

ESTIMACIÓN DE CURVAS DE DEMANDA DE CONSUMIDORES, TRANSFORMADORES DE DISTRIBUCIÓN Y ALIMENTADORES PRIMARIOS EN SISTEMAS DE DISTRIBUCIÓN

Load profile estimation in points of consumption, distribution transformers and feeders in distributions systems

RESUMEN

Este artículo presenta una metodología para la estimación de curvas de demanda de potencia diaria a nivel de consumidor, transformador y alimentador primario. La estimación de las curvas toma como referencia mediciones de demanda de consumidores representativos, suministradas por empresas de distribución. Utilizando las curvas de demanda estimadas, se realiza agregaciones para obtener las curvas estimadas de los transformadores de distribución y del alimentador principal. Las curvas estimadas del alimentador son comparadas con las mediciones realizadas por las empresas obteniéndose un factor de corrección para aplicar a cada curva del consumidor y transformador.

PALABRAS CLAVES: curva de carga, desviación estándar, estimación de carga.

ABSTRACT

This paper shows a methodology for daily load curves estimation of consumers, transformers and feeders. Curves estimation is based on measurements of representative consumers, supplied by electric utilities. Using these estimated curves, an aggregation to obtain the estimation curves of the transformers of the network and for the feeder is made. The estimated curves for the feeder are compared with the real measurements made by the companies, obtaining a factor of correction, to apply to each curve of individual consumer.

KEYWORDS: load curve, standard deviation, daily load curves.

1. INTRODUCCIÓN

Los sistemas de distribución pueden estar compuestos por una o varias subestación de distribución y son alimentados por una o más líneas de transmisión. Cada subestación de distribución puede alimentar uno o más circuitos primarios, también denominados alimentadores primarios. Además, típicamente se encuentran cerca de los centros de consumo.

Los sistemas distribución presentan características muy particulares que hacen que sean diferentes a los sistemas de subtransmisión y transmisión, como:

Diversidad en las conexiones: Los usuarios se conectan al sistema a través de transformadores trifásicos y monofásicos (conectados entre fase y neutro o entre fase y fase). Además, los circuitos primarios y sus laterales pueden llevar 2, 3 o 4 hilos.

Desbalance: La demanda de los consumidores varía con el tiempo y en diferente proporción dependiendo del tipo de usuario (residencial, comercial, industrial o mixta). Lo

LUIS ALFONSO GALLEGO

Ingeniero Electricista, M.Sc.
Estudiante de Doctorado
UNESP, Campus Ilha Solteira, São Paulo, Brasil.
gallegopareja@gmail.com

AISLAN FRANCISQUINI

Ingeniero Electricista, M.Sc.
aislanfrancisquini@hotmail.com

OSCAR GÓMEZ CARMONA

Ingeniero Electricista, M.Sc.
Docente Auxiliar
Universidad Tecnológica de Pereira.
jr@utp.edu.co

ANTONIO PADILHA FERTRIN,

Ingeniero Electricista, Ph.D.
Profesor titular
UNESP, Campus de Ilha Solteira,
Departamento de Engenharia Elétrica.
padilha@dee.feis.unes.br

anterior, asociado a la diversidad de las conexiones produce el desbalance entre las fases del sistema.

Asimetría: Las redes del sistema de distribución no presentan transposición, por lo que la componente reactiva de las líneas no presentan valores promedios iguales. Adicionalmente, las redes primarias se construyen con diferentes tipos de conductores, estructuras y pueden ser aéreas o subterráneas.

Topología radial: Aunque en los sistemas de distribución pueden construirse enlaces o anillos, estos operan en forma radial por facilidad en la coordinación de las protecciones y menores costos de inversión.

La demanda futura del sistema de distribución, es un fenómeno que depende de variables económicas, demográficas, políticas y sociales y no es posible determinar en forma exacta cuál será su valor futuro. Con el fin de determinar la demanda futura y su comportamiento, se realizan dos tipos de estudios: pronóstico de la demanda, en los cuales se predice para un año futuro el valor de la demanda máxima y de

modelamiento de la demanda en los que se pretende capturar el patrón de comportamiento.

