

FUNCIONES DE COSTO DE INTERRUPCIONES DEL SERVICIO DE ELECTRICIDAD PARA USUARIOS RESIDENCIALES URBANOS DE LA CIUDAD DE PEREIRA

RESUMEN

Este artículo presenta funciones de costo de las interrupciones del servicio de electricidad para usuarios residenciales urbanos de la ciudad de Pereira las cuales se obtuvieron por medio de un estudio piloto basado en entrevistas personales aplicando muestreo aleatorio estratificado.

PALABRAS CLAVES: Calidad del servicio, confiabilidad, economía.

ABSTRACT

This paper presents electricity service interruptions cost functions for urban residential customers of the Colombian city of Pereira which were obtained by means of a pilot study based on personal interviews applying stratified random sampling.

KEYWORDS: Service quality, reliability, economics.

CARLOS JULIO ZAPATA

Ingeniero Electricista
Profesor Asistente
Universidad Tecnológica de Pereira
cjzapata@utp.edu.co

HAROLD D. MENDOZA

Ingeniero Electricista
Universidad Tecnológica de Pereira
hamepe5@hotmail.com

Proyecto de Investigación 9-05-6

1. INTRODUCCIÓN

El análisis económico de la confiabilidad del servicio de electricidad ha sido tradicionalmente planteado desde el punto de vista de las empresas prestadoras del servicio y consiste en cruzar las funciones de costo de inversión requerido y costo de los problemas de confiabilidad (compensación a usuarios, sanciones, reparación ó reemplazo de componentes, etc.) para obtener el valor óptimo. Ver la Fig. 1.

Sin embargo, son finalmente los usuarios quienes en las tarifas asumen el costo de la confiabilidad, por lo tanto:

1. Solo puede ofrecerse el nivel de confiabilidad que los usuarios puedan o estén dispuestos a pagar; este nivel aceptado puede ser inferior al óptimo matemático.
2. El análisis económico debe plantearse desde el punto de vista de los usuarios a través del valor (Worth) que la confiabilidad del servicio tiene para estos, el cual se refiere a la disposición que tienen para pagar por un nivel dado de confiabilidad en contraprestación a los beneficios que reciben.

Este enfoque se conoce como planeamiento basado en el valor de la confiabilidad para los usuarios (Value Based Reliability Planning) y constituye el estado del arte en los análisis económicos de la confiabilidad.

En países con grandes restricciones ambientales, se han podido obtener los permisos para construir obras de expansión de los sistemas eléctricos de potencia al mostrarse las grandes pérdidas económicas que debido a los problemas de confiabilidad del servicio sufren no solo los usuarios industriales y comerciales sino también los residenciales [1].

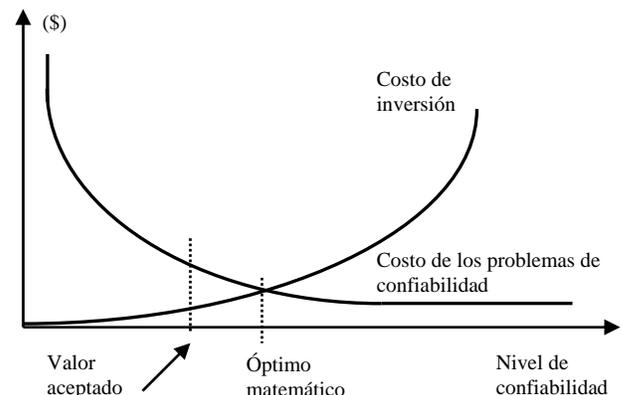


Figura 1. Análisis económico de la confiabilidad

A diferencia de los usuarios industriales y comerciales, para los residenciales no es posible expresar en términos económicos todos los beneficios derivados de disponer del servicio de electricidad, pues muchos de ellos son subjetivos o intangibles. Por esta razón, el valor de la confiabilidad usualmente se estima mediante el costo que para el usuario representan los problemas de confiabilidad del servicio, básicamente, interrupciones del servicio.

