

EFEECTO DE LAS BORRASCAS SOBRE LA DISPONIBILIDAD DE PLANTAS DE GENERACIÓN A FILO DE AGUA

Effect of rain-storms on the availability of run-of-the-river generating plants

RESUMEN

Este artículo presenta los resultados de un estudio del efecto de las borrascas sobre la disponibilidad de plantas de generación a filo de agua en el cual este fenómeno natural se modela como un proceso estocástico puntual. Tomando como ejemplo la planta Libaré de la ciudad de Pereira se encontró que al incluir las borrascas el índice de disponibilidad de esta planta se reduce en un 16% y sus índices de confiabilidad aumentan de 60% a 118% lo cual muestra la importancia de incluir estos eventos en la valoración de confiabilidad de este tipo de plantas.

PALABRAS CLAVES: Confiabilidad, procesos estocásticos puntuales, simulación de Montecarlo, sistemas de generación de energía eléctrica.

ABSTRACT

This paper presents the results of a study of the effect of rain-storms on the availability of run-of-the-river generating plants in which this natural phenomenon is modelled as a stochastic point process. Taking as example the Libaré plant in the city of Pereira, it was found that the inclusion of rain storms decreases the plant availability index in 16% and increases its reliability indexes from 60% to 118% what shows the importance of including these events in the reliability assessment of these kinds of plants.

KEYWORDS: *Montecarlo simulation, power generating systems, reliability, stochastic point processes.*

1. INTRODUCCIÓN

Las plantas de generación a filo de agua son aquellas instalaciones que no cuentan con embalses para regular el caudal de agua de los ríos que las abastecen.

Tal como se muestra en el esquema de la Figura 1, estas plantas constan básicamente de una bocatoma, un sistema de conducción del agua y los equipos de generación. Por lo general, estas plantas no superan una capacidad instalada de 20 MW.

La disponibilidad efectiva de una planta de generación de electricidad es la potencia que puede generar en un instante dado del tiempo la cual depende de:

- La cantidad del agua disponible.
- La disponibilidad de las instalaciones civiles e hidráulicas y los equipos de generación.
- La ocurrencia de fenómenos que implican la salida de funcionamiento de la planta como temblores, vandalismo, accidentes, borrascas, etc.

CARLOS J. ZAPATA

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

MARÍA Y. RUÍZ

Ingeniero Electricista
Universidad Tecnológica de
Pereira
fahepri@utp.edu.co

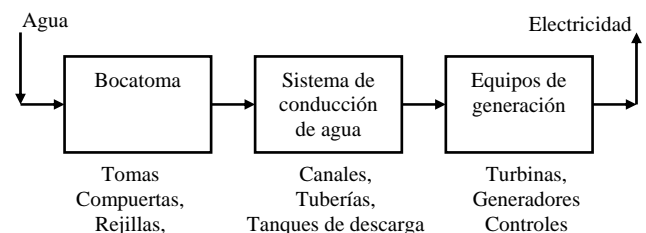


Figura 1. Componentes básicos de una planta de generación a filo de agua.

Los estudios de confiabilidad de plantas de generación tradicionalmente solo han considerado la disponibilidad las instalaciones civiles e hidráulicas, equipos de generación y recursos primarios de generación dejando a un lado los otros eventos aleatorios que afectan su funcionamiento como es el caso de las borrascas en las plantas de generación a filo de agua [3], [7], [16], [19].

Dado que las borrascas son eventos que se presentan con gran frecuencia en algunos ríos donde existen o se van a construir plantas de generación a filo de agua, es de gran importancia realizar un estudio para determinar su efecto sobre la valoración de disponibilidad efectiva e índices de confiabilidad.

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 Δt con la condición de que solo un evento puede ocurrir en cada instante de tiempo. La Figura 2 muestra una representación de un PEP. Si la fecha cuando empieza la observación del proceso se toma como referencia, $\Delta t = t - 0$ y solo t aparece en las ecuaciones que describen el proceso.