En este artículo, se desarrolla una metodología para determinar el comportamiento de la demanda de los consumidores a partir de mediciones tomadas en puntos representativos (muestra).

Una vez determinadas todas las curvas de demanda de los usuarios, se calculan las curvas de los transformadores a través de la agregación de curvas de consumidores y finalmente se obtiene la demanda del alimentador primario haciendo la agregación de las curvas de demanda de los transformadores.

La metodología puede ser aplicada en empresas distribuidoras con escasez de equipos de medición para realizar un estimativo de la demanda consumida en puntos específicos y la demanda total del sistema.

2. METODOLOGÍA PARA LA DETERMINACIÓN DE CURVAS DE DEMANDA EN REDES DE DISTRIBUCIÓN.

Para la estimación de las curvas se empleó la estadística clásica [1], debido a que se contaba con una base de datos de demanda mensual, suministrada por una empresa distribuidora de energía del estado de São Paulo (Brasil).

2.1 Curvas de Demanda Representativas

Las curvas de demanda de consumidores representativos fueron obtenidas a través de mediciones con equipos apropiados instalados por la empresa de energía. A estos consumidores se les realizó mediciones en los días ordinarios, sábados y domingos. Los datos entregados por la empresa, fueron clasificados dependiendo del tipo de consumidor: *residencial*, *comercial* e *industrial*, además, para cada tipo de consumidor se realizó una clasificación en sub-clases, dependiendo de la energía consumida mensualmente (kWh/mes): 0-100, 101-200, 201-300, 301-500 y por encima de 500. En la tabla 1 se muestra el porcentaje de consumidores en las diferentes clases de consumo.

Clase	0-100	101-200	201-300	301-500	> 500
%	18	35	25	16	6

Tabla 1: Frecuencia de distribución de las clases de consumo.

Consumidores Residenciales: la curva de demanda se caracteriza por un consumo prácticamente constante durante todo el día, con un aumento al terminar la tarde y un pico de demanda entre las 18 y 21 horas de la noche.

Consumidores comerciales: estos corresponden a una pequeña parte del consumo de energía eléctrica. Son clasificados según su actividad y cantidad de energía consumida, además, se caracterizan por tener un consumo de energía empezando entre las 9 y 10 de la mañana y terminando a la media noche.

Consumidores industriales: normalmente se alimentan en media tensión (13,8 kV) y poseen subestaciones internas para bajar el voltaje. También son clasificadas dependiendo la actividad y la cantidad de energía consumida. Las curvas de demanda diarias para estos consumidores son muy variadas y dependen principalmente de la actividad que realizan ya que hay empresas que dejan de consumir energía o consumen muy poca dependiendo de la hora del día

2.2 Análisis estadístico

La metodología propuesta emplea dos conceptos bien conocidos de la estadística: el valor medio y la desviación estándar.

El valor medio (\bar{X}): es un valor típico o representativo de un conjunto de datos. Este valor tiende a estar localizado en el punto central dentro del conjunto de datos ordenados según su valor. La media también es denominada valor de tendencia central y es representada como:

$$\bar{X} = \frac{x_1 + x_2 + \dots + x_n}{n} = \frac{\sum_{j=1}^n x_j}{n} \quad (1)$$

Desviación estándar (S): determina el grado de dispersión de los datos respecto al valor medio y es representado como:

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_j - \bar{x})^2}{n}} \quad (2)$$

A través del análisis estadístico de los datos entregados por la empresa de energía, es posible obtener un conjunto de curvas de demanda representativas para cada sub-clase y para cada tipo de consumidor. Las curvas construidas serán la del valor medio $M(t)$ y la de desviación estándar $D(t)$, para los días ordinarios, sábados, y domingos.

En la figura 1, se muestra las curvas representativas $M(t)$ y $D(t)$ de los consumidores residenciales para la clase 301-500 kWh/mes para los días ordinarios.

