

RESPUESTA DE LOS CIRCUITOS NIVEL I ANTE CAMBIOS DE TENSIÓN: CONSUMO Y PÉRDIDAS

GERARDO LATORRE B.

*Director Escuela de Ingenierías Eléctrica,
Electrónica y de Telecomunicaciones
Universidad Industrial de Santander
glatorre@uis.edu.co*

JORGE L. ANGARITA M.

*Ingeniero Electricista
Universidad Industrial de Santander
gisel@uis.edu.co*

PILAR M. GAONA G.

*Ingeniero Electricista
Universidad Industrial de Santander
gisel@uis.edu.co*

CARLOS G. ARANGO C.

*Ingeniero Electricista
Universidad Industrial de Santander
gisel@uis.edu.co*

RESUMEN

Este artículo presenta una metodología que busca estimar el comportamiento de la demanda de los usuarios residenciales y de las pérdidas en la red frente a los cambios de tensión del Nivel I¹. Partiendo de la caracterización del consumo de aparatos electrodomésticos, como una función de la tensión de servicio, se aplica un método general que permite obtener una mejor aproximación al comportamiento de la carga, en comparación con los modelos actualmente utilizados.

PALABRAS CLAVE: Modelos de carga, modelo híbrido, topología, niveles de tensión.

INTRODUCCIÓN

El actual esquema competitivo en el sector eléctrico, exige de las empresas la implementación de programas para mejorar su desempeño en todas las áreas. En lo que se refiere a los sistemas de distribución se requiere mejorar aspectos como: restitución de servicio, balance de carga y reducción de pérdidas.

El análisis de los sistemas de distribución demanda la utilización de herramientas computacionales, tales como flujos de carga, que exigen la determinación de la demanda y la topología del sistema.

La demanda comúnmente se caracteriza dentro de uno de los siguientes modelos: corriente, potencia o impedancia constante². La utilización de uno u otro modelo afecta de forma significativa los resultados del estudio del comportamiento del sistema, por lo que se hace necesario modelar la carga de una manera mas aproximada a la realidad. En ese sentido, la aplicación de un modelo híbrido se presenta como una buena alternativa para modelar la demanda.

¹ El nivel I de tensión en Colombia corresponde a tensiones inferiores a 1 kV.

² Impedancia, corriente y potencia constante, indican que la demanda es un valor fijo de impedancia, corriente y potencia, respectivamente, que es independiente de la tensión aplicada.

El modelo híbrido ofrece la posibilidad de caracterizar la demanda como una composición de los modelos antes mencionados.

GLOSARIO DE SÍMBOLOS

- Pi, Qi Potencias activas y reactivas calculadas para la tensión Vi.
- Poi, Qoi Potencias activa y reactiva a la tensión nominal (Vi = 1 p.u.)
- b exponente que toma el valor de :
 - "0" para el modelo de potencia constante.
 - "1" para el modelo de corriente constante.
 - "2" para el modelo de impedancia constante.
- Si Potencia compleja calculada para la tensión Vi.
- K Constante que corresponde a la ponderación de cada modelo en la carga híbrida.
- So Potencia compleja a la tensión nominal (1 p.u)

MODELOS DE DEMANDA

La carga básicamente se puede modelar como una demanda constante de potencia o corriente, como una impedancia constante, o como un modelo híbrido

A. Modelo de potencia constante.

En este modelo se asume que la potencia aparente de la carga permanece constante frente a la variación de tensión. En consecuencia la corriente en la carga disminuye con el aumento en la tensión; como se muestra en la Figura 1.

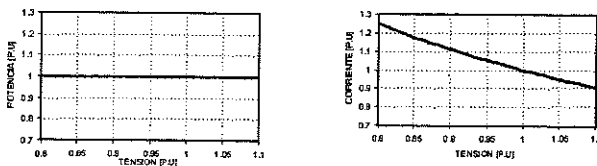


Figura 1. Características de una carga de potencia constante

$$S_{cte} = V \cdot I^* \quad p.u \quad I = \left(\frac{S_{cte}}{V} \right)^* \quad p.u \quad (1)$$

B. Modelo de corriente constante

Este modelo establece como condición que la carga mantenga la corriente constante a diferentes tensiones.