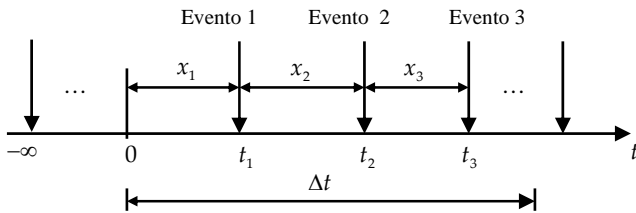


Figura 2. El concepto de proceso estocástico puntual

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 Figura 3 muestra tres tipos básicos de tendencia que se describen a continuación [1], [9].

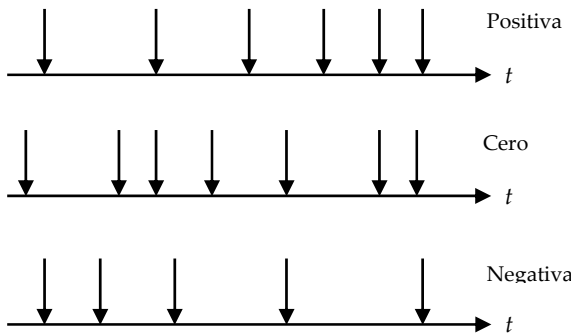


Figura 3. Tipos de tendencia en proceso estocástico puntual

- Tendencia positiva: El número de eventos que ocurren

se incrementa con el tiempo, las magnitudes de los tiempos interarribo disminuyen, $\lambda(t)$ es una función creciente.

- Tendencia negativa: El número de eventos que ocurren disminuye con el tiempo, las magnitudes de los tiempos interarribo aumentan, $\lambda(t)$ es una función decreciente.
- Tendencia cero: El número de eventos que ocurren no muestra un patrón de crecimiento o decrecimiento con el tiempo, $\lambda(t)$ 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 Figura 4.

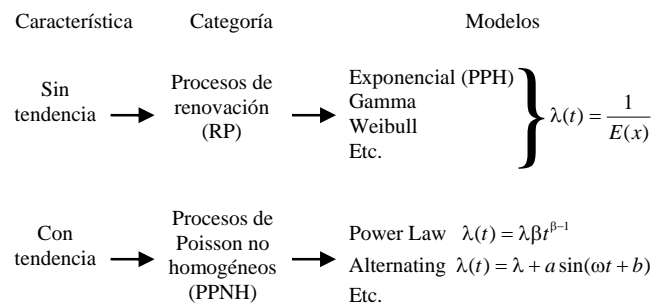


Figura 4. Una clasificación de los procesos estocásticos puntuales [6].

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 para procesos no estacionarios pues permite representar tendencias positivas y negativas y al PPH [1], [20].

En la Figura 5 se presenta el procedimiento implementado para ajustar una muestra de datos a un PEP; como se observa, las pruebas de tendencia e independencia son la base para la selección del modelo utilizar.

