

# VALORACIÓN DEL DESEMPEÑO DEL PROCESO DE REPARACIONES EN UN SISTEMA DE DISTRIBUCIÓN DE ELECTRICIDAD

## Assessment of the repair process performance in a power distribution system

### RESUMEN

Este artículo presenta una metodología para valorar el desempeño del proceso de reparaciones en un sistema de distribución local de electricidad (SDL), la cual modela los recursos para reparación y su logística como un sistema de colas cuyas entrada y servicio son procesos estocásticos puntuales estacionarios o no estacionarios. El cálculo de los índices de desempeño del proceso se realiza mediante un procedimiento de simulación de Montecarlo secuencial. Luego de analizar un SDL típico colombiano, se encontró que el tiempo de espera es el índice que mejor refleja el desempeño del proceso de reparaciones.

**PALABRAS CLAVES:** Confiabilidad, mantenimiento, procesos estocásticos puntuales, simulación de Montecarlo, sistemas de distribución de energía eléctrica, teoría de colas.

### ABSTRACT

*This paper presents a methodology for assessing the performance of the repair process in a power distribution system which models the repair resources and logistics as a queuing system whose input and service are stationary or non-stationary stochastic point processes. The performance indexes of the process are calculated by means of a sequential Montecarlo simulation procedure. After analyzing a typical Colombian power distribution system it was found the delay time is the index that better reflects the performance of the repair process.*

**KEYWORDS:** Maintenance, Montecarlo simulation, power distribution systems, queuing theory, reliability, stochastic point processes.

## 1. INTRODUCCIÓN

Se define como reparación a toda acción de mantenimiento correctivo tendiente a solucionar una situación de interrupción del servicio causada por eventos de naturaleza aleatoria como fallas de los componentes del SDL, accidentes, vandalismo, fenómenos extremos de la naturaleza, etc.

Las reparaciones que se ejecutan en un SDL tienen un importante efecto sobre la calidad del servicio que se presta a los usuarios y se reflejan en los índices de confiabilidad basados en la duración de las interrupciones como DES, SAIDI, CAIDI, ENS, etc.

La duración de una reparación es una variable aleatoria que depende en gran medida de la cantidad y calidad de los recursos disponibles para reparar (personal, vehículos, equipos y herramientas, materiales y repuestos) y de la forma en que se organizan (logística).

En los estudios de confiabilidad de sistemas de distribución de energía eléctrica, el proceso de reparaciones ha sido tradicionalmente representado como parte integrante de los modelos de confiabilidad de los componentes del sistema mediante:

- El tiempo medio para reparación ( $r$ ), en la técnica simplificada de bloques de frecuencia y duración [1], [3].
- La distribución del tiempo para reparación, en las cadenas o semi cadenas de Markov [1], [3].

Este tipo de modelamiento implica que:

- En cada componente hay proceso de reparaciones que es independiente de lo que ocurre en los otros componentes.
- Cada que un componente falla se dispone de los recursos necesarios para repararlo.
- El proceso de reparaciones es estático ya que sus propiedades estadísticas no cambian con el tiempo.

En la práctica, estas condiciones no se cumplen, porque las reparaciones se ejecutan una tras otra sobre diferentes tipos de componentes de acuerdo con la llegada de las fallas, lo cual no es necesariamente un proceso estacionario. De aquí, surge la necesidad de modelar en forma explícita los recursos y logística del proceso de reparaciones para evaluar su desempeño y efecto sobre la calidad del servicio que se presta a los usuarios.

### CARLOS J. ZAPATA

Ingeniero Electricista, M.Sc  
Profesor Asistente  
Universidad Tecnológica de Pereira  
cjjzapata@utp.edu.co

### OLGA L. BURBANO

Ingeniero Electricista  
Universidad Tecnológica de Pereira  
olgaburt@gmail.com

### SILVANA C. SILVA

Ingeniero Electricista  
Universidad Tecnológica de Pereira  
silvanas80@hotmail.com

## 2. PROCESOS ESTOCÁSTICOS PUNTUALES

Un proceso estocástico puntual (PEP) es un proceso aleatorio en el cual se cuenta el número de eventos  $N$  que ocurren en un periodo de tiempo  $\Delta t$  con la condición de que solo un evento puede ocurrir en cada instante de tiempo.