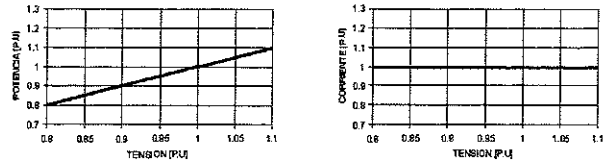


Figura 2. Características de una carga de corriente constante

$$I_{cte} = \left(\frac{S}{V} \right)^* \quad S = V \cdot I_{cte}^* \quad p.u \quad (2)$$

C. Modelo de impedancia constante

Establece como condición que la impedancia de la carga permanece constante; es decir, la potencia varía con el cuadrado de la variación de la tensión.

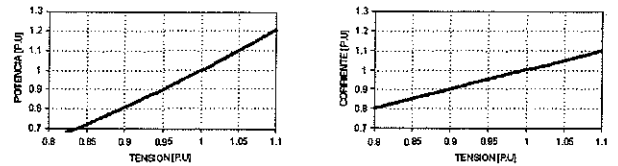


Figura 3. Características de una carga de impedancia constante

$$S = \frac{|V|^2}{Z_{cte}} \quad I = \frac{V}{Z_{cte}} \quad (3)$$

D. Modelo híbrido

Actualmente el modelamiento de demanda se hace básicamente aplicando alguno de los modelos anteriores. La necesidad de modelar la demanda de forma más cercana a la realidad, requiere ajustar una expresión que describa su comportamiento frente a las variaciones de tensión, denominado modelo híbrido; en el cual cada carga es una composición de los modelos antes especificados.

Cualquiera de los tres modelos antes presentados, como se muestra en [1], se pueden representar por la ecuación general :

$$P_i + jQ_i = P_{oi} * \left(\frac{V_i}{V_o} \right)^b + jQ_{oi} * \left(\frac{V_i}{V_o} \right)^b \quad (4)$$

El comportamiento de una carga compuesta (o híbrida), depende de la proporción que tenga de cada uno de los tres modelos considerados.

La expresión que permite modelar cargas compuestas es descrita por [1]:

$$S_i = \left(K_1 + K_2 * \left| \frac{V_i}{V_0} \right| + K_3 * \left| \frac{V_i}{V_0} \right|^2 \right) * S_0 \quad (5)$$

METODOLOGÍA PARA LA OBTENCIÓN DEL MODELO DE CARGA DE UN SISTEMA REAL

El efecto del comportamiento de la carga es un importante parámetro en el planeamiento y operación de los sistemas de distribución. Por ello, el trabajo realizado busca obtener las características agregadas de potencia suministrada³ y pérdidas en función de la tensión de servicio, para un circuito de distribución en el nivel I de tensión.

La carga agregada vista por un transformador de distribución puede ser estimada a partir del modelo de consumo de un usuario tipo, partiendo de las características de electrodoméstico, sus patrones de utilización y la topología de la red. Así, con la adecuada estimación, se puede obtener el consumo de potencia y las pérdidas activas en el sistema a cualquier nivel de tensión.

A. Caracterización de electrodomésticos a modelar

Con el fin de determinar el comportamiento de la carga en un sistema de distribución, se definieron ecuaciones para modelar el consumo de potencia de determinados electrodomésticos representativos del sector residencial, en función de las variaciones en la tensión de servicio.

Las curvas características de consumo de potencia de cada aparato fueron obtenidas de [2-3] y mediante pruebas realizadas en el laboratorio. El comportamiento de algunos de estos se presenta en la Figura 4.

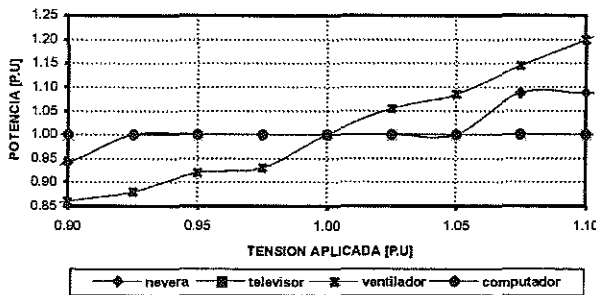


Figura 4. Característica tensión - potencia de electrodomésticos.

³ La potencia suministrada al circuito incluye tanto la demanda total como las pérdidas en la red.

B. Conformación de la carga por usuario tipo

El objetivo es obtener la característica consumo de potencia activa, propia del usuario en función de la tensión aplicada.