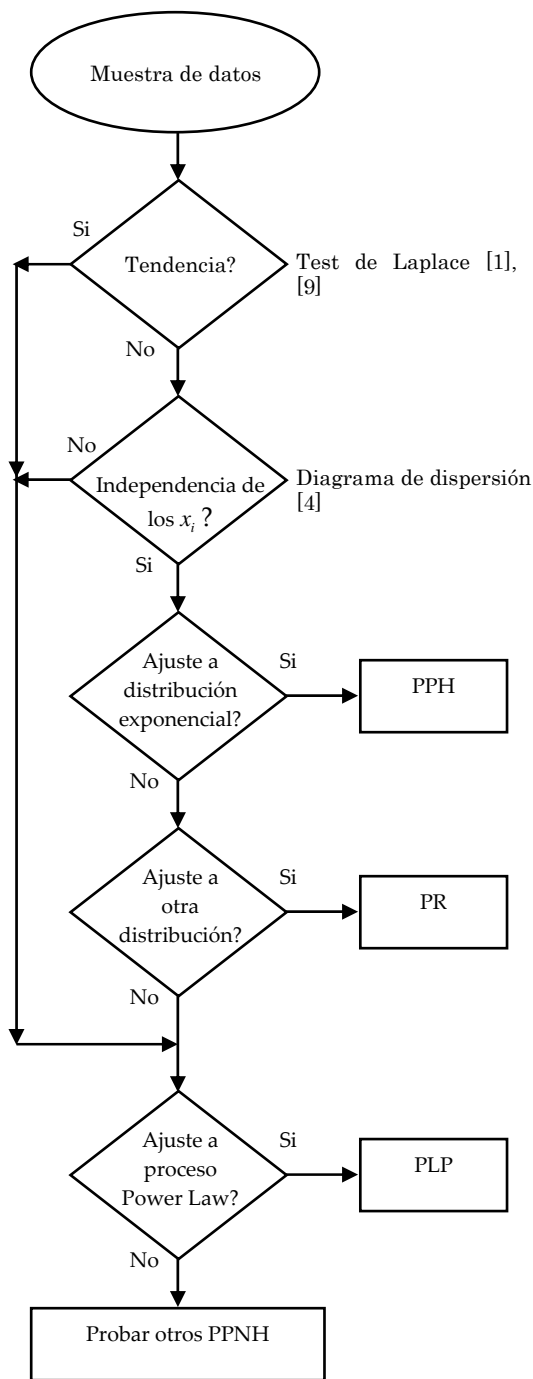


Figura 5. Procedimiento para ajuste de datos a un proceso estocástico puntual

Los modelos de renovación se construyen a partir de la muestra de tiempos interarribo (x_i) ajustandolos a una distribución de probabilidad mediante los tradicionales procedimientos de estimación de parámetros y pruebas de bondad de ajuste que están ampliamente descritos en los libros de probabilidad y estadística [7], [8].

El modelo PLP se construye a partir de la muestra de tiempos de arribo de eventos (t_i) los cuales se ajustan

mediante procedimientos de estimación de parámetros [1], [2], [5], [20] y pruebas de bondad de ajuste [10], [11], [12], [20] que son específicas para este modelo y no deben confundirse con los procedimientos tradicionales de ajuste de datos a una distribución de probabilidad.

3. MODELAMIENTO DE LAS BORRASCAS

Una borrasca, en el ámbito del presente estudio, es un evento de aumento inusitado en el caudal de una corriente de agua durante un corto periodo de tiempo debido a lluvias intensas en la cuenca hidrográfica aguas arriba del punto donde se localiza la planta de generación bajo estudio.

Las borrascas afectan la operación de las plantas de generación a filo de agua por el elevado caudal, su velocidad y los desechos que arrastran pueden obstruir o aún destruir las instalaciones civiles e hidráulicas de toma y conducción de agua. Por esta razón, al detectar un evento de estos es obligatorio parar el proceso de producción de energía eléctrica.

La Figura 6 presenta un esquema de un fenómeno natural de ocurrencia de borrascas donde los (t_i) son los tiempos de llegada de las borrascas y los (d_i) sus duraciones.

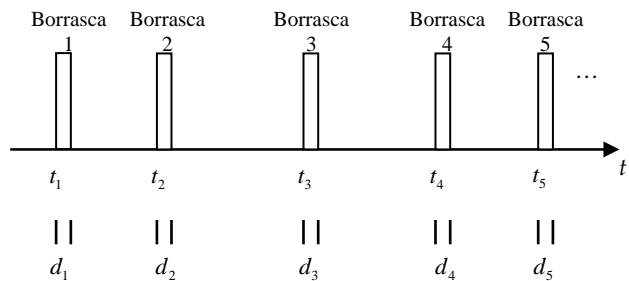


Figura 6. Fenómeno natural de ocurrencia de borrascas

Sí la duración de las borrascas es mucho menor al tiempo entre eventos de borrascas, el fenómeno natural de ocurrencia de borrascas se puede considerar un proceso de eventos puntuales que se representa mediante dos modelos matemáticos independientes: un proceso estocástico puntual para la llegada de borrascas y una distribución de probabilidad para su duración, tal como se muestra en la Figura 7.

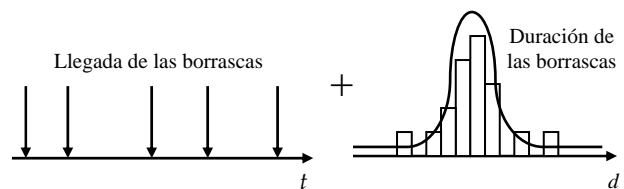


Figura 7. Modelos matemáticos para representar el fenómeno natural de ocurrencia de borrascas

4. PROCEDIMIENTO DE VALORACIÓN DE CONFIABILIDAD

La valoración de la disponibilidad efectiva y los índices de confiabilidad de la planta de generación bajo estudio se realiza mediante la técnica de simulación de Montecarlo secuencial [13], procedimiento que se encuentra descrito en detalle en [7], [16] y [19]. En términos generales, el procedimiento consiste en determinar para cada hora del año en estudio:

- Los componentes de la planta que están disponibles
- Si hay o no evento de borrasca
- El valor de la demanda
- La generación disponible

Para determinar las horas en que la planta no puede generar debido a las borrascas, se generan mediante el PEP las horas donde empiezan los eventos de borrascas y mediante la distribución de probabilidad las horas de duración de cada uno de estos eventos.