La Fig. 1 muestra una representación de un PEP. Si la fecha cuando empieza la observación del proceso se toma como referencia,  $\Delta t = t - 0$ , solo  $t$  aparece en las ecuaciones que describen el proceso.

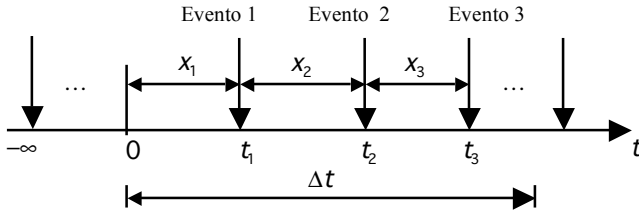


Figura 1. El concepto de proceso estocástico puntual

El modelo matemático de un PEP se define por medio de la función de intensidad  $\lambda(t)$  con la cual se pueden calcular:

- El número esperado de eventos

$$E[N(t)] = \Lambda(t) = \int_0^t \lambda(t) dt \quad (1)$$

- La varianza

$$VAR[N(t)] = \Lambda(t) \quad (2)$$

- La probabilidad de que ocurran  $k$  eventos

$$P[N(t) = k] = \frac{1}{k!} [\Lambda(t)]^k * e^{-\Lambda(t)} \quad (3)$$

La tendencia o cambio con el tiempo del número de eventos que ocurren es una característica muy importante de un PEP. La Fig. 2 muestra los tipos básicos de tendencia que se describen a continuación [2]:

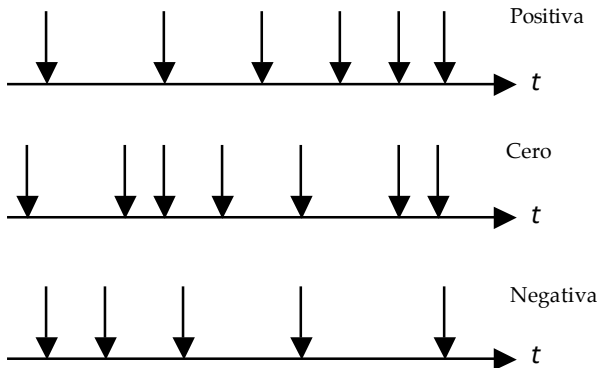


Figura 2. Tipos de tendencia en un proceso estocástico puntual

- Tendencia positiva: El número de eventos que ocurren se incrementa con el tiempo, las magnitudes de los tiempos interarribo disminuyen y  $\lambda(t)$  es una función creciente.
- Tendencia negativa: El número de eventos que ocurren disminuye con el tiempo, las magnitudes de los tiempos interarribo aumentan y  $\lambda(t)$  es una función decreciente.
- Tendencia cero: El número de eventos que ocurren no muestra un patrón de crecimiento o decrecimiento con el tiempo y  $\lambda(t)$  es constante.

Un PEP sin tendencia es estacionario y homogéneo; la homogeneidad se refiere a que los tiempos interarribo ( $x_i$ ) son independientes e idénticamente distribuidos. Lo contrario se cumple para los PEP con tendencia.

La tendencia permite realizar la clasificación básica de los PEP que se muestra en la Fig. 3.

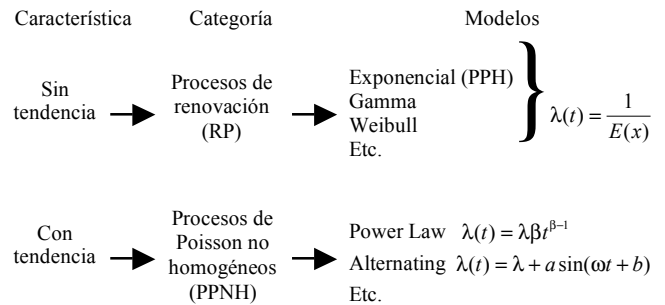


Figura 3. Una clasificación de los procesos estocásticos puntuales [3].