Los usuarios se clasificaron según el estrato socioeconómico⁴ al cual pertenecen, esto debido a que las características de consumo varían entre uno y otro.

A partir de la información suministrada en [4], acerca del tiempo de uso continuo de los electrodomésticos y la hora del día en que se emplean, se procedió a dividir la totalidad del periodo (24 horas), que condujo a la obtención de 6 intervalos de estudio, en cada uno de los cuales se veía reflejada la utilización de determinado grupo de electrodomésticos. Los intervalos considerados fueron: 4:00-8:00 a.m., 8:00-12:00 m., 12:00- 2:00 p.m., 2:00-5:00 p.m., 5:00-10:00 p.m., 10:00-4:00 a.m. La demanda diaria escalonada obtenida de estos intervalos se aproxima al comportamiento de las curvas de demanda horaria en cada estrato, como se observa En la Figura 5.

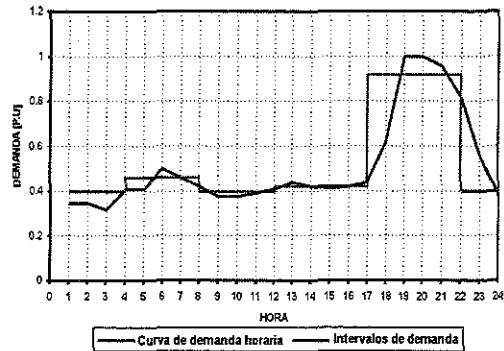


Figura 5. Curvas de demanda e intervalos

Para la obtención del valor de carga en cada intervalo por estrato (escenario), se consideraron siete electrodomésticos por su uso constante y su incidencia en el consumo. Estos fueron: televisor, equipo de sonido, computador, bombillas incandescentes, lámparas fluorescentes, nevera y ventilador. Algunos electrodomésticos que conforman la carga agregada por estrato e intervalo de tiempo, se muestran en la Tabla 1.

⁴ Los estratos en Colombia se dividen en Bajo-bajo (1-2), medio bajo (3), medio (4), medio alto (5) y alto (6).

Tabla1. Conformación de la carga.

HORA	ESTRATO SOCIOECONÓMICO			...
	I - II	III	IV	
4 am - 8 am	1*Nevera	1*Nevera	1*Nevera	...
	1*Equipo sonido	1*Equipo sonido	1*Equipo sonido	...
	3*Bombillas inc.	4*Bombillas inc.	5*Bombillas inc.	...
8 am - 12 m	1*Nevera	1*Nevera	1*Nevera	...
	1*Equipo sonido	0,5*Equipo sonido	0,5*Equipo sonido	...
		0,5*Televisor	0,5*Televisor	...
			0,4*Computador	...
...

Con base en los modelos de aparatos y escenarios escogidos, se determinaron las características agregadas de cada usuario tipo, mediante una suma de curvas punto a punto, para cada intervalo de tiempo por estrato, ver Figura 6.

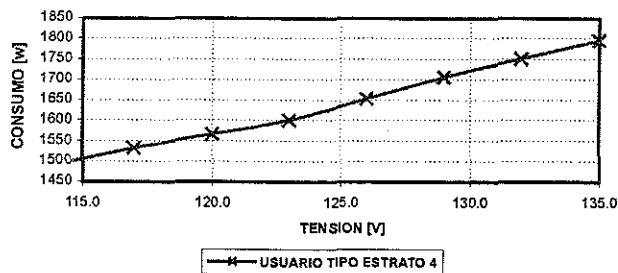


Figura 6. Curva de consumo agregado por usuario, para un intervalo determinado en el estrato 4.

Se realizó un análisis de sensibilidad con el fin de estimar el cambio en la forma de la característica, cuando se variaba la carga, modificando el tipo y la cantidad de aparatos en uso. Esto permitió observar que no se presentaban variaciones considerables, brindando confiabilidad al modelo obtenido en cada periodo de tiempo y estrato, ver Figura 7.