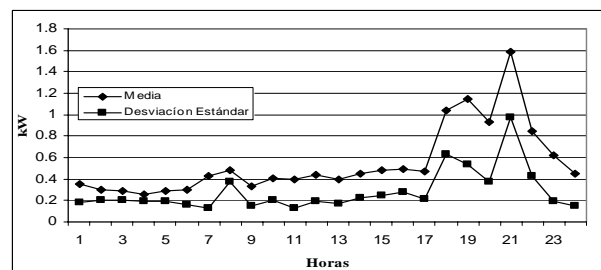


Figura 1: Curvas representativas $M(t)$ y $D(t)$ de la clase 301-500 kWh/mes.

Para realizar las curvas de demanda de consumidores individuales es necesario que todas las curvas

representativas estén en la misma base. Por lo tanto, estas curvas son divididas por una base, denominada potencia base (P_{base}) [1], dada por:

$$P_{base} = \frac{1}{24} \int_1^{24} M(t) dt = \frac{\text{consumo mensual (kWh)}}{24 \times 30} \quad (3)$$

Las curvas representativas divididas por sus respectivas potencias base son denominadas curvas representativas de clases de consumo en valores “por unidad” (p.u.), siendo una curva de valor medio ($m(t)$) y una curva de desviación estándar ($d(t)$).

En la figura 2 se muestra un ejemplo de la curva de demanda estimada para un día ordinario de un consumidor que tiene un consumo mensual de 339 kWh/mes. Las curvas representativas son referentes a la clase 301 a 500 kWh/mes. El valor de la potencia base es 0.470833.

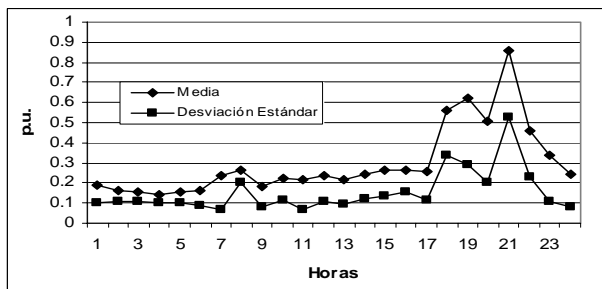


Figura 2: Curvas representativas $m(t)$ y $d(t)$ de la clase 301-500 kWh/mes en p.u.

Para estimar las curvas de demanda $\mu_i(t)$ y $\sigma_i(t)$ de los consumidores individuales, se utilizan las curvas base $m(t)$ y $d(t)$ de las clases y el valor del consumo de energía eléctrica en el mes (kWh/mes) del consumidor.

Con el valor de consumo mensual de energía, se calcula la potencia base según la relación (3) y se multiplica por la curva representativa, obteniendo así, la curva estimada para el consumidor.

$$\mu_i(t) = m(t)P_{base} \quad (4)$$

$$\sigma_i(t) = d(t)P_{base} \quad (5)$$

Se puede determinar la curva de demanda diaria en un punto de la red de distribución, suponiendo una distribución Normal (Gaussiana) de los valores, con una cierta probabilidad de no ser excedida.

$$F(t) = \mu(t) + k \cdot \sigma(t) \quad (6)$$

donde k sale de la tabla de distribución normal de probabilidades, que establece la probabilidad (pr) de que la curva obtenida no sea excedida, por ejemplo: $k = 1.3$, $pr = 90\%$, $k = 2.0$, $pr = 98\%$. Se debe escoger una

probabilidad de acuerdo a la aplicación de la curva o de acuerdo al nivel de exactitud que se desee.

Las curvas de demanda de los consumidores individuales pueden ser calculadas con el siguiente algoritmo:

1. Obtener las curvas de demanda medidas por la empresa distribuidora y realizar la división en clases y sub-clases.
2. Calcular las curvas representativas en “p.u.” ($m(t)$ y $d(t)$) para cada sub-clase.
3. Con el valor de la potencia base (P_{base}), obtener la curvas $\mu_i(t)$ y $\sigma_i(t)$ de cada consumidor.
4. Con el valor de consumo mensual (kWh/mes) obtener la curva estimada de demanda del consumidor.

