondiente a las "Pérdidas Técnicas" (E_{TL}), la misma que se obtiene, como se recordará, del sumatorio de las demandas de cada vector columna multiplicado por el tiempo del intervalo de demanda, es decir aplicando la ecuación (2) para cada componente. E_{NT} se obtiene de la ecuación (6).

$$E_{NT} = E_S - E_R - E_{TL} \quad (6)$$

Por otro lado, el factor de carga para la curva de demandas de la carga representada por el vector columna D_L se lo obtiene de la energía correspondiente y de su demanda máxima. El factor de carga de dicha curva es común para la "Carga Registrada" y para la "Carga No Registrada". Es decir, que si se conoce la energía de las Pérdidas No Técnicas y su factor de carga, está definida su demanda máxima.

Con el último paso descrito se completa el cálculo de todas las componentes de las pérdidas tanto en demanda como en energía.

IV Aplicación de la Metodología.-

En Latinoamérica y el Caribe las pérdidas en los sistemas eléctricos son altas. En 1991 el Banco Mundial y la Organización Latinoamericana de Energía (OLADE) publicaron un detallado estudio [3] de la situación del subsector eléctrico en la región y determinaron que en 1988 las pérdidas promedio eran de 17% y que en algunos países se llegaba a pérdidas de más de 30%. A pesar de que ésta situación ha mejorado en algunos países de la región, en otras el panorama descrito antes se mantiene inalterado.

Sobre la base de lo antedicho, se han tomado muestras de algunos alimentadores primarios de varios países a los efectos de probar la metodología presentada en éste trabajo. Los primarios seleccionados no son casos típicos, en realidad fueron elegidos para aplicar el método a varias formas de curvas de carga y en diferentes sectores de consumo para observar las diferencias que el método nuevo produce comparado con la ecuación normalmente utilizada para estimar el factor de pérdidas.

Por otro lado, las muestras incluidas corresponden a países en los que no hay prácticamente estacionalidad en la carga pues están ubicados en una latitud en la que el clima es el mismo todo el año. Debido a esto es suficiente analizar una semana característica y extrapolarla para obtener los resultados anuales.

Para dar una idea del perfil de demanda en cada muestra y al mismo tiempo presentar los perfiles de demanda de los componentes de pérdidas, se escogen tres formas de presentar los resultados.

a.- Alimentador primario de 22,9 kV

Se refiere a un primario que da servicio a una zona de industrias livianas. Tiene una demanda pico de 8,79 MW y suministra energía por 715,2 MWh. El factor de carga del perfil de demanda del suministro es 48,4%. Los perfiles de demanda para los componentes principales se muestran en la Figura 1.

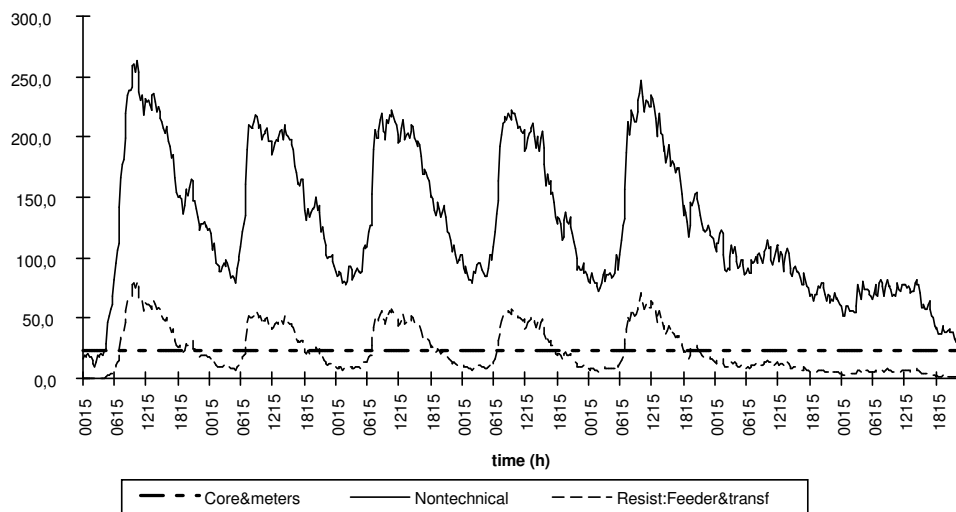


Fig. 1. Perfiles de demanda de los componentes de las pérdidas

Los resultados del análisis de los componentes de pérdidas, como porcentaje de la energía suministrada al transformador, se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1
Componentes de Pérdidas para Alimentador de 22,9 kV