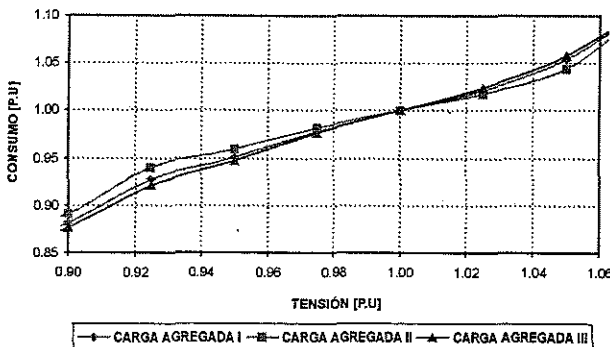


Figura 7. Análisis de sensibilidad para la carga agregada por usuario.

C. Obtención de las constantes k1, k2 y k3 para el modelo híbrido de potencia de cada usuario.

De cada intervalo de estudio, se obtuvo una característica de potencia consumida en función de la tensión. Cada característica fue llevada a la forma de la ecuación (5), que describe el modelo híbrido.

Con base en los puntos obtenidos, y mediante el uso de las herramientas de optimización de MATLAB, se obtuvo el valor de las constantes K1, K2 y K3, para cada escenario escogido, de tal manera que las ecuaciones cumplieran con los requisitos del modelo (tres componentes: corriente, potencia e impedancia en función de la tensión aplicada, y además que la suma de los coeficientes fuese 1). Un ejemplo de ajuste de la curva se aprecia en la Figura 9, y en la Tabla 2 se muestran algunos de los valores calculados para estas constantes.

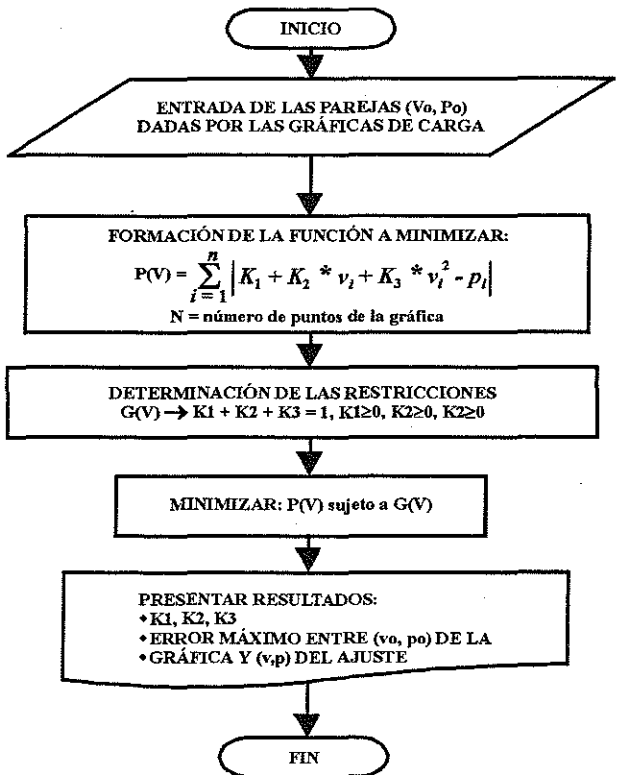


Figura 8. Diagrama de flujo para el cálculo de las constantes K1, K2, K3.

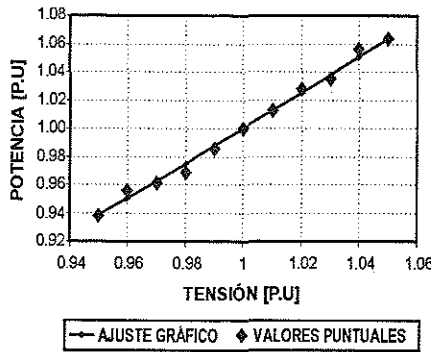


Figura 9. Ajuste gráfico de la curva agregada al modelo híbrido.

Tabla 2. Valores de las constantes K1, K2, K3 para la demanda por usuario y escenario escogido.

HORA	K	ESTRATO SOCIOECONÓMICO			
		I - II	III	IV	...
4 - 8 am	K1	0.6	0.6	0.6	...
	K2	0.4	0.2	0	...
	K3	0	0.2	0.4	...
8 - 12 m	K1	0.9	0.9	0.85	...
	K2	0	0	0.1	...
	K3	0.1	0.1	0.05	...
...