El método actualmente aceptado para determinar el costo de las interrupciones del servicio es consultar directamente a los usuarios sobre los gastos en que incurrir debido a interrupciones que ocurren en diferentes instantes de tiempo (día, noche, verano, invierno, etc) con diferentes duraciones [1].

En este artículo se presentan funciones de costo de las interrupciones del servicio de electricidad para usuarios residenciales urbanos de la ciudad Pereira las cuales se obtuvieron mediante un estudio piloto de valor de la confiabilidad realizado en el año 2005 [7].

2. COSTO DE LOS PROBLEMAS DE CONFIABILIDAD DEL SERVICIO

Se define como costo de los problemas de confiabilidad del servicio a todo gasto que el usuario hace por causa de: interrupciones del servicio, problemas de seguridad del servicio y problemas de calidad de la potencia; aunque este costo es solo una parte del valor que la confiabilidad tiene para los usuarios, representa lo que forzosamente pagan para cubrir estos problemas.

Es común, considerar únicamente el costo asociado a las interrupciones del servicio ya que este es el mayor problema de calidad del servicio (por lo menos el 80% según la Ref. [8]). Sin embargo, también deben incluirse el costo de los problemas de calidad de la potencia [4] y de seguridad, aunque poco se ha trabajado al respecto.

El costo de las interrupciones del servicio depende de factores propios tanto de los usuarios como de las interrupciones; ver la Tabla 1. No se utilizan en la actualidad funciones que involucren simultáneamente todos estos factores, lo cual se debe a la falta de estudio sobre la forma y grado de participación de algunos de ellos ó a la complejidad resultante en el modelamiento.

Usuario	Interrupción
Nivel económico	Frecuencia
Nivel de demanda	Duración
Actividades: edad, ocupación	Tiempo de ocurrencia: día, hora
Ubicación: urbano, rural	Clima durante la interrupción
Preparación para apagones	Existe aviso oportuno
Dependencia del servicio	Tamaño de la zona sin servicio

Tabla 1. Factores que afectan el costo de las interrupciones

El método preferido para modelar el costo de las interrupciones del servicio para los usuarios es ajustar mediante análisis de regresión los valores promedios de los costos reportados para cada una de las duraciones de interrupción consultadas a una “función de perjuicio a los usuarios” (Customer Damage Function).

3. METODOLOGÍA DEL ESTUDIO

En el año 2005 se realizó un estudio piloto de valor de la confiabilidad para usuarios residenciales urbanos de la ciudad de Pereira [7]. Se presentan aquí los aspectos relacionados con el costo para los usuarios de las interrupciones del servicio de electricidad.

3.1 Tamaño global de la muestra

Se definió una muestra global de 100 encuestas.

3.2 Tipo de muestreo

Estrato	1	2	3	4	5	6
Encuestas	16	32	23	15	8	6

Tabla 2. Número de encuestas realizadas por estrato

Se aplicó muestreo aleatorio estratificado [3] pues en Colombia existe una clasificación bien definida en seis estratos socio-económicos para el sector residencial.

El número de encuestas por estrato se determinó en forma proporcional a la cantidad de usuarios de cada estrato con respecto al total de usuarios residenciales urbanos. Ver la Tabla 2.

3.3 Tipo de encuestas

Se realizaron encuestas mediante entrevista personal.

3.4 Selección de los encuestados de cada estrato

Para seleccionar en forma aleatoria donde realizar cada encuesta, se desarrolló una base de datos donde se almacenaron los barrios de cada estrato. Así, usuarios de un mismo estrato pero ubicados en diferentes zonas de la ciudad, tuvieron la misma probabilidad de ser seleccionados.

3.5 Información consultada a los encuestados

A cada encuestado se le consultó sobre los costos en que incurre cuando sufre interrupciones del servicio de electricidad en el día y en la noche, para duraciones de 5, 20, 60, 120, 240, 480 y 720 minutos.

3.6 Análisis de la información

Se calcularon las estadísticas descriptivas de valor promedio \bar{c} y desviación estándar s de los costos reportados para cada duración de interrupción consultada.