Un proceso estacionario se denomina “proceso de renovación” (PR) seguido por el nombre de la distribución de los ( $x_i$ ); El parámetro  $\lambda(t)$  de estos procesos es igual al inverso del valor esperado de los tiempos interarribo.

El PEP más famoso y sencillo es el RP exponencial conocido popularmente como proceso de Poisson homogéneo (PPH).

En este estudio se utiliza al proceso Power Law (PPL) como modelo básico dado que permite representar tendencias positivas ( $\beta > 1$ ), negativas ( $\beta < 1$ ) y al PPH ( $\beta = 1$ ) [2], [3], [4], [5].

El procedimiento para el ajuste de una muestra de datos a un PEP consta básicamente de análisis de tendencia, análisis de independencia, estimación de parámetros y pruebas de bondad de ajuste, que pueden consultarse en [3], [4], [5]. Los algoritmos para generar muestras de datos de un PEP se presentan en [3] y [6].

### 3. MODELAMIENTO DEL PROCESO DE REPARACIONES EN UN SDL

Para efectos de mantenimiento correctivo, el área geográfica ocupada por un SDL se divide en zonas operativas que se asignan a cuadrillas o grupos de reparación. Cada cuadrilla es responsable de reparar los componentes de su zona operativa según las órdenes de reparación que le envía el centro de control del SDL.

El centro de control emite las órdenes de reparación de acuerdo con el proceso de llegada de las interrupciones del servicio, las cuales pueden ser detectadas en tiempo real con un sistema SCADA o fuera de línea mediante las llamadas telefónicas que hacen los usuarios.

El proceso de llegada de interrupciones del servicio a una zona operativa dada y las correspondientes restauraciones del servicio que se ejecutan constituyen un sistema de cola de espera, tal como se muestra en la Fig. 4.

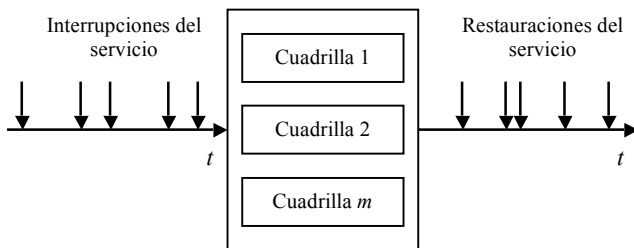


Figura 4. Proceso de reparaciones en un SDL

Para este sistema de cola de espera se definen [7], [8]:

- Clientes: Son las interrupciones del servicio que están asociadas a fallas en los componentes del SDL.
- Recursos: Es el número de cuadrillas disponibles.
- Capacidad: Es ilimitada pues todas las interrupciones del servicio que se presenten tienen que ser resueltas.
- Disciplina de cola: Es FCFS (First Come First Served) ya que las interrupciones se atienden en el orden de llegada.
- Proceso de entrada: Es el PEP de llegada de las interrupciones del servicio u órdenes de reparación que emite el centro de control a las cuadrillas.
- Proceso del servicio: es el PEP formado por las acciones de reparación que efectúan las cuadrillas.
- Proceso de salida: Es el PEP de las restauraciones del servicio.

El PEP de salida se obtiene mediante la superposición de los PEP de servicio de las cuadrillas. Solo en el caso de una zona operativa con una cuadrilla estos dos procesos son iguales.