Al recorrer las 8760 horas del año se completa una "iteración" y se obtienen las variables de salida: número de horas en que hay déficit de generación H , valor acumulado de energía generada EG y valor acumulado de demanda no servida ENS .

Tal como se muestra en el esquema de la Figura 8, una simulación consiste en la ejecución de N iteraciones.

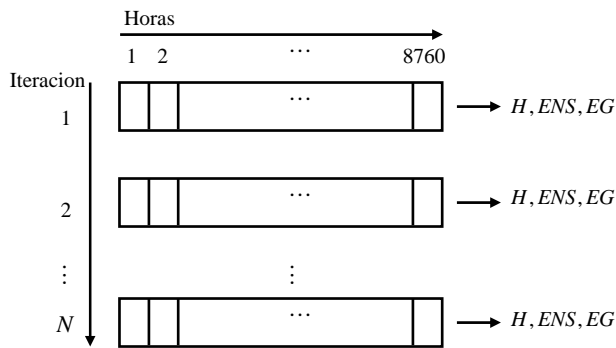


Figura 8. Procedimiento general de la simulación

Al terminar la simulación se calculan:

- La disponibilidad efectiva de generación A_G :

$$A_G = \frac{100\%}{N} \sum_{j=1}^N \left(\frac{EG_j}{C * 8760} \right) \quad (4)$$

donde C es la capacidad instalada de la planta.

- El valor esperado de pérdida de carga $LOLE$:

$$LOLE = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N H_j \quad (5)$$

- La probabilidad de pérdida de carga $LOLP$:

$$LOLP = \frac{100\%}{N} \sum_{j=1}^N \left(\frac{H_j}{8760} \right) \quad (6)$$

- El valor esperado de energía no servida $EENS$:

$$EENS = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N ENS_j \quad (7)$$

5. EJEMPLO

Como sistema de prueba para este estudio se tomó la planta Libaré de la ciudad de Pereira la cual tiene una capacidad instalada de 5 MW, una sola unidad de generación y es alimentada por el Río Otún.

Las instalaciones civiles e hidráulicas de esta planta constan de bocatoma, rejillas, canal de conducción de agua, tanque de descarga y tubería de presión. La generación se hace al nivel de distribución de 13.8 kV por lo cual no se requiere de transformador de unidad.

Los registros operativos de los años 2004 y 2005 muestran que las borrascas son las causantes del 36% del tiempo de indisponibilidad forzada de esta planta. Así, esta planta es un excelente sistema de prueba para el presente estudio porque se dispone de su información operativa y se conoce que las borrascas en el Río Otún tienen una alta participación en su indisponibilidad.

En la Figura 9 se presenta un diagrama del proceso productivo de esta planta donde q es el caudal del Río Otún en m^3/s , q_G es el caudal disponible para generar luego de descontar $1.5 m^3/s$ de restricción ambiental y $2.6 m^3/s$ del acueducto municipal y P es la potencia generada. Los límites técnicos de la planta están dado por $0.5 \leq q_G \leq 6.79$.

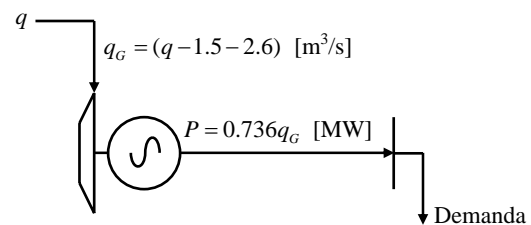


Figura 9. Diagrama del proceso productivo de la planta Libaré.

A continuación se describen los modelos utilizados para la valoración de confiabilidad.