D. Ajuste del valor de carga por usuario

La carga se calculó como una composición de los electrodomésticos predominantes en cada estrato, dada por [4], y de acuerdo con los escenarios temporales escogidos. A este valor se le adicionó un 30%, que incluye un margen para los electrodomésticos que pueden estar presentes, pero que no se consideraron en el análisis debido a su baja frecuencia de utilización. Para ser consecuentes con [5], se calculó el valor máximo de la demanda aplicando los conceptos y recomendaciones para el diseño de redes de acuerdo con el estrato socioeconómico.

Se comparó el valor de demanda máxima calculada a partir de la composición de electrodomésticos por escenario, con el obtenido aplicando la norma [5]; al no presentar diferencias considerables, y dado que el objetivo del estudio es obtener la característica de potencia suministrada y pérdidas de los circuitos de distribución en función de la tensión aplicada, y no un análisis exhaustivo del comportamiento de la demanda, se conservó el valor obtenido a partir de la composición de electrodomésticos por escenario, para los cálculos posteriores. A este valor se le aplicó el factor de carga para determinar la demanda en cada intervalo. Este factor se calculó para cada escenario como un porcentaje del valor máximo, según las curvas dadas en [4 - 5].

E. Modelamiento de la red de baja tensión

Los modelos de la red fueron obtenidos a partir del inventario de circuitos reales en el sistema de distribución, para cada uno de los estratos residenciales (1, 2, 3, 4, 5 y 6) del área metropolitana de Bucaramanga, partiendo de la identificación del transformador y realizando el seguimiento del circuito correspondiente hasta cada uno de los usuarios alimentados por el mismo. Se incluye capacidad del transformador, longitud de los tramos, calibre de los conductores hasta la acometida de cada usuario y longitud de la acometida. Uno de estos circuitos se puede apreciar en la Figura 10.

Conocidos los parámetros de la red, y ya determinado el comportamiento de un usuario tipo, se procedió a obtener la característica de pérdidas y potencia suministrada, agregada del sistema de baja tensión, para cada escenario⁵, mediante flujos de carga a diferentes tensiones aplicadas en el transformador (0.95 - 1.05 p.u), tal como se muestra en las Figuras 11 y 12.

Para el análisis de flujo de cargas se consideran los circuitos como equilibrados. Ya determinadas las características agregadas y utilizando la metodología de obtención de los parámetros K anteriormente descrita, se calcularon los nuevos valores, para determinar el modelo general del circuito en todos los escenarios. Algunos resultados del ajuste al modelo híbrido para cada circuito pueden verse en la Tabla 3.

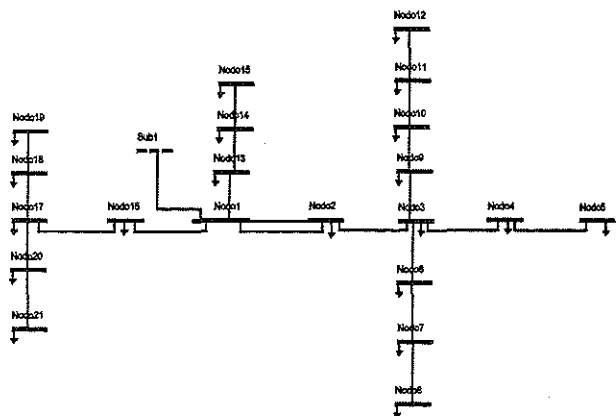


Figura 10. Topología del circuito correspondiente al estrato 2.

⁵NOTA: Los escenarios mostrados en las figuras 11 y 12 corresponden al estrato 2, en los horarios de 8 - 12 m y 2 - 5 pm (con valores K1=0.95, K2=0, K3=0.05 y K1=0.5, K2=0, K3=0.5, respectivamente).

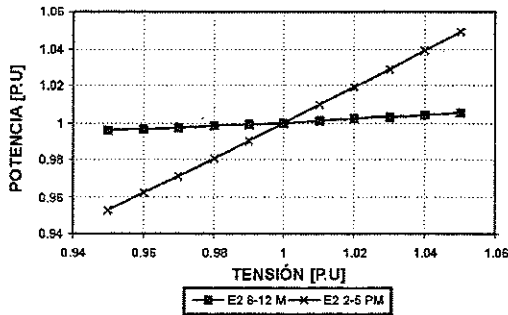


Figura 11. Características agregadas de potencia suministrada para el circuito de baja tensión.