2.3 Agregación de Curvas

Calculadas las curvas de demanda para cada consumidor se realiza la agregación de estas curvas al transformador de la siguiente manera:

$$\mu_T(t) = \sum_{i=1}^{ncons} \mu_i(t) \quad (7)$$

$$\sigma_T^2(t) = \sum_{i=1}^{ncons} (\sigma_i(t))^2 \quad (8)$$

donde:

- $\mu_T(t)$: Curva media estimada del transformador.
- $\mu_i(t)$: Curva media estimada de cada consumidor.
- $\sigma_T^2(t)$: Curva de desviación estándar estimada del transformador.
- $\sigma_i(t)$: Curva de desviación estándar estimada de cada consumidor.
- $ncons$: Número total de consumidores.

Después de realizada la agregación de curvas individuales a los transformadores, se realiza las agregaciones de estas curvas al inicio del alimentador, obteniendo así la curva de demanda estimada para el alimentador.

2.4 Ajuste de las curvas de demanda

La curva de demanda estimada del alimentador es comparada con una curva real del mismo, la cual es medida por la empresa de energía. Esta medición es normalmente realizada al inicio del alimentador. A través de esta comparación se realiza el cálculo de un factor de corrección para cada hora del día. Esto se realiza para mejorar la estimación de las curvas de demanda individuales y de los transformadores. El factor de corrección se calcula de la siguiente forma:

$$f_c(j) = \frac{P_{real}(j)}{P_{Calculada}(j)} \text{ con } j = 1 \dots 24 \quad (9)$$

donde:

- $f_c(j)$: Factor de corrección para cada hora del día.
 $P_{real}(j)$: Potencia real del alimentador en la hora j .
 $P_{calculada}(j)$: Potencia estimada del alimentador en la hora j .

El factor de corrección es aplicado a las curvas de demanda estimadas de todos los consumidores conectados al alimentador en estudio. Posteriormente, es realizada una nueva agregación en los transformadores y al inicio del alimentador. Este proceso es realizado hasta aproximar las curvas estimadas a las curvas reales.

Para alimentadores de gran tamaño es necesario considerar las pérdidas de energía que el alimentador está aportando al sistema. Las pérdidas varían de acuerdo a la hora del día y a la cargabilidad del sistema. Una estimación de las pérdidas en las líneas de la red puede ser calculada mediante [5,8]:

$$P_{\text{p\u00e9rdidas}}(j) = |Z \cdot I^2(j)| \quad (9)$$

donde:

- $P_{\text{p\u00e9rdidas}}(j)$: P\u00e9rdidas en las l\u00edneas a cada hora del d\u00eda.
 Z : Impedancia de la l\u00ednea.
 $I(j)$: Corriente que pasa por la l\u00ednea en cada hora.

Las p\u00e9rdidas son calculadas con un flujo de potencia considerando las curvas de demanda anteriores al ajuste, pues estas p\u00e9rdidas deben ser parte de la obtenci\u00f3n de la curva del alimentador.

Las p\u00e9rdidas en los transformadores son compuestas por las p\u00e9rdidas en el hierro y las p\u00e9rdidas en el n\u00facleo (cobre). Las p\u00e9rdidas en el hierro pueden ser consideradas constantes a lo largo del d\u00eda. Las p\u00e9rdidas en el n\u00facleo var\u00edan de acuerdo a la cargabilidad del transformador. As\u00ed, las p\u00e9rdidas en el transformador pueden ser calculadas con la siguiente expresi\u00f3n [8]:

$$P_{\text{trafo}}(j) = P_{Fe}(j) + P_{Cu}(j) \cdot \left(\frac{P(j)}{P_{nom}} \right)^2 \quad (10)$$

donde:

- $P_{\text{trafo}}(j)$: P\u00e9rdidas en el transformador a cada hora del d\u00eda.
 $P_{Fe}(j)$: P\u00e9rdida t\u00edpica en el hierro del transformador, encontrado en las tablas de los fabricantes.
 $P_{Cu}(j)$: P\u00e9rdida t\u00edpica en el cobre del transformador, encontrado en las tablas de los fabricantes.
 $P(j)$: Potencia verificada a cada hora en el transformador.
 $P_{nom}(j)$: Potencia nominal del transformador.