1) Modelos para las borrascas. Los modelos matemáticos que representan las borrascas se construyeron utilizando los registros operativos de la planta correspondientes a los años 2004 y 2005.

En estos dos años se encuentran 140 eventos de borrascas que provocaron parada de producción en la planta. El tiempo promedio entre estos eventos (\bar{x}) es de 19.14 días con un coeficiente de variación del 200% y su duración promedio (\bar{d}) es de 2.7 horas con un coeficiente de variación de 77%. Como la duración de las borrascas es muy pequeña comparada con el tiempo entre eventos de borrasca, se puede aplicar el modelamiento de procesos estocásticos puntuales.

Al aplicar el procedimiento de ajuste de datos a un proceso estocástico puntual se encontró que el modelo del proceso de llegada de las borrascas en el Río Otún es un proceso de renovación Gamma con parámetros $\alpha = 0.5600$ y $\beta = 34.1818$ [días]. La función de intensidad de este modelo es $\lambda(t) = 1/(\alpha\beta) = 19.0682$ [borrascas/año]. Quiere esto decir, que el fenómeno natural de ocurrencia de borrascas en el Río Otún es un proceso aleatorio estacionario.

De otra parte, los datos de duración de las borrascas se ajustan a una distribución Gamma con parámetros con parámetros $\alpha = 1.9611$ y $\beta = 1.3719$ [horas].

2) Modelo para el caudal. El caudal de agua del Río Otún se modela mediante una distribución Weibull con parámetros $\alpha = 0.0050$ [m^3/s] y $\beta = 2.0528$. Este modelo fue construido en un estudio previo utilizando registros de caudal de 35 años [17].

3) Modelo para la demanda. Para el cálculo de los índices de confiabilidad de la planta se requiere conocer la demanda que esta tiene que atender. Para esto, se toma una distribución Weibull con parámetros $\alpha = 2.9906$ [MWp.u.] y $\beta = 24.5061$. Este modelo fue construido en un estudio previo utilizando registros de 29 años [15].

Este modelo tipifica el comportamiento de la demanda en la ciudad de Pereira y está expresado en por unidad, por lo cual, para el presente estudio se escala multiplicándolo por 5 MW.

4) Modelos de confiabilidad de los componentes. Para las instalaciones civiles e hidráulicas, la turbina y el generador, se utiliza el modelo de tres estados operativos mostrado en la Figura 10. En la Tabla 1 se presentan las distribuciones que definen estos modelos, los cuales se construyeron utilizando registros operativos de 6 años (1998-2003). Los tiempos para falla se miden en días y los tiempos para reparación en horas.

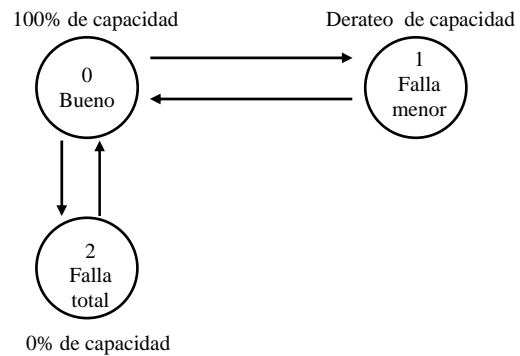


Figura 10. Modelo de confiabilidad de tres estados operativos

El estado 1 en las instalaciones civiles e hidráulicas se da por obstrucciones debido a desechos y representa un 40% de derateo de capacidad. En la turbina, este estado se da por daño en un alabe o en los pines y se pueden generar de 2.6 a 3.0 MW. En el generador este estado se da por daños en el cojinete guía o chisporroteo en los anillos rozantes y se pueden generar de 2.8 a 3.9 MW.

| | Instalaciones civiles e hidráulicas | Turbina | Generador |
|----------|---|---|---|
| t_{01} | Weibull $\alpha = 0.2968$ $\beta = 0.6042$ | Normal $\mu = 193.8335$ $\sigma = 175.5793$ | Normal $\mu = 257.7629$ $\sigma = 175.5793$ |
| t_{10} | Lognormal $\mu = -2.8003$ $\sigma = 0.7572$ | Lognormal $\mu = -3.9487$ $\sigma = 1.6246$ | Lognormal $\mu = -3.5749$ $\sigma = 1.0181$ |
| t_{02} | Normal $\