Componente	Pérdidas (%)	
	Demanda	Energía
Total	6,1	5,5
Resistivas, líneas del alimentador y laterales	0.9	0.5
Núcleos de Trafs. de Dist. y medidores	0.3	0.5
Secundarios y acometidas	1.8	1.4
No técnicas	3.1	3.0

Manteniendo la pérdidas técnicas sin modificar, el factor de pérdidas correspondientes a un conjunto de pérdidas no técnicas se calcula entre 0 y 10% de la energía suministrada. El factor de pérdidas fluctúa como se presenta en la Figura 2.

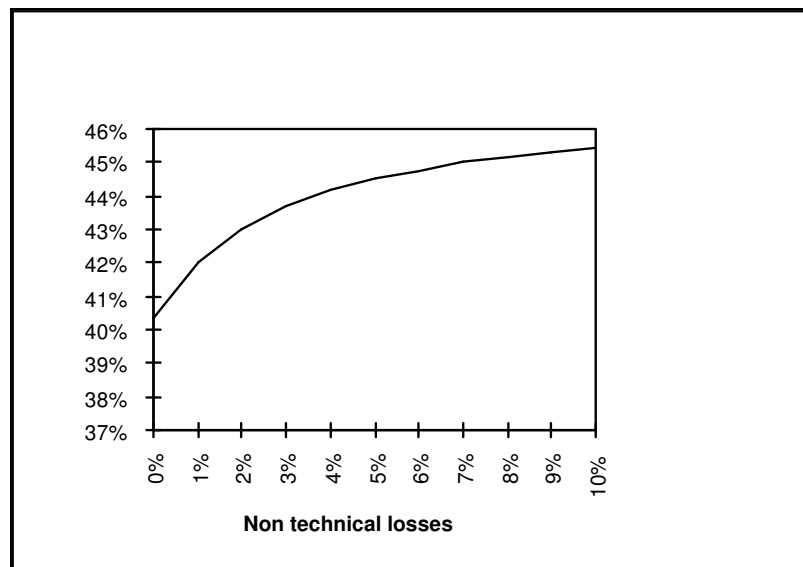


Fig. 2. El factor de pérdidas en función de las pérdidas no técnicas

b.- Alimentador Primario de 13,2 kV (No. 1)

Se trata de un primario que alimenta una zona residencial. Tiene una demanda de pico de 9,12 MW y suministra 872,1 MWh de energía. El factor de carga del perfil de demanda del suministro es 56,9%. La composición de los principales pérdidas producen el perfil de demanda de la Figura 3.

El resultado del análisis de los componentes de pérdidas , como porcentaje de la energía suministrada al transformador, se muestra en la Tabla 2.