Para calcular la curva de demanda en los transformadores y el alimentador se puede seguir el siguiente algoritmo:

1. Agregar las curvas de todos los consumidores conectados a los transformadores.
2. Obtener las p\u00e9rdidas de los transformadores.
3. Calcular la curva de demanda en el alimentador por el m\u00e9todo de agregaci\u00f3n de curvas de demanda de los transformadores conectados al respectivo alimentador o ramal.
4. Comparar la curva real y la calculada para obtener el factor de correcci\u00f3n.
5. Ajustar las curvas de demanda de los consumidores seg\u00fan el factor de correcci\u00f3n correspondiente.
6. Realizar de nuevo el proceso de agregaci\u00f3n con las curvas ya corregidas en los transformadores y alimentador.

3. PRUEBAS Y RESULTADOS

La metodolog\u00eda presentada fue probada con un alimentador real que tiene 123 barras y 87 transformadores. La base de datos fue suministrada por una empresa de distribuci\u00f3n de energ\u00eda el\u00e9ctrica del estado de S\u00e3o Paulo y fue clasificada por tipo de usuario *Residencial, Comercial e Industrial* y por clases, dependiendo de la cantidad de energ\u00eda consumida mensualmente. Adem\u00e1s se consider\u00f3 la distribuci\u00f3n normal con una probabilidad del 90% de que las curvas no exceden su l\u00edmite.

En las figuras 4a, 4b, 4c y 5a, 5b, 5c se muestran las curvas t\u00edpicas de dos consumidores conectados a un transformador de 75 kVA. El primer consumidor es residencial con una demanda mensual de 285 kWh/mes y el segundo es comercial con una demanda mensual de 466 kWh/mes.

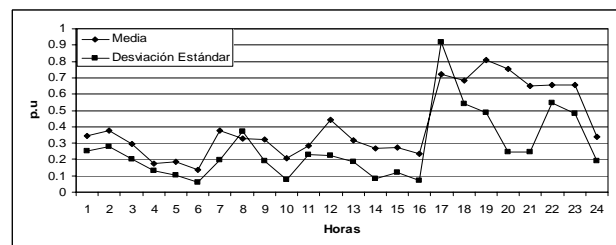


Figura 4a: Curva estimada de un usuario residencial con demanda de 285 kWh/mes, d\u00eda ordinario.

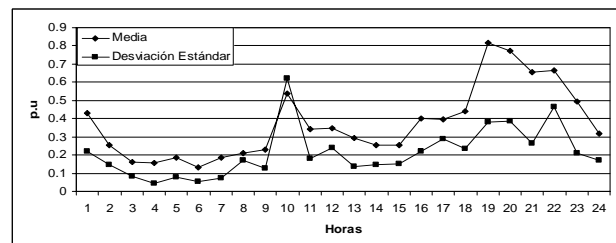


Figura 4b: Curva estimada de un usuario residencial con demanda de 285 kWh/mes, d\u00eda s\u00e1bado.

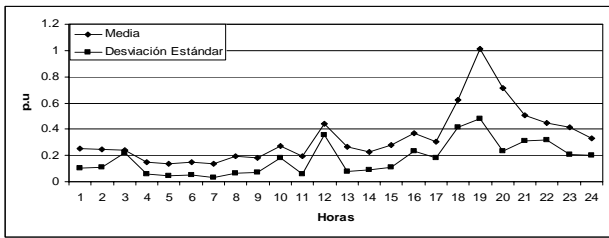


Figura 4c: Curva estimada de un usuario residencial con demanda de 285 kWh/mes, día domingo.