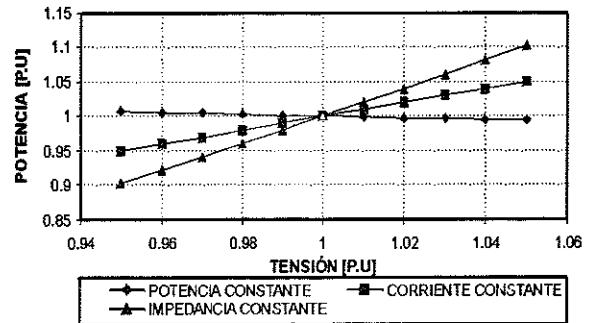


Figura 13. Características de potencia suministrada para modelos de carga constantes.

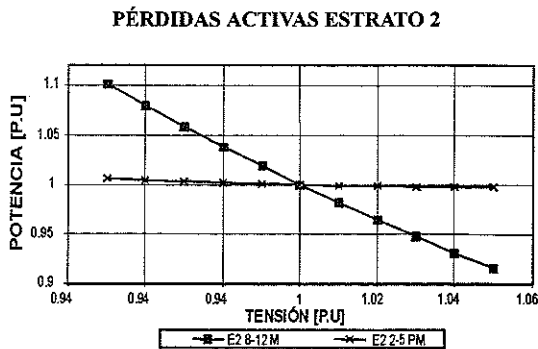


Figura 12. Características de pérdidas para el circuito de baja tensión.

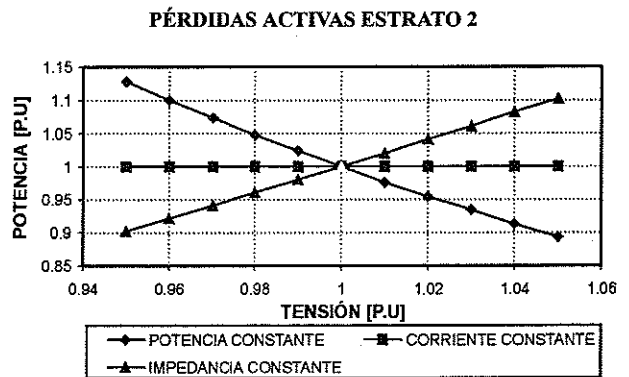


Figura 14. Características de pérdidas para modelos de carga constante.

Tabla 3. Valores de las constantes K1, K2, K3 para la potencia suministrada al circuito y escenario escogido.

HORA	CONST.	ESTRATO SOCIOECONÓMICO			
		I - II	III	IV	...
4 - 8 am	K1	0.85	0.5	0.7	...
	K2	0	0	0	...
	K3	0.15	0.5	0.3	...
8 - 12 m	K1	0.95	0.9	0.9	...
	K2	0	0	0	...
	K3	0.05	0.1	0.1	...
...

Con valores bajos de demanda, el circuito presenta un buen perfil de tensión⁶, que no es afectado de forma considerable por el modelo de carga utilizado, ver Tabla 4.

Tabla 4. Perfil de tensión en el circuito, para bajos valores de demanda.

NODO	MAGNITUD DE LA TENSIÓN			
	P Const.	I Const.	Z Const.	Híbrido
2	0.9546	0.9588	0.9618	0.9586
3	0.9173	0.9254	0.9314	0.9251
4	0.9144	0.9227	0.9289	0.9224
5	0.9112	0.9199	0.9263	0.9195
13	0.9702	0.9713	0.9724	0.9713
14	0.9594	0.9611	0.9625	0.9610
...

ANÁLISIS COMPARATIVO

Con el fin de ilustrar las diferencias en el comportamiento de la carga según el modelo utilizado, se muestran a continuación las características de potencia suministrada y pérdidas en función de las variaciones de tensión, para el mismo circuito y escenario presentado en el numeral anterior; ver Figura 13 y Figura 14.

Las Figuras 15 y 16 ilustran las diferencias en el comportamiento del circuito según el tipo de carga. Las características extremas están dadas por el modelo de potencia y el de impedancia constante, ver tabla 5. (datos obtenidos a tensión de 1 p.u)

⁶ Niveles de tensión cercanos a 1 en p.u.