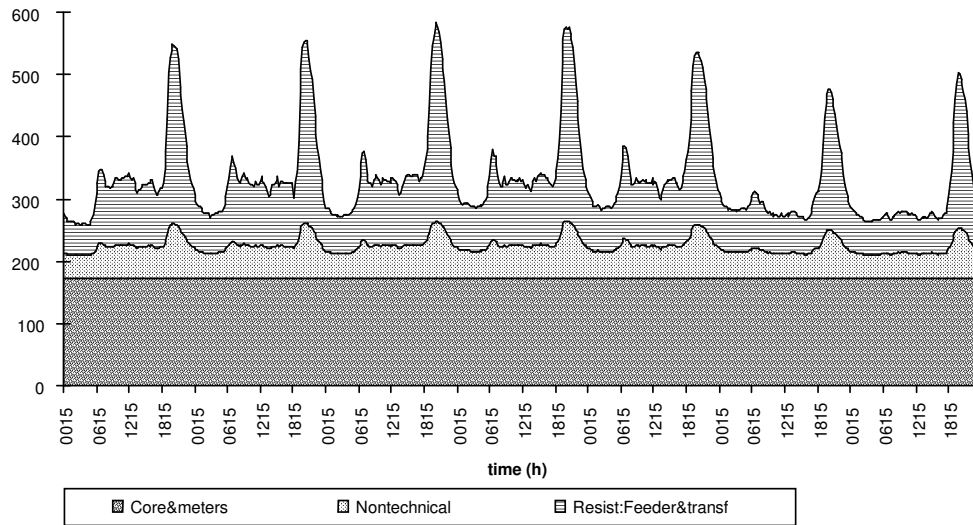


Fig. 3. Composición de las pérdidas principales para el alimentador de 13,2 kV, No. 1

Tabla 2
Componentes de Pérdidas Para Alimentador de 13,2 kV, No. 1

Componente	Pérdidas (%)	
	Demanda	Energía
Total	8.8	8.2
Resistivas, líneas del alimentador y laterales	3.5	2.1
Núcleos de trafos de Dist. y medidores	1.9	3.3
Secundarios y acometidas	2.4	1.7
No técnicas	1.0	1.0

c.- Alimentador Primario de 13,2 kV (No. 2)

El alimentador de 13,2 kV elegido como ejemplo sirve cargas comerciales y residenciales. Tiene una demanda pico de 10,7 MW y suministra una energía de 1238,8 MWh. El factor de carga del perfil de demanda del suministro es 70,1%. El perfil de demanda registrado al comienzo del alimentador con la participación de los componentes de pérdidas aparece en la Figura 4.

El resultado del análisis de los componentes de pérdidas, como porcentaje de la energía suministrada al alimentador, se muestra en la Tabla 3.

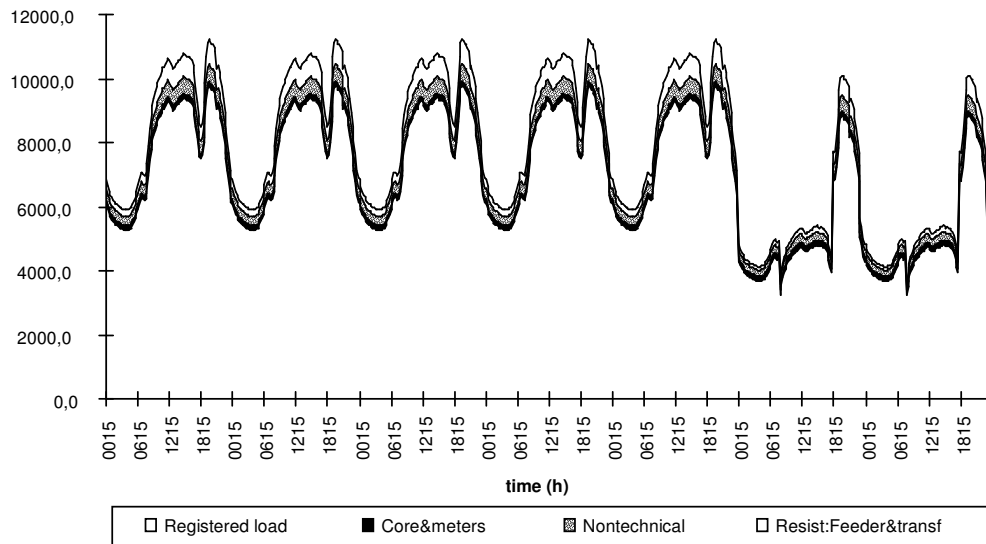


Fig. 4. Componentes de pérdidas para el alimentador de 13,2 kV No. 2

Tabla 3
Componentes de pérdidas para alimentador de 13,2 kV, No. 2

Componente	Pérdidas (%)	
	Demanda	Energía
Total	16,2	14,2
Resistivas, líneas del alimentador y laterales	7,3	5,6
Núcleos de trafos de Dist. y medidores	1,4	1,9
Secundarios y caídas de servicio	2,4	1,7
No técnicas	5,2	5,0

d.- Factor de Pérdidas y variación de la constante A

La ecuación (10) reproduce la expresión usual como se presenta en la referencia [2] en la página 38, para determinar el factor de pérdidas (F_{ls}) en función del factor de carga F_{ld} .