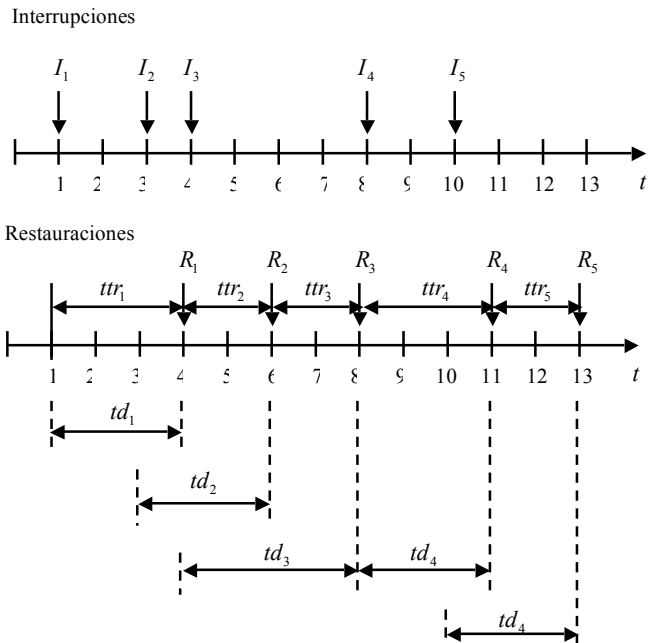


Figura 5. Tiempos de servicio del proceso de reparaciones en un SDL

La relación existente entre los PEP de entrada, salida y servicio se muestra en la Fig. 5, para el caso de una zona operativa con una cuadrilla.

- Para cada interrupción del servicio  $I_j$  la cuadrilla ejecuta una restauración del servicio  $R_j$ .
- Cada restauración del servicio  $R_j$  requiere un tiempo para reparación  $ttr_j$ , el cual es la suma del tiempo que le toma a la cuadrilla trasladarse hasta el sitio de la interrupción, el tiempo para localizar los componentes en falla, el tiempo en ejecutar las acciones de reparación y el tiempo de reconexión del servicio.
- Los usuarios del SDL afectados por la interrupción del servicio  $I_j$  perciben un tiempo de interrupción  $td_j$  el cual es igual a  $ttr_j$  más el tiempo de espera para que esta interrupción sea atendida.

Así, el tiempo  $td_j$  es externo porque es lo visto por los usuarios del SDL, mientras que  $ttr_j$  es interno al sistema de reparaciones. El tiempo de espera para que una interrupción del servicio  $j$  sea atendida se define como:

$$tw_j = td_j - ttr_j \tag{4}$$

Si  $\lambda_j(t)$  es la función de intensidad del PEP de llegada de interrupciones a una zona operativa con  $m$  cuadrillas y  $\lambda_{r_i}(t)$  es la función de intensidad del PEP de reparaciones que ejecuta la cuadrilla  $i$ , se definen:

- El factor de utilización

$$\rho(t) = \lambda_I(t) / \sum_{i=1}^m \lambda_{r_i}(t) = \lambda_I(t) / \lambda_{r_T}(t) \quad (5)$$

El factor de utilización es adimensional y debe ser menor a la unidad para que el proceso de reparaciones sea estable, es decir, para que se pueda atender los requerimientos de las interrupciones del servicio [7].

- La intensidad de tráfico

$$a(t) = \lambda_I(t) / \lambda_{r_T}(t) \quad (6)$$

La intensidad de tráfico es adimensional pero suele medirse en [Erlangs]. Un Erlang de intensidad de tráfico indica que una interrupción del servicio ocupa los recursos para reparación el 100% del tiempo [7]. Una intensidad de tráfico mayor a uno indica que las interrupciones del servicio llegan mucho más rápido de lo que pueden ejecutarse las reparaciones [7].

Aplicando la notación de Kendall para sistemas de colas de espera,  $A/B/M/K/N/Z$ , donde:

A: Es el patrón de llegada de los clientes al sistema de cola de espera (las interrupciones del servicio)

B: Es el patrón del servicio (Las reparaciones)

M: Es el número de servidores en paralelo (Cuadrillas)

K: Es la capacidad del sistema

N: Es el tamaño de la población de clientes

Z: Es la disciplina de cola

se obtiene:  $G/G/m/\infty/\infty/FCFS$

La letra G indica que los PEP de llegada y servicio son generales (RP, PLP, etc.); esto difiere al enfoque clásico de la teoría de colas que solo considera procesos Markovianos (ambos procesos HPP) o semi-Markovianos (al menos uno de los procesos HPP) los cuales tienen solución analítica. En el caso presentado, se requiere solución numérica mediante simulación de Montecarlo.