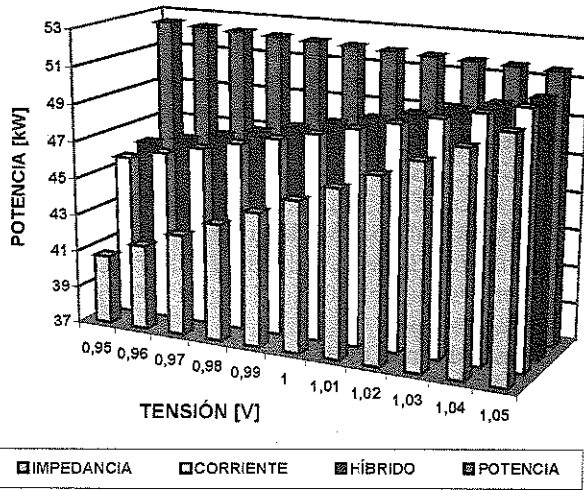


Figura 15. Diagrama comparativo, potencia activa suministrada al circuito para niveles bajos de demanda.

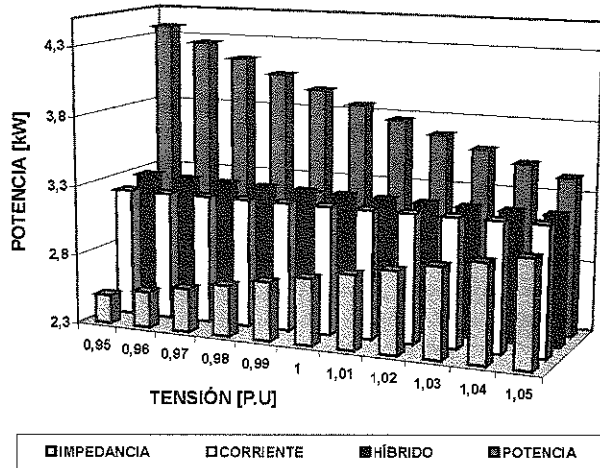


Figura 16. Diagrama comparativo, pérdidas activas del circuito para niveles bajos de demanda.

Tabla 5. Potencia suministrada al circuito y pérdidas para valores bajos de demanda.

	Potencia suministrada [kW]	Pérdidas [kW]
P. Constante	51.92	3.85
Z. Constante	45.09	2.78
Variación [%]	13.15	27.79

Los niveles de demanda en un circuito real pueden aumentar drásticamente, ya sea por fallas que originen una transferencia temporal de carga o por la adición de nuevos grupos de usuarios.

Con el fin de ilustrar la importancia y el efecto que tiene el modelo de cargas utilizado en el análisis de los sistemas, se aumentó considerablemente la demanda en el

circuito ejemplo, obteniéndose los siguientes resultados a tensión de 1 p.u., Ver Tabla 6. La comparación gráfica se puede apreciar en las Figuras 17 y 18.

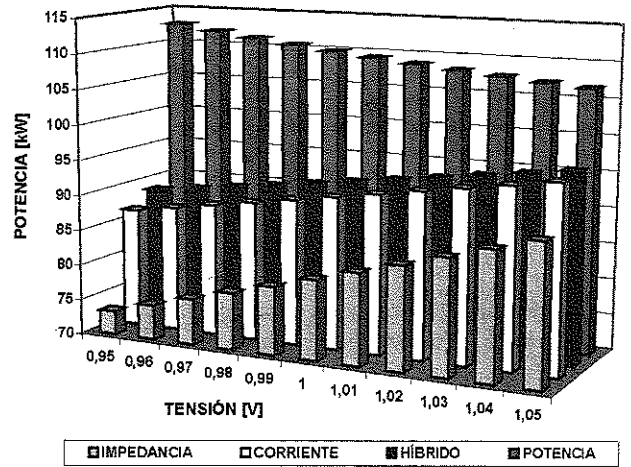


Figura 17. Diagrama comparativo, potencia activa suministrada al circuito para niveles altos de demanda.

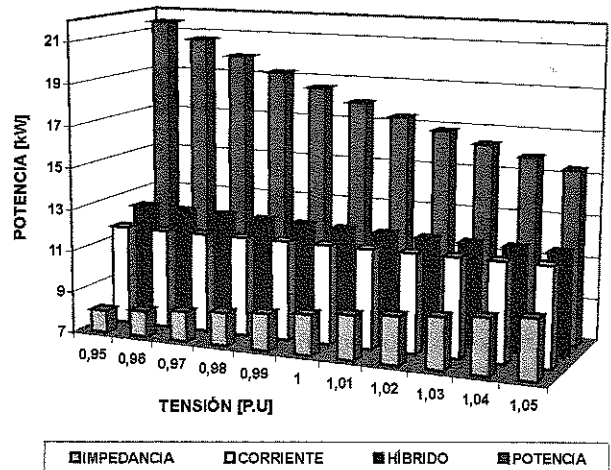


Figura 18. Diagrama comparativo, pérdidas activas del circuito para niveles altos de demanda.