$$F_{ls} = A(F_{ld}) + (1 - A)(F_{ld})^2 \quad (10)$$

La constante A adopta valores entre 0,2 y 0,3 para ciertas formas de curva de carga.

En los ejemplos precedentes, el factor de pérdidas y la constante A de la ecuación (10) adoptan los valores mostrados en las Tablas 4 y 5 respectivamente.

Tabla 4
Factor de pérdidas

Alimentador	Pérdidas No Técnicas		
	0%	5%	10%
22,9 kV	40,3%	44,5%	45,4%
13,2 kV- No. 1	52,1%	53,1%	53,5%
13,2 kV- No. 2	58,3%	61,3%	62,9 %

Tabla 5
Constante A

Alimentador	Pérdidas No Técnicas		
	0%	5%	10%
22,9 kV	0.561	0.619	0.632
13,2 kV- No. 1	0.584	0.594	0.599
13,2 kV- No. 2	0.489	0.515	0.528

V.- Conclusiones

El método descrito en el trabajo presente muestra la inseguridad que introduce la estimación del factor de pérdidas en la determinación de la energía correspondiente a la pérdida de energía calculada en el pico de demanda debido a las características particulares del total de los componentes de las pérdidas.

Las pérdidas resistivas, como función cuadrática de la demanda, enfatizan los picos de pérdidas. Las pérdidas constantes en el núcleo tienden a suavizar la curva de pérdidas. Las pérdidas no técnicas, con un perfil de demanda que es similar al perfil de carga, introducen una variación adicional. Está claro que dependiendo de cuál es el componente mas importante, el perfil de demandas de las pérdidas tendrá una forma diferente y debido a esto, el factor de pérdidas es diferente.

La estimación que se hace usualmente adoptando un valor para la constante A en la ecuación (10) produce resultados erráticos confirmados en las tablas 4 y 5 y deberían ser reemplazados por la estimación de pérdidas de energía basadas en los perfiles de demanda registrados para el sistema eléctrico de potencia.

Para finalizar, el conocimiento de los perfiles de demanda en cada componente de pérdidas hace posible entender mejor la participación individual tanto en la demanda como en el suministro de energía y garantiza la importancia que corresponde a cada circunstancia analizada.

Referencias Bibliográficas

- 1 Poveda, Mentor, “A New method to Calculate Power Distribution Losses in an Environment of High Unregistered Loads”, 1999 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition, New Orleans, USA, April 1999.
- 2 Westinghouse. Distribution Systems: Electric Utility Engineering Reference Book. Westinghouse Electric Corporation, Pittsburgh, Pa., USA 1965.
- 3 World Bank and Latin American Energy Organization, “Evolution, Situation, and Prospects of the Electric Power Sector in the Countries of Latin America and the Caribbean”, World Bank and OLADE, 1991 (ISBN 9978-70-012-9).

Mentor E. Poveda nació en Quito, Ecuador. Se graduó como Ingeniero Eléctrico en la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador en 1972 y obtuvo el Master of Science in Electrical Engineering en “Purdue University”, USA. Trabaja a tiempo parcial como profesor de ingeniería eléctrica en la Escuela Politécnica Nacional de Ecuador y es consultor internacional en energía para la OLADE (Organización Latinoamericana de Energía). Sus campos específicos de interés son los sistemas de distribución de energía eléctrica, la eficiencia energética y la simulación de máquinas rotativas.