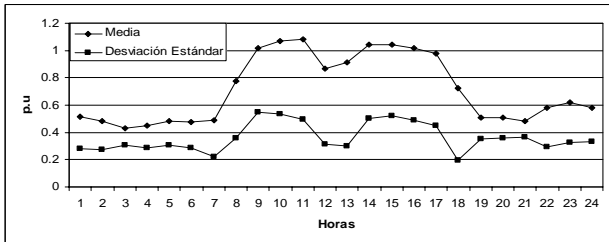


Figura 5a: Curva estimada de un usuario comercial con demanda de 466 kWh/mes, día ordinario.

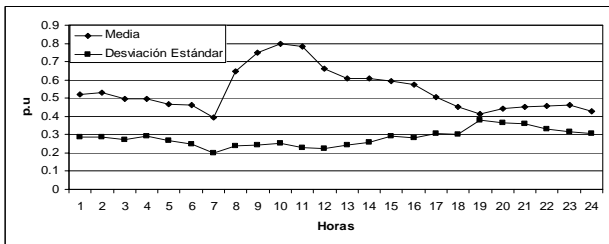


Figura 5b: Curva estimada de un usuario comercial con demanda de 466 kWh/mes, día sábado.

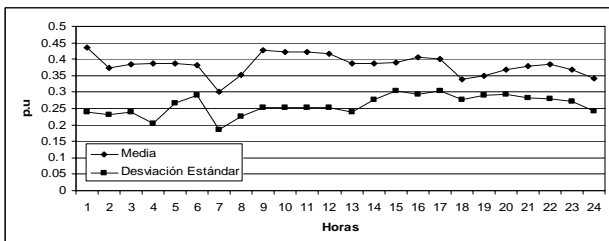


Figura 5c: Curva estimada de un usuario comercial con demanda de 466 kWh/mes, día domingo.

Para cada consumidor se calculó la curva de demanda de utilizando los respectivos valores de consumo mensual de energía. Después es realizada la agregación de las curvas en los transformadores utilizando las ecuaciones (7) y (8). En las figura 6a, 6b y 6c se muestran las curvas de demanda para un transformador de 45 kVA, para un día ordinario, sábado y domingo.

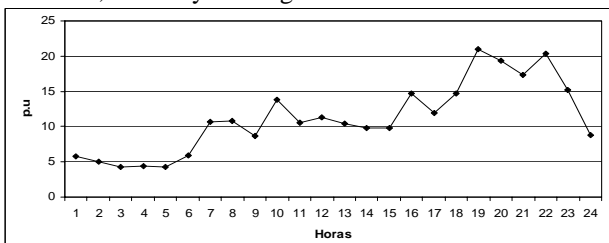


Figura 6a: Curva estimada de un transformador, día ordinario.

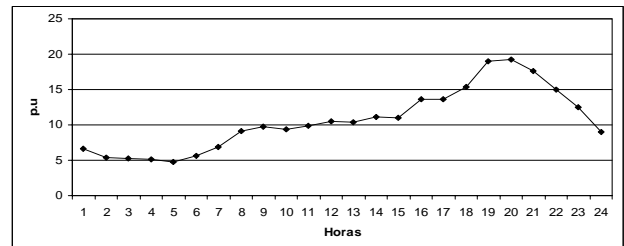


Figura 6b: Curva estimada de un transformador, día sábado.

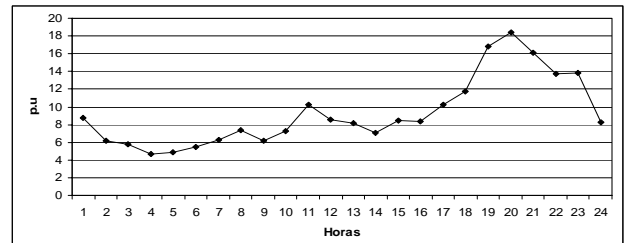


Figura 6c: Curva estimada de un transformador, día domingo.