## 4. METODOLOGÍA PROPUESTA

### 4.1 Obtener los modelos matemáticos de los procesos de llegada y de servicio

A partir de registros operativos se obtienen los tiempos de llegada de las interrupciones del servicio por eventos no planeados o sus respectivos tiempos interarribo y se les aplica el procedimiento de ajuste a un PEP.

Luego, se obtienen las duraciones internas de las reparaciones ( $ttr's$ ) realizadas por cada cuadrilla; previo a aplicar el proceso de ajuste a un PEP, los  $ttr$  deben “pegarse”, conservando la secuencia cronológica en que se produjeron para eliminar los periodos en que la cuadrilla estuvo desocupada.

### 4.2 Calcular $\rho(t)$ y $a(t)$

Estos cálculos se hacen en forma numérica para un periodo de estudio dado  $T$  en años que incluye el periodo de los registros operativos más el tiempo futuro sobre el cual desea predecirse el desempeño del sistema de reparaciones.

### 4.3 Calcular $td$ y $tw$

Se utiliza un procedimiento de simulación de Montecarlo secuencial [3], [9], [10] el cual se considera que:

- El sistema es conservativo: Si hay interrupciones para atender, las cuadrillas están trabajando [8].
- Al iniciarse el proceso, las cuadrillas están desocupadas.
- Se asigna una nueva orden de reparación a la cuadrilla que primero se desocupe.

En una realización del proceso se realizan los siguientes pasos:

1. Para el periodo de interés  $T$  genere los tiempos de llegada de interrupciones del servicio  $t_I$ .
2. Para el número de interrupciones obtenidas en el paso anterior, genere el mismo número de tiempos de reparación  $ttr$  de acuerdo con la asignación que se haga a las cuadrillas.
3. El tiempo de arribo de la primera restauración es  $t_{R1} = t_{I1} + ttr_1$ .
4. El tiempo de arribo de las siguientes restauraciones se calculan como:
  - Si  $t_{Ij} < t_{R(j-1)} \rightarrow t_{Rj} = t_{R(j-1)} + ttr_j$  (Hay congestión en el sistema).
  - Si  $t_{Ij} \geq t_{R(j-1)} \rightarrow t_{Rj} = t_{Ij} + ttr_j$  (No hay congestión en el sistema).
5. Calcular los tiempos de espera de las interrupciones.

Una simulación consiste en un número pre-especificado de realizaciones  $N$ . Al finalizar la simulación se calculan para  $T$  y los subperiodos de interés (semanas, meses, etc.):



Figura 6. Zonas operativas para el mantenimiento del SDL de la ciudad de Pereira

Los promedios de tiempo de reparación  $\overline{tr}$ , duración de la interrupción  $\overline{t_d}$  y tiempo de espera  $\overline{t_w}$ .

- La congestión en el sistema  $C$  que se puede obtener como frecuencia o duración:

$$C_F = n_{IW} / n_I * 100\% \quad (7)$$

$$C_D = \overline{t_w} / \overline{t_d} * 100\% \quad (8)$$

donde  $n_{IW}$  es el número de interrupciones que tuvieron que esperar para ser atendidas y  $n_I$  es el número total de interrupciones.

## 5. EJEMPLO: EL SDL DE LA CIUDAD DE PEREIRA

### 5.1 Descripción de la logística

La logística implementada por la Empresa de Energía de Pereira (EEP) para el mantenimiento preventivo y correctivo divide el área geográfica de este municipio en las siguientes zonas operativas (Ver la Fig. 6) [11]:

- Zona 1: Los sectores de Cuba, Belmonte y Cerritos, con centro de operaciones en la Subestación Cuba.
- Zona 2: La parte central de la ciudad, con centro de operaciones en la Subestación Centro.
- Zona 3: Los sectores Kennedy, Pinares y Ventorrillo, con centro de operaciones en la Subestación Ventorrillo.