Tabla 6. Potencia suministrada al circuito y pérdidas para valores altos de demanda.

	Potencia suministrada [kW]	Pérdidas [kW]
P. Constante	109.22	17.91
Z. Constante	81.21	8.95
Variación [%]	25.63	50.08

Además de las variaciones que se presentan en los parámetros de demanda y pérdidas, el perfil de tensión se ve también afectado según el modelo de cargas utilizado; esto se puede apreciar en la Tabla 7.

Tabla 7. Perfil de tensiones en el circuito, para altos valores de demanda.

NODO	MAGNITUD DE LA TENSION			
	P Const.	I Const.	Z Const.	Híbrido
2	0.9009	0.9212	0.9316	0.9198
3	0.8176	0.8574	0.8777	0.8547
4	0.8113	0.8523	0.8733	0.8495
5	0.8045	0.8468	0.8686	0.8440
13	0.9408	0.9453	0.9489	0.9452
14	0.9192	0.9257	0.9307	0.9254
...

CONCLUSIONES

La metodología propuesta para modelar la carga en la red de media tensión y determinar el comportamiento de la pérdidas en la red de baja, en función del voltaje, aplica el modelo híbrido como una opción general para caracterizar las cargas, analizando el comportamiento de los usuarios por escenarios, tanto temporales como del nivel socioeconómico al que pertenecen.

A través del análisis se observó que parámetros tales como: tensión, demanda, pérdidas y flujos de potencia, son afectados por el tipo de modelo utilizado.

Para niveles normales de demanda, las variaciones en la tensión pueden ser mínimas y poco dependientes del modelado que se le da a la carga. Éste entra a jugar un papel importante cuando las condiciones del circuito son modificadas (aumento en la demanda) de manera considerable.

El correcto modelamiento del usuario permite conocer de manera mas exacta el comportamiento del sistema, así como sus requerimientos de potencia, factor importante en el planeamiento. Además, permite analizar el comportamiento de las pérdidas. Con el fin de optimizar el sistema, estas pérdidas de potencia se pueden minimizar recurriendo a herramientas computacionales tales como los algoritmos de reconfiguración.

La obtención de las características de potencia suministrada y pérdidas como función de la tensión aplicada, además de ofrecer un mejor conocimiento del comportamiento de la red, permite la introducción en el campo del control de tensión, mecanismo bastante utilizado por las empresas de suministro de energía como un medio de optimizar la explotación del sistema y reducir la demanda sin afectar al usuario final.

Para complementar y aumentar la exactitud de la metodología propuesta se requiere la implementación de toma de medidas que reflejen el comportamiento real del usuario a través de un periodo de tiempo.

REFERENCIAS

- [1] BAL K., Mathur, "The Modeling of Load Characteristics Representation in System Studies". IEEE Transaction on Industry Applications, Vol. IA-20, No. 1, Jan/feb 1984, pag. 167-172.
- [2] C.S. Chen, T.H. Wu, C.C. Lee, Y.M Tzeng, "The Application of Load Models of Electric Appliances to Distribution System Analysis". IEEE Transaction on Power System, Vol. 10, No. 3 august 1995, pag. 1376-1382.
- [3] DÍAZ Edwin, QUINTERO Ezequiel, GARCIA William. "Estudio Preliminar de los Factores de Diversidad y Demanda Máxima en el Área Metropolitana de Bucaramanga", Bucaramanga, 1996.
- [4] JURADO Ciro, LATORRE Gerardo, RUEDA Francisco, VARGAS Hermann., "Revisión y Actualización de Parámetros Establecidos en las Normas de Diseño de Sistemas de Distribución de la Empresa Electrificadora de Santander S.A. E.S.P", Bucaramanga, 1996.
- [5] "Normas para cálculo y diseño de sistemas de distribución", Electrificadora de Santander (E.S.S.A.) S.A. E.S.P., Bucaramanga, 1993.