Una vez calculadas las curvas de demanda para cada transformador, se utiliza nuevamente el método de agregación para calcular la curva de demanda del alimentador. En las figura 7a, 7b y 7c se muestran las curvas de demanda del alimentador para los días ordinarios, sábado y domingo. También se muestra la curva de demanda real del alimentador la cual fue medida por la empresa de energía.

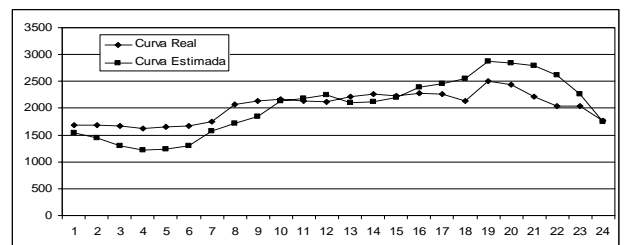


Figura 7a: Comparación entre la curva real y la curva calculada, día ordinario.

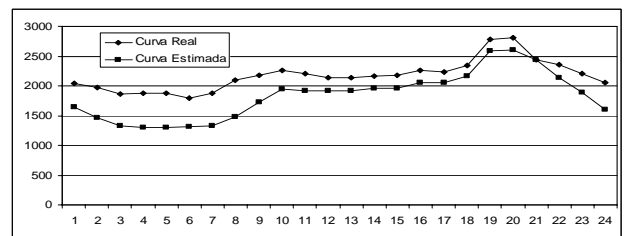


Figura 7b: Comparación entre la curva real y la curva calculada, día sábado.

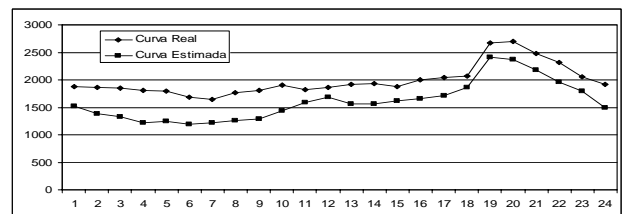


Figura 7c: Comparación entre la Curva Real y la Curva Calculada, día Domingo.

Como se muestra en las figuras 7a, 7b y 7c existe una diferencia entre las curvas estimadas y las reales. Por lo tanto, se procede a calcular el factor de corrección y se afectan todas las curvas de los consumidores por este factor. En la figura 8 se muestra la curva de demanda sin corregir y corregida para un usuario de 466 kWh/mes, en la figura 9 se muestra la curva de demanda sin corregir y corregida para un transformador de 45 kVA y en la figura 10 se realiza una nueva comparación entre las curvas de demanda estimada y la curva de demanda real todo para un día ordinario.

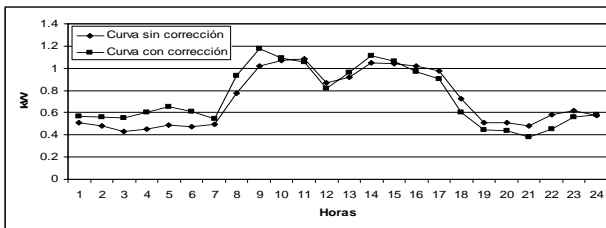


Figura 8: Curva de demanda de un usuario residencial, día ordinario.

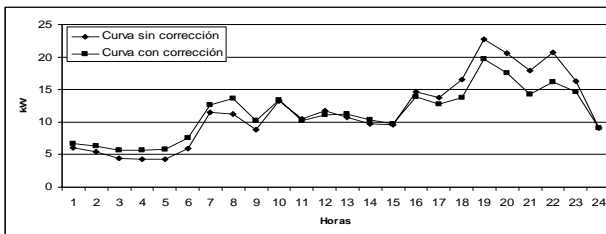


Figura 9: Curva de demanda de un transformador de 45 kVA, día ordinario.