Para eliminar los datos que son extraños o raros con respecto a los reportados por la mayoría de los encuestados se aplicó un filtro de outliers que retiró todo dato que estuviese por fuera de $\bar{c} \pm 3s$; esta es una regla práctica ampliamente utilizada en estadística [13], [14], [15]. Si se retiran datos, se debe recalcular las estadísticas descriptivas.

3.7 Normalización de los costos

Los costos reportados por los usuarios se normalizan dividiéndolos por su demanda máxima anual en potencia o energía; así, estos datos quedan sobre una misma base comparativa y pueden agruparse. Para este estudio se tomaron las demandas en potencia recomendadas por las normas de diseño [11]: 2.65 kW para los estratos 1 y 2, 6.10 kW para los estratos 3 y 4, y 6.88 kW para los estratos 5 y 6.

3.8 Modelamiento de los costos de interrupción

Los costos promedios normalizados para cada duración de interrupción consultada se ajustan a funciones tipo lineal, logarítmica, potencial, cuadrática y exponencial mediante análisis de regresión [10]. Se acepta como modelo toda función cuyo coeficiente de correlación cuadrático (r^2) sea mayor o igual a 0.7. Si varias

funciones cumplen este criterio, se selecciona como modelo la que presente el mayor coeficiente de correlación.

4. RESULTADOS

Duración [minutos]	Día [\$/kW]	Noche [\$/kW]	Variación Noche/Día
5	0.0	166.0	
20	0.0	228.8	
60	251.6	299.4	119%
120	679.2	1086.8	160%
240	1509.4	3129.6	207%
480	4000.0	5700.6	143%
720	4201.3	7331.5	175%

Tabla 3. Costo promedio de las interrupciones – Estrato 1

Duración [minutos]	Día [\$/kW]	Noche [\$/kW]	Variación Noche/Día
5	0.0	0.0	
20	0.0	0.0	
60	1698.1	1156.4	68%
120	2679.2	2203.3	82%
240	5314.5	3980.5	75%
480	7268.0	5648.2	78%
720	8249.1	6147.3	75%

Tabla 4. Costo promedio de las interrupciones – Estrato 2

Duración [minutos]	Día [\$/kW]	Noche [\$/kW]	Variación Noche/Día
5	0.0	0.0	
20	0.0	71.0	
60	317.8	403.5	127%
120	938.1	1012.7	108%
240	1903.5	2033.7	107%
480	2714.0	2892.5	107%
720	3442.6	3577.4	104%

Tabla 5. Costo promedio de las interrupciones – Estrato 3

Duración [minutos]	Día [\$/kW]	Noche [\$/kW]	Variación Noche/Día
5	0.0	0.0	
20	0.0	136.8	
60	507.6	529.0	104%
120	813.4	958.4	118%
240	1223.2	1635.6	134%
480	2093.3	2307.7	110%
720	2673.4	3203.0	120%

Tabla 6. Costo promedio de las interrupciones – Estrato 4

Duración [minutos]	Día [\$/kW]	Noche [\$/kW]	Variación Noche/Día
5	0.0	0.0	
20	545.1	548.7	

60	1235.5	1417.2	115%
120	1898.6	2171.1	114%
240	2561.8	2725.3	106%
480	3288.5	3470.2	106%
720	4178.8	4814.7	115%

Tabla 7. Costo promedio de las interrupciones – Estrato 5

Duración [minutos]	Día [\$/kW]	Noche [\$/kW]	Variación Noche/Día
5	41.2	0.0	
20	121.1	72.7	
60	302.8	254.4	84%
120	436.0	387.6	89%
240	944.8	823.6	87%
480	1405.0	1308.1	93%
720	2301.4	2059.1	89%

Tabla 8. Costo promedio de las interrupciones – Estrato 6

Duración [minutos]	Día [\$/kW]	Noche [\$/kW]	Variación Noche/Día
5	6.97	16.10	231%
20	53.32	86.17	162%
60	469.52	663.04	141%
120	1476.73	1359.16	92%
240	2177.60	2249.00	103%
480	4385.90	4143.04	94%
720	4613.39	4790.58	104%

Tabla 9. Costo Promedio de las Interrupciones – Global

Estrato		$\bar{C} = f(T)$	r^2
1	Día	$\bar{C} = -0.0056T^2 + 10.499T - 292.69$	0.9709
	Noche	$\bar{C} = -0.0057T^2 + 14.723T - 222.69$	0.9914
2	Día	$\bar{C} = -0.0202T^2 + 25.948T - 119.32$	0.9913
	Noche	$\bar{C} = -0.0164T^2 + 20.42T - 130.74$	0.9951
3	Día	$\bar{C} = -0.0057T^2 + 8.9773T - 103.03$	0.9925
	Noche	$\bar{C} = -0.0063T^2 + 9.5669T - 72.935$	0.9943
4	Día	$\bar{C} = -0.0033T^2 + 6.0258T + 16.614$	0.9902
	Noche	$\bar{C} = -0.0036T^2 + 6.8395T + 70.523$	0.9879
5	Día	$\bar{C} = -0.0076T^2 + 10.507T + 379.8$	0.9573
	Noche	$\bar{C} = -0.0066T^2 + 10.522T + 472.71$	0.9397
6	Día	$\bar{C} = -8E - 05T^2 + 3.0824T + 78.225$	0.9896
	Noche	$\bar{C} = -0.0004T^2 + 3.0377T + 30.36$	0.9936
Global	Día	$\bar{C} = -0.0092T^2 + 13.407T - 181.47$	0.9894
	Noche	$\bar{C} = -0.0074T^2 + 12.159T - 80.288$	0.9976

Tabla 10. Funciones de perjuicio a los usuarios

Notas:

1. \bar{C} es el costo promedio en [\$/kW] para un usuario urbano de una interrupción y T el tiempo de la interrupción en [minutos].

2. "Global" se refiere a la muestra total o mezcla de datos de todos los estratos. Estos resultados se refieren a un usuario residencial urbano "promedio" de la ciudad de Pereira, sin especificar su estrato socioeconómico.
3. Al aplicar el filtro de outliers se retiraron los datos de 7 encuestas: una en el estrato 1, una en el estrato 2, cuatro en el estrato 3 y una en el estrato 4.

5. FUNCIÓN GENERAL DE PERJUICIO A LOS USUARIOS

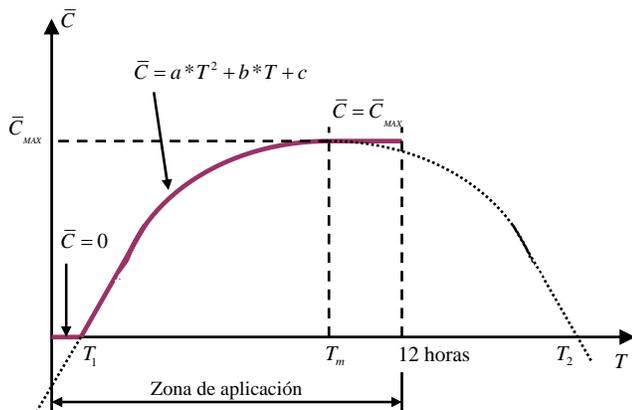


Figura. 2 Función de perjuicio cuando $c < 0$ y $T_m < 12$ horas

En los resultados presentados en la Tabla 10 se observa que, para todos los estratos y la muestra global, en el día y la noche, el modelo de costos obtenido es una función cuadrática de la forma:

$$\bar{C} = a * T^2 + b * T + c \quad (1)$$

Donde:

- a : Es una constante negativa
- b : Es una constante positiva
- c : Es una constante que puede ser negativa o positiva y determina el comportamiento de la función, como se muestra en las Fig. 2 y 3.

En la Tabla 11 se presentan las raíces de esta ecuación y el valor de duración de la interrupción T_m para el cual se produce el costo máximo \bar{C}_m .

Estrato		T_1 [Minutos]	T_2 [Horas]	T_m [Horas]	\bar{C}_m [\$/kW]
1	Día	28.31	30.78	15.62	4628.25
	Noche	15.21	42.80	21.52	9284.62
2	Día	4.62	21.33	10.70	8213.58
	Noche	6.44	20.64	10.38	6225.61
3	Día	11.56	26.06	13.12	3431.70
	Noche	7.66	25.18	12.65	3559.03
4	Día	-2.75	30.48	15.22	2767.39
	Noche	-10.26	31.84	15.83	3319.05
5	Día	-35.25	23.63	11.52	4011.28
	Noche	-43.73	27.30	13.29	4666.36

6	Día	-25.36	642.59	321.08	29769.44
	Noche	-9.98	126.74	63.29	5797.62
Global	Día	13.66	24.06	12.14	4702.98
	Noche	6.63	27.27	13.69	4914.35

Tabla 11. Valores especiales de la funciones de perjuicio al usuario

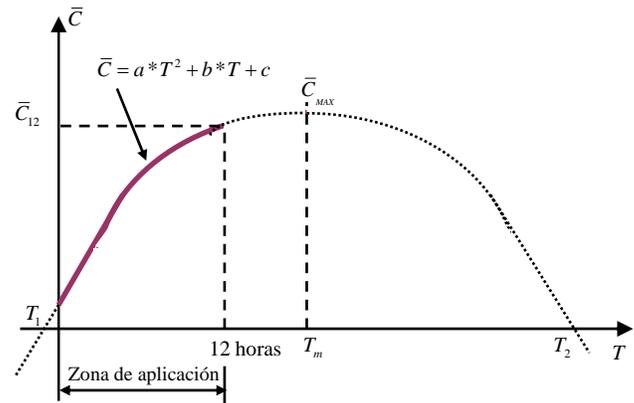


Figura. 3 Función de perjuicio cuando $c > 0$ y $T_m > 12$ horas

En los resultados presentados en la Tabla 11 se observa que:

1. Si c es negativa, para interrupciones de poca duración, \bar{C} puede ser negativa o cero; los valores negativos se tienen que igualar a cero pues el rango de valores de \bar{C} son los números reales positivos.

Quiere esto decir que, en este caso, las interrupciones de poca duración no tendrán costo para el usuario. Ver la Fig. 2.

2. Si c es positiva, \bar{C} siempre será mayor a cero; es decir, las interrupciones tendrán costo para el usuario sin importar cual sea su duración.

En este caso, debe tenerse cuidado de descartar el resultado cuando $T = 0$, pues no tiene sentido que si la duración de la interrupción es cero haya costo para el usuario. Ver la Fig. 3.

3. Si $T_m < 12$ horas, debe asumirse que a partir del valor T_m los costos permanecen constantes en el valor máximo C_m hasta $T = 12$ horas, pues el decremento en los costos que produce la ecuación cuadrática para valores mayores a T_m no tiene sustento real y la ecuación sólo puede utilizarse para valores de hasta 12 horas que es la duración promedia de un día o una noche. Ver la Fig. 2.

4. Si $T_m > 12$ horas, la ecuación cuadrática se aplica para duraciones de interrupción de hasta 12 horas que es la duración promedio de un día o una noche. Ver la Fig. 3.

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Exceptuando los estratos 2 y 6, los costos promedios de las interrupciones del servicio para los usuarios residenciales urbanos de la ciudad de Pereira son mayores en la noche que en el día. En el estrato 2, esta diferencia se atribuye a la gran cantidad de negocios existente en estos hogares; para el estrato 6 no se encontró una explicación a este resultado.

En forma global, se encuentra que el costo promedio de las interrupciones para los usuarios residenciales urbanos de la ciudad de Pereira son mayores en la noche que en el día para interrupciones de hasta una hora; para interrupciones de mayor duración son comparables.

La función matemática que mejor se ajusta para modelar los costos de las interrupciones del servicio de electricidad para los usuarios residenciales urbanos de la ciudad de Pereira es de tipo cuadrático.

Al utilizar el modelo cuadrático presentado, se recomienda tener en cuenta que: Primero, cuando $c < 0$, para interrupciones de poca duración se pueden presentar valores negativos, los cuales tienen que igualarse a cero pues el costo para el usuario es un valor mayor o igual a cero, y, segundo, cuando $c > 0$ se debe descartar el valor de costo resultante cuando $T=0$, pues no tiene sentido que haya costo para el usuario si la duración de la interrupción es cero.

Las funciones de costo presentadas solo se pueden utilizar para duraciones de interrupción de hasta 12 horas pues ésta es la duración promedio de un día (iluminación) o noche (oscuridad). Es de aclarar, que el número diario de horas de iluminación en una zona dada varía durante el año, por lo cual, es una variable aleatoria.

Cuando el valor de duración de interrupción para el cual se presenta el valor máximo de costos sea menor a 12 horas, se recomienda asumir que los costos a partir de dicho valor y hasta $T=12$ horas permanecen fijos en el valor C_m , pues el decrecimiento en los costos que produce la ecuación cuadrática para valores mayores a T_m no tiene sustento real.

Las funciones de costo presentadas en este artículo sirven para realizar análisis económicos de la confiabilidad enfocando el problema desde el punto de vista de los usuarios, tal como es la práctica internacional actual.

Los resultados presentados en este artículo son un primer acercamiento al problema de costos de las interrupciones del servicio de electricidad para usuarios residenciales de

la ciudad de Pereira y sirven de base para realizar un estudio a gran escala en los sectores urbano y rural.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] CIGRE, Methods to Consider Customer Interruption Costs in Power System Analysis, 1987.
- [2] BILLINTON R, ALLAN R. N, Reliability Evaluation of Power Systems, Plenum Press, 1996.
- [3] OSPINA D, Introducción al Muestreo, Universidad Nacional de Colombia, 2001.
- [4] SULLIVAN M. J, VARDELL T, SUDDETH N, VOJDANI A, "Interruption costs, customer satisfaction and expectations for service reliability", IEEE Trans. On Power Systems, Vol. 11, No. 2, 1996.
- [5] ALLAN R. N, KARIUKI K. K, "Factors affecting customer outage costs due to electric service interruptions", IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol 143, No. 6, 1996.
- [6] ALLAN R. N, KARIUKI K. K, "Assessment of customer outage costs due to electric service interruptions: residential sector", IEE Proceedings on Generation, Transmission and Distribution, Vol. 143, No. 2, 1996.
- [7] MENDOZA H. D, "Prediseño de un estudio de valor de confiabilidad de usuarios residenciales", Universidad Tecnológica de Pereira, 2005.
- [8] ZAPATA C. J, MONTEALEGRE P. A, CARDONA A, "En la ciudad de Pereira los usuarios registran problemas de calidad del SDL", Revista Mundo Eléctrico, No. 58, 2005.
- [9] MARKS G. E, "Reliability Economics", IEEE Tutorial Course 82EHO195-8-PWR, 1982.
- [10] MILLER I. R, FREUND J. E, JOHNSON R, "Probability and statistics for engineers", Prentice Hall, 1992.
- [11] EMPRESA DE ENERGÍA DE PEREIRA, "Normas de diseño y construcción para redes y subestaciones dentro del sistema de la EEP", Tomo I, Empresa de Energía de Pereira, 2003.
- [12] ZAPATA C. J, MENDOZA H. D, "Valor de la confiabilidad del servicio de electricidad para usuarios residenciales", Presentado a la revista Mundo Eléctrico, 2006.
- [13] TORRES A, "Probabilidad, variables aleatorias, confiabilidad y procesos estocásticos en ingeniería eléctrica", Universidad de los Andes, 1996.
- [14] ZAPATA C. J, "Análisis probabilístico y simulación", Universidad Tecnológica de Pereira, 2005.
- [15] MATHWORKS INC, "Matlab™ - Using the statistical toolbox", Release 12.1, Mathworks Inc, 2001.