El Centro de Control de la EEP recibe las llamadas de los usuarios a la línea telefónica 115 reportando las interrupciones del servicio y los reportes de daños de los operadores de subestaciones y plantas de generación y emite las órdenes de reparación a cada zona operativa; más detalles al respecto se pueden consultar en [12].

Cada zona operativa cuenta con dos equipos reparadores (vehículo tipo campero, conductor y técnico) y un equipo para reparaciones mayores y mantenimientos preventivos (Camión, dos técnicos y dos o más auxiliares). Además, se cuenta con una grúa y un equipo para mantenimiento en caliente que dan soporte a las tres zonas operativas.

En este estudio se aplica el término “cuadrilla” al conjunto de recursos para reparación de cada zona incluyendo el soporte que reciben de la grúa y el equipo para mantenimiento en caliente.

### 5.2 Modelos de llegada de interrupciones y de servicio de reparación

A partir de los registros operativos del año 2005, se obtuvieron los modelos que se presentan en la Tabla 1.

Zona	Entrada [Interrupciones/hora]	Servicio [Reparaciones/hora]
1	PLP $\lambda_i = 0.1471 \quad \beta_i = 1.0539$	PLP $\lambda_r = 0.3765 \quad \beta_r = 1.0291$
2	PLP $\lambda_i = 0.0363 \quad \beta_i = 1.1584$	PLP $\lambda_r = 0.4278 \quad \beta_r = 1.0560$
3	PLP $\lambda_i = 0.0715 \quad \beta_i = 1.1254$	PLP $\lambda_r = 0.2313 \quad \beta_r = 1.1133$

Tabla 1. Modelos de entrada y servicio para las zonas operativas del SDL de la ciudad de Pereira [11]

Todos estos modelos tienen tendencia creciente ( $\beta > 1$ ), lo cual quiere decir que, conforme pasa el tiempo, las interrupciones del servicio son más frecuentes, pero a su vez, las reparaciones toman menos tiempo. Es decir, el proceso de reparaciones se ajusta al proceso de llegada de interrupciones del servicio.

### 5.3 Factor de utilización e intensidad de tráfico

Estos índices son iguales en magnitud porque se considera una sola cuadrilla por zona operativa. Ver la Fig. 7.

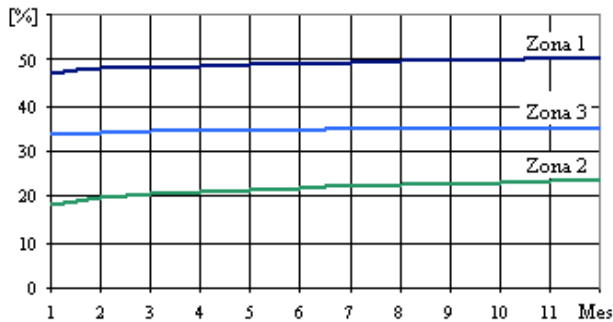


Figura 7. Factor de utilización e intensidad de tráfico para las zonas operativas del SDL de la ciudad de Pereira (Año 2005).

Como se observa, dado que los recursos para reparación son los mismos en las tres zonas operativas, estos índices son mayores conforme mayor es el área geográfica cubierta por la zona operativa.

#### 5.4 Tiempos de servicio y congestión

Se calcularon los tiempos de servicio y congestión para cada uno de los meses del año 2005 y en forma global para este año. Por limitaciones de espacio solo se presentan los resultados globales. Ver la Tabla 2.