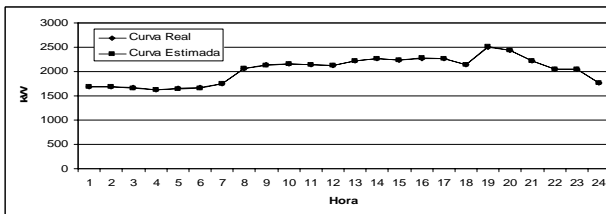


Figura 10: Comparación entre la curva real y la curva calculada corregida, día ordinario

4. CONCLUSIONES

Se presentó una metodología para la estimar las curvas de demanda de los consumidores, los transformadores de distribución y los alimentadores primarios de sistemas de distribución, a partir de curvas representativas (muestras) del sistema, y con un mínimo de datos de kWh.

Mediante un análisis estadístico, es posible determinar las curvas de demanda de todos los consumidores del sistema y con el método de agregaciones, se obtiene las curvas de demanda de los transformadores y posteriormente la del alimentador. Esta metodología no requiere de software sofisticado ni de robustos equipos de cómputo siendo aplicable en empresas distribuidoras de bajos recursos.

Mediante la clasificación de consumidores por clases y subclases es posible hallar curvas de demanda base que pueden ser aplicadas a cualquier tipo de consumidor conectado al sistema de distribución.

Mediante el factor de corrección presentado, es posible realizar buenas estimaciones de las curvas de demanda en cualquier punto del sistema ya que en la mayoría de subestaciones convencionales se realizan mediciones a nivel de circuito primario y es posible comparar la curva estimada del alimentador primario con la curva real.

La inclusión de las pérdidas técnicas del sistema (en líneas y transformadores) brinda mayor exactitud en la estimación haciendo de esta metodología una buena herramienta para aplicar en el planeamiento y operación del sistema de distribución.

La correcta estimación de las curvas de demanda de un sistema de distribución depende de la calidad de la base de datos. Los datos tomados con elementos defectuosos o la escasez de datos pueden llevar a estimar curvas de demanda que no coinciden con la realidad.

5. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J. A. Jardini, C. M. V. Tahan, S. U. Ahn, and F. M. figueiredo, "Day Load Profiles for Residential, Commercial and Industrial Low Voltage Consumers," in *IEEE Transactions on power delivery*, Vol. 15 No 1., Jun 2000.
- [2] J. A. Jardini, C. M. V. Tahan, S. U. Ahn, and S. L. S. Cabral, "Determination of the typical daily load curve for residential area, based on field measurement," in *IEEE Proceedings Supplements, T&D 94*, Chicago, IL, 1994.
- [3] J. A. Jardini and C. M. V. Tahan *et al.*, "Residential and commercial daily load curves representation by statistical function for engineering studies," in *CIREC International Conference and Exhibition on Electricity Distribution*, Brussels, Belgium, 1995.
- [4] MME. "Estudo de Campanhas de Eficiência Energética. Ministério de Minas e Energia". <http://www.mme.gov.br> (disponível em outubro de 2005).
- [5] R. Ciric, A. Padilha-Feltrin, and L. F. Ochoa, "Power Flow in Four-Wire Distribution Networks-General Approach". *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 18, no. 4, pp. 1283-1290, 2003.
- [6] D. Srinivasan, A. C. Liew, C. S. Chang, "Forecasting Daily Load Curves Using a Hybrid Fuzzy-neural Approach. Generation", *Transmission and Distribution, IEE Proceedings* – Vol. 141, Issue 6, Nov. 1994.
- [7] D. Gerbec, S. Gasperic, I. Smon and F. Gubina, "Consumers' Load Profiles Determination Based on Different Classification Methods". *IEEE PowerEngineering Society General Meeting*, vol 2 13-17, 2003.
- [8] A. A. Francisquini, "Estimação de Curvas de Carga em Pontos de Consumo e em Transformadores de Distribuição, teses de mestrado, UNESP, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Campus de Ilha Solteira, Departamento de Engenharia Elétrica. Mar, 2003.