

EVALUACIÓN DE UN ALGORITMO DE CÁLCULO DE PÉRDIDAS TÉCNICAS, UTILIZADO POR DISTRIBUIDORAS DE ENERGÍA ELÉCTRICA DE ARGENTINA.

Dr.-Ing. Pascual Héctor O.⁽¹⁾
opascual@frlp.utn.edu.ar

Ing. Albanese Ariel A.⁽¹⁾
albanese@frlp.utn.edu.ar

MsC.-Ing. Maccarone José L.⁽¹⁾
josmacca@gmail.com

Esp.-Ing. Fata Omar A.⁽¹⁾
oafata@frlp.utn.edu.ar

Dr.-Ing. Bellomo Luis D.⁽¹⁾
lbellomo@frlp.utn.edu.ar

Ing. Di Clemente Carlos⁽²⁾
carlos.diclemente@edensa.com.ar

⁽¹⁾ Grupo de I+D sobre Tratamiento de Señales en Sistemas Eléctricos (TSSE)
Universidad Tecnológica Nacional Facultad Regional La Plata. Dto. Electrotecnia.
Dirección: 60 y 124, La Plata, CP (1900), Buenos Aires, Argentina.

⁽²⁾ Empresa Distribuidora de Energía Norte S.A. (EDEN)
Dirección: Carlos Pellegrini N°1023 – Piso 10, CABA, Código Postal: C1009ABU, Argentina.

Resumen:

En relación con la operación y explotación de los sistemas de distribución eléctrica, la determinación de sus pérdidas de energía tiene vital importancia, estas pérdidas pueden agruparse en técnicas y no técnicas. El cálculo de las pérdidas técnicas puede efectuarse a través de distintos métodos entre los cuales se encuentran los de estimación, basados en datos tales como: potencia pico, potencia promedio y potencia de pérdida para el valor máximo de carga en el periodo considerado. En redes con numerosa cantidad de alimentadores es una práctica habitual la utilización de los citados métodos de estimación para cuantificar las pérdidas técnicas en virtud de que éstos permiten disminuir el tiempo de cálculo.

Es objeto del presente trabajo comparar los resultados obtenidos con el método de estimación utilizado actualmente para el cálculo de las pérdidas técnicas por empresas distribuidoras de energía eléctrica de Argentina, como por ejemplo EDEN (Empresa Distribuidora de Energía Norte S.A.), con otros algoritmos de estimación utilizados para tal efecto.

Palabras claves: Pérdidas, Métodos, Errores, Factor de carga de pérdidas.



I. Introducción.

En una distribuidora de energía eléctrica, la diferencia de energía ingresada (compra) y la energía egresada (venta) se define generalmente como pérdida de energía. Estas pérdidas pueden dividirse en técnicas y no técnicas. Las pérdidas técnicas tienen su origen en el hecho de que los sistemas eléctricos de potencia se encuentran compuestos por una variada cantidad de elementos, que no presentan un comportamiento ideal de funcionamiento en su régimen nominal de explotación. Existen diferentes métodos que pueden ser utilizados para la determinación de las pérdidas técnicas tales como los que se describen en [1], [2], [3], [4] y [5].

Las pérdidas técnicas de energía vinculadas con un alimentador de media tensión típico están relacionadas principalmente con el valor de la resistencia eléctrica de los conductores, la magnitud cuadrática de la corriente eléctrica que por ellos circula y el tiempo de exposición de dichos conductores a la circulación de la mencionada corriente.

Considerando que la corriente eléctrica en un alimentador de media tensión típico no permanece constante conforme transcurre el paso del tiempo, el valor de pérdida técnica de energía, asociada con dicho alimentador, para un determinado periodo de tiempo queda expresado a través de la expresión (1).

$$E_p = \int_0^t P_p(t) dt = \int_0^t I^2(t) r dt \quad (1)$$

Dónde:

E_p : Energía de pérdida. [Joule]

P_p : Potencia de pérdidas. [W]

I : Corriente eficaz [A]

r : Resistencia eléctrica [ohm]

t : Tiempo [seg]

Para disminuir considerablemente la cantidad de flujos de carga que deberían realizarse

para contemplar la variación de corriente a lo largo de un periodo determinado y facilitar la resolución de la ecuación (1), es una práctica habitual la utilización de métodos de estimación para los cuales se determina el valor de potencia de pérdida para la corriente eficaz máxima ($P_{p \max}$) correspondiente al periodo de análisis, por ser éste valor de corriente un valor característico y típicamente disponible para los alimentadores. Luego a través de la expresión (2) se obtiene el valor de la energía de pérdida E_p correspondiente al alimentador considerado.

$$E_p = t \times P_{p \max} \times F_{cp} \quad (2)$$

Dónde:

$P_{p \max}$: Potencia de pérdidas para el momento de la demanda máxima. [W]

F_{cp} : Factor de carga de pérdidas.

La potencia de pérdida máxima $P_{p \max}$ multiplicada por el tiempo arrojará un valor de energía, que afectado por el *Factor de carga de pérdida* F_{cp} permitirá obtener el valor de energía de pérdida correspondiente al periodo de tiempo t que se esté considerando.

Mediante la aplicación de la ecuación (2) es posible calcular la energía pérdida en cada alimentador de media tensión que compone el sistema eléctrico, utilizando como dato su demanda máxima. El factor de carga de pérdida F_{cp} , se obtiene a través de diferentes expresiones empíricas [6], [7], [8] y [9]. El método de estimación [5] empleado por distribuidoras de energía eléctrica de la República Argentina, como es el caso de la Empresa Distribuidora de Energía Norte S.A. (EDEN), utiliza para el cálculo del F_{cp} la expresión (3) que se desprende de [6].

$$F_{cp} = 0.7 \times (F_c)^2 + 0.3 \times F_c \quad (\leq 1) \quad (3)$$

En esta última F_c es el factor de carga y se obtiene a través de la relación entre el valor medio de la corriente eficaz y el valor de corriente eficaz máxima correspondiente al



periodo considerado, como se puede observar en la ecuación (4).

$$F_c = \frac{\int_0^t I dt}{t I_{max}} \quad (\leq 1) \quad (4)$$

Dónde:

I : Corriente eficaz del alimentador. [A]

I_{max} : Corriente eficaz máxima registrada en un periodo determinado de tiempo. [A]

Es objeto del presente trabajo comparar los resultados de pérdidas técnicas calculadas con el método de estimación utilizado actualmente por empresas distribuidoras de energía eléctrica de Argentina, en el cual el factor de carga de pérdidas F_{cp} es calculado a través de la ecuación (3), con los resultados obtenidos de aplicar la misma metodología de estimación pero empleando otras expresiones para el cálculo del F_{cp} .

II. Factor de carga de pérdidas.

El factor de carga de pérdida F_{cp} es definido como la relación entre el valor promedio de la potencia de pérdida y el valor de potencia de pérdida máxima del periodo t considerado (5)

$$F_{cp} = \frac{\int_0^t P_p(t) dt}{t P_{p max}} \quad (5)$$

Con el objeto de simplificar la obtención del F_{cp} existen numerosas fórmulas de aproximación, una de ellas es la mostrada en (3) o expresión (A) de Tabla 1. Para realizar el análisis comparativo se consideraran las formulas mostradas en la mencionada Tabla 1, las cuales han sido propuestas por diferentes autores [6], [7], [8] y [9].

Tabla-1: Formulas para el cálculo del F_{cp} .

(A)	$F_{cp} = 0.3 F_c + 0.7 F_c^2$
(B)	$F_{cp} = 0.2 F_c + 0.8 F_c^2$

(C)	$F_{cp} = 0.15 F_c + 0.85 F_c^2$
(D)	$F_{cp} = 0.083 F_c + 1.036 F_c^2 - 0.119 F_c^3$
(E)	$F_{cp} = 0.08 F_c + 0.92 F_c^2$
(F)	$F_{cp} = F_c^{1.8}$
(G)	$F_{cp} = F_c^{1.912}$
(H)	$F_{cp} = \frac{F_c^2 (2 + F_c^2)}{1 + 2 F_c}$

III. Determinación de los errores.

Para determinar los errores que se cometen en la estimación de las pérdidas de energía se comparan los resultados obtenidos a través de la utilización de los algoritmos de aproximación del F_{cp} , mostrados en la Tabla 1, con el valor de pérdida real. Este valor de pérdida de energía real es calculado a través de realizar sucesivas simulaciones de flujos de cargas a lo largo del lapso de tiempo considerado, (que en nuestro caso es de 24 Hs), determinando en cada una de ellas la potencia de pérdida $P_p(t)$. El intervalo de tiempo seleccionado entre simulaciones, para el presente trabajo, fue de 15 minutos.

En el análisis efectuado se contemplaron los valores de mediciones provenientes de dos alimentadores de media tensión de la empresa de distribución de energía EDEN, los cuales se relacionan con consumos urbanos.

Para realizar la comparación entre las estimaciones de la energía de pérdida obtenidas a través de la utilización de las diferentes fórmulas correspondientes al Factor de carga de pérdida F_{cp} (Tabla 1), se contemplan las curvas de cargas diarias en las diferentes estaciones del año (verano, otoño, invierno y primavera), para las cuales se consideran tres días representativos de la semana: un día hábil, un día sábado y un día domingo o feriado. Las curvas de cargas correspondientes a los días mencionados y para los alimentadores vinculados con este estudio, se muestran en las Figuras 1 y 2.

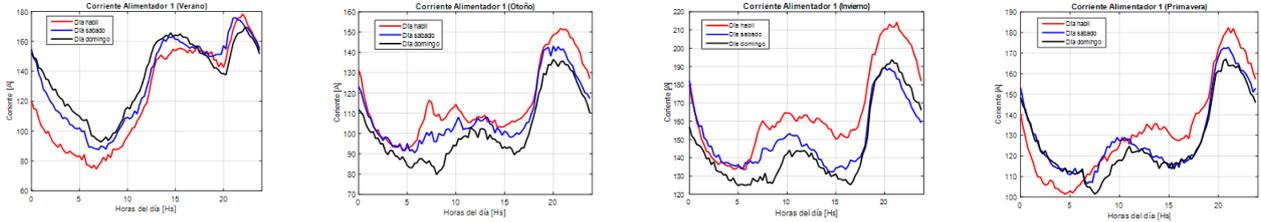


Fig. - 1: Curvas de carga del **ALIMENTADOR 1** para los diferentes días y estaciones del año.

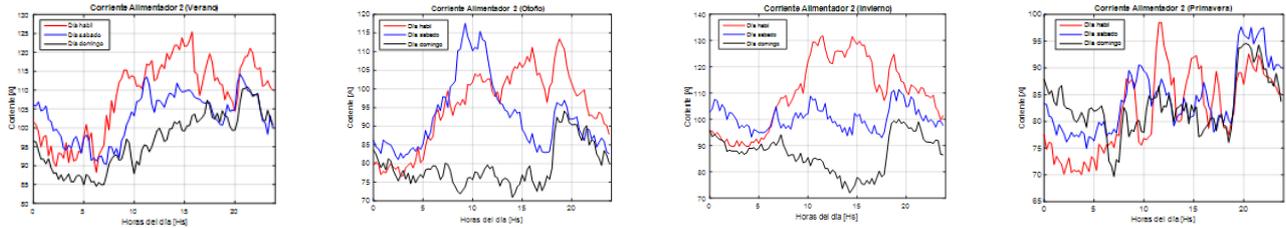


Fig. - 2: Curvas de carga del **ALIMENTADOR 2** para los diferentes días y estaciones del año.

IV. Resultados obtenidos.

Los resultados que se desprenden de los cálculos efectuados, utilizando para los mismos la información que se refleja en las Figuras 1 y 2, se encuentran en las Tablas 2 y 3.

En las mencionadas Tabla 2 y 3, se muestran los errores cometidos en la estimación de la energía de pérdida para los diferentes días

considerados y utilizando las diferentes fórmulas correspondientes al Factor de carga de pérdida F_{cp} (citadas en la Tabla 1). Cabe mencionar al respecto que cualquier error cometido para la estimación del F_{cp} , éste se trasladará directamente al valor obtenido de energía de pérdida E_p en virtud de la utilización de la expresión (2).

Tabla-2: Errores en la estimación de la Energía de Pérdida para el **ALIMENTADOR 1**

Formula de F_{cp}	Error para días de Verano [%]			Error para días de Otoño [%]			Error para días de Invierno [%]			Error para días de Primavera [%]			Error medio [%]	Desv. σ
	Día hábil	Día Sábado	Día Domingo	Día hábil	Día Sábado	Día Domingo	Día hábil	Día Sábado	Día Domingo	Día hábil	Día Sábado	Día Domingo		
(A)	2.50	1.55	1.92	3.09	3.84	2.42	5.91	4.61	5.48	5.14	4.03	4.44	3.74	1.44
(B)	-1.57	-1.42	-0.41	0.02	0.87	-0.76	2.98	2.16	2.29	1.53	0.86	1.37	0.66	1.49
(C)	-3.60	-2.90	-1.57	-1.52	-0.61	-2.34	1.51	0.94	0.70	-0.27	-0.73	-0.17	-0.88	1.57
(D)	-2.99	-2.21	-0.91	-0.82	0.09	-1.65	2.23	1.63	1.41	0.42	-0.03	0.54	-0.19	1.59
(E)	-6.45	-4.98	-3.20	-3.66	-2.69	-4.57	-0.54	-0.77	-1.54	-2.79	-2.95	-2.32	-3.04	1.72
(F)	-2.73	-2.06	-0.81	-0.66	0.24	-1.48	2.38	1.73	1.58	0.63	0.14	0.70	-0.03	1.57
(G)	-6.70	-5.06	-3.22	-3.75	-2.77	-4.67	-0.60	-0.79	-1.63	-2.95	-3.05	-2.40	-3.13	1.76
(H)	-6.04	-5.18	-3.65	-3.85	-2.93	-4.69	-0.83	-1.22	-1.70	-2.73	-3.10	-2.52	-3.20	1.58

Tabla-3: Errores en el cálculo de la Energía de Pérdida para el ALIMENTADOR 2

Formula de F_{cp}	Error para días de Verano [%]			Error para días de Otoño [%]			Error para días de Invierno [%]			Error para días de Primavera [%]			Error medio [%]	Desv. σ
	Día hábil	Día Sábado	Día Domingo	Día hábil	Día Sábado	Día Domingo	Día hábil	Día Sábado	Día Domingo	Día hábil	Día Sábado	Día Domingo		
(A)	2.53	1.65	2.21	2.33	4.08	1.42	3.02	2.04	1.57	1.88	3.16	1.39	2.27	0.81
(B)	0.99	0.59	0.74	0.48	1.49	-0.37	1.11	0.98	0.10	-0.05	1.58	0.01	0.64	0.62
(C)	0.22	0.05	-0.00	-0.44	0.19	-1.27	0.16	0.45	-0.64	-1.01	0.79	-0.68	-0.18	0.62
(D)	0.77	0.49	0.54	0.17	0.88	-0.67	0.78	0.88	-0.10	-0.39	1.35	-0.16	0.38	0.61
(E)	-0.86	-0.69	-1.03	-1.73	-1.63	-2.52	-1.17	-0.30	-1.66	-2.36	-0.32	-1.64	-1.33	0.72
(F)	0.81	0.50	0.57	0.23	1.00	-0.61	0.84	0.89	-0.06	-0.33	1.39	-0.13	0.43	0.61
(G)	-0.83	-0.65	-1.00	-1.71	-1.66	-2.50	-1.15	-0.26	-1.63	-2.35	-0.29	-1.60	-1.30	0.73
(H)	-1.43	-1.21	-1.60	-2.28	-2.02	-3.07	-1.72	-0.82	-2.23	-2.90	-0.89	-2.20	-1.86	0.72

V. Análisis de Resultados.

En las Tablas 2 y 3, se aprecia la cuantificación de los errores en el cálculo de la energía de pérdida E_p para los dos alimentadores seleccionados y para distintos días de la semana. A los efectos de contar con algún indicador que permita realizar una comparación entre los resultados obtenidos, se muestran también en las mencionadas tablas, el valor medio y la desviación estándar de los errores cometidos en la estimación de la E_p , este último con el objeto de evaluar el grado de dispersión de dichos errores.

Para que se pueda apreciar con mayor claridad las diferencias entre los errores que se presentan para la estimación de la E_p , se vuelcan los datos de las Tablas 2 y 3 en la Figuras 3 y 4.

De las mencionadas Tablas y Figuras se desprende que para el tipo de carga que abastecen los alimentadores 1 y 2, los errores que se cometen en la estimación de la energía de pérdida empleando las diferentes expresiones del Factor de carga de pérdida no superan, en ninguno de los casos, el $\pm 7\%$

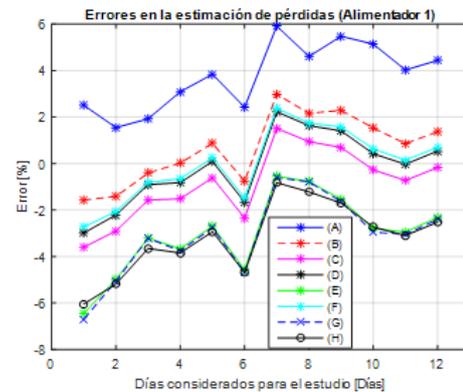


Fig. 3: Errores en el cálculo de la Energía de Pérdida para el ALIMENTADOR 1.

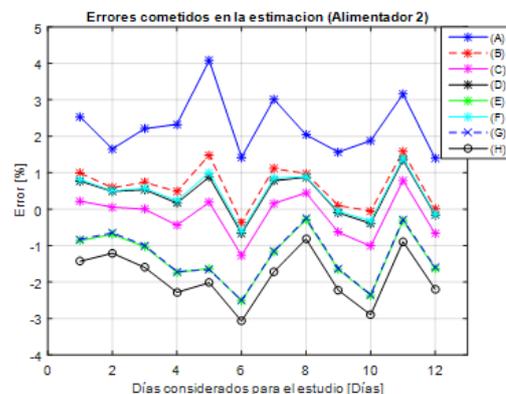


Fig. 4: Errores en el cálculo de la Energía de Pérdida para el ALIMENTADOR 2.



En relación con el algoritmo empleado por Empresas Distribuidoras de la Argentina para la estimación de las pérdidas en los sistemas de distribución de energía eléctrica, (expresión (A) de Tabla 1), es posible decir que el mismo presenta una tendencia positiva en el error para todos los casos analizados, razón por la cual el citado algoritmo arroja resultados de pérdidas superiores a los reales. Además de las mencionadas Tablas 2 y 3, se desprende que para los perfiles de cargas analizados, las expresiones del Factor de carga de pérdida (D), (F), (C) y (B) permitirían estimar resultados con errores sensiblemente inferiores a los cometidos por el empleo de la expresión (A), utilizada actualmente por empresas distribuidoras de energía de Argentina. Cabe mencionar en este aspecto que una alternativa para tener la posibilidad de disminuir el error en la estimación de la E_p es la utilización de un F_{cp} particularizado por tipo de alimentador, teniendo en cuenta su curva de carga típica [10].

VI. Conclusiones.

Del análisis realizado se desprende que los errores cometidos por la aplicación de todos los algoritmos de estimación de pérdidas de energía en las redes de distribución, analizados en el presente trabajo, se encuentran por debajo del $\pm 7\%$.

En relación con el algoritmo empleado por empresas distribuidoras de Argentina para realizar la estimación de la energía de pérdida, se pudo determinar que para los casos analizados, éste arroja valores superiores a los reales.

En virtud de lo mencionado y con el objeto de poder contar con valores de pérdida que se encuentren más cercanos a la realidad es que consideramos apropiado realizar los cálculos de pérdidas utilizando para la estimación del Factor de carga de pérdidas algunas de las expresiones: (D), (F), (C) o (B) de Tabla 1, las cuales presentan errores de cálculo inferiores a los cometidos por el empleo de la expresión

utilizada actualmente por empresas distribuidoras de energía de Argentina, cuando se estiman las pérdidas en alimentadores que presentan curvas de carga como las mostradas en las Figuras 1 o 2.

VII. Agradecimientos.

El grupo de trabajo agradece la valiosa colaboración de la Empresa Distribuidora de Energía Norte S.A. (EDEN), la cual suministró datos de vital importancia para la realización del presente estudio. Además destacamos el interés que sus autoridades presentan en mejorar el servicio brindado por la Empresa, apoyando las actividades de Investigación y Desarrollo vinculadas con el sector eléctrico.

VIII. Referencias.

- [1] Nazarko, J.; Styczynski, Z.; Poplawski, M.; "The fuzzy approach to energy losses calculations in low voltage distribution networks", *Power Engineering Society Winter Meeting, 2000. IEEE*, Vol 4, Page(s): 2763 – 2768, 23-27 Jan. 2000.
- [2] H. M. Khodr, J. Molea, I. García, C. Hidalgo, P. C. Paiva, J. M. Yusta, and Alberto J. Urdaneta, "Standard Levels of Energy Losses in Primary Distribution Circuits for SCADA Application", *IEEE Transactions on Power Systems*, Vol. 17, N° 3, August 2002.
- [3] JIANG Hui-lan, AN Min, LIU Jie, XU Jian-qiang "A Practical Method of Calculating the Energy Losses in Distribution Systems Based on RBF Network", *2005 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference & Exhibition, Asia and Pacific, Dalian, China*.
- [4] Hong-Rui Wang, Guo-Jie Yang, Xiu-Ling Liu, "A New Algorithm for the Theoretical Energy Loss Calculation of the Distribution Network Based on Artificial Neural Networks", *Proceedings of the Sixth International Conference on Machine Learning and Cybernetics*, Hong Kong, 19-22 August 2007.
- [5] Pascual H. O., Sansogni F. H. y Albanese A. A., "Metodología de Cálculo de Pérdidas Técnicas de Energía en Redes Eléctricas", *Congreso Latinoamericano de*



CLADE 2016

III CONGRESO DE LAS AMERICAS
DE DISTRIBUCIÓN ELÉCTRICA

26 al 28 de Septiembre de 2016
Ciudad de Córdoba, República Argentina

Organiza



Auspicia



Distribución Eléctrica CLADE 2008, Mar del Plata, Buenos Aires, Argentina, 22-24 de septiembre de 2008.

- [6] F. H. Buller, C. A. Woodrow, "Load Factor Equivalent Hour Values. Compared", *Electrical World*, pp 59-60, July 1928.
- [7] A. S. Pabla, "*Electric Power Distribution*", New York, McGraw-Hill, 2004, ISBN 1-85233-324-3, pp 199-216.
- [8] M. W. Gangel and R. F. Propst, "Distribution Transformer Load Characteristics", *IEEE Trans. Power Apparatus and Systems*, Vol. 84, pp 671-685, August 1965.
- [9] M. W. Gustafson; J. S. Baylor; S. S. Mulnix, "The equivalent hours loss factor revisited", *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 3, No. 4, pp 1502-1508, 1988.
- [10] Pascual Héctor, Albanese Ariel, Fata Omar y Bonavita Eduardo, "Determinación del factor de carga de pérdidas de energía en redes eléctricas de media tensión mediante el uso de redes neuronales," *Congreso Internacional de Distribución Eléctrica CIDEL Argentina 2010*, Buenos Aires, Argentina, 27-29 de septiembre de 2010.