Zona	$\bar{t}_{tr}$ [Horas]	$\bar{t}_d$ [Horas]	$\bar{t}_w$ [Horas]	$C_F$ [%]	$C_D$ [%]
1	2.08	4.13	2.05	49.68	49.62
2	1.53	2.00	0.47	23.63	23.52
3	1.72	2.79	1.07	38.45	38.27

Tabla 2. Tiempos de servicio y congestión para las zonas operativas del SDL de la ciudad de Pereira (150 realizaciones)

Como se observa, al ser iguales los recursos para reparación en las tres zonas, las mayores duraciones de interrupción, tiempo de espera y congestión se presentan en las zonas 1 y 3. De otra parte, para este SDL la congestión en frecuencia y duración son aproximadamente iguales.

#### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La teoría de colas permite evaluar el desempeño de los recursos y logística del proceso de reparación en un SDL y obtener índices directamente relacionados con la calidad del servicio que se presta a los usuarios. Además, este tipo de análisis permite proponer medidas de mejoramiento para el desempeño del proceso sobre una base objetiva - cuantitativa.

La valoración del desempeño de los recursos y logística para reparación de los SDL debe considerar que los procesos de llegada de las interrupciones y de servicio no son necesariamente estacionarios como en el tratamiento tradicional presentado en los textos de teoría de colas, por lo cual, se deben implementar procedimientos de solución mediante simulación de Montecarlo secuencial.

El tiempo de espera para atender las interrupciones ( $t_w$ ) es el indicador que mejor refleja el desempeño del proceso de reparación sobre la calidad del servicio que se presta a los usuarios del SDL, pues como se muestra en los resultados de este estudio, aunque el factor de utilización, la intensidad de tráfico y la congestión tengan bajos valores, pueden existir altos tiempos de espera.

Se recomienda realizar este tipo de estudios en otros SDL para comparar los índices de desempeño del proceso de reparaciones con respecto a la cantidad y calidad de los recursos disponibles y a la logística implementada y así establecer valores de referencia para el sector eléctrico.

#### 7. BIBLIOGRAFÍA

- [1]. Billinton R, Allan R. N, *Reliability Evaluation of Power Systems*, Plenum Press, 1996.
- [2]. Ascher H, Feingold H, *Repairable systems reliability: Modeling, inference, misconceptions and their causes*, Marcel Dekker, 1984.
- [3]. Zapata C. J, *Análisis probabilístico y simulación*, Universidad Tecnológica de Pereira, 2006.
- [4]. *Power law model – Goodness-of-fit test and estimation methods*, IEC Standard 61710, 2000.
- [5]. ReliaSoft, *Reliability Growth and Repairable System Data Analysis Reference*, ReliaSoft Publishing, 2005, Disponible en: [www.weibull.com](http://www.weibull.com)
- [6]. Law A. M, Kelton D. W, *Simulation Modeling and Analysis*, Mc-Graw Hill, 2000.
- [7]. Chee H. N, *Queueing modeling fundamentals*, Wiley, 1996.
- [8]. Pazos J. J, Suárez A, Díaz R. P, *Teoría de colas y simulación de eventos discretos*, Pearson – Prentice Hall, 2003.
- [9]. CIGRE Task Force 13 of Advisory Group 38.03, "Sequential Probabilistic Methods for Power System Operation and Planning", *Electra*, No. 179, pp. 69-97, Aug. 1998.
- [10]. Zapata C. J, *Confiabilidad de sistemas eléctricos*, Universidad Tecnológica de Pereira, 2006.
- [11]. Silva S. C, Burbano O. L, "Análisis de los tiempos para restauración de componentes de un sistema de distribución de energía eléctrica", Proyecto de Grado, Universidad Tecnológica de Pereira, 2007.
- [12]. Zapata C. J, Montealegre P. A, Cardona A, "En Pereira usuarios del SDL reportan problemas de calidad del servicio", *Mundo Eléctrico*, No. 58, 2005.
- [13]. Ellis K. E, Gibson Gregory J, "Trend Analysis of repair times", *IEEE Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 1991.
- [14]. Choy S, English J. R, Landers T, Yan L, "Collective approach for modeling complex system failures", *IEEE Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium*, 1996.
- [15]. Chow M. Y, Taylor L. S, Chow M. S, "Time of outage restoration analysis in distribution systems", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 11, No. 3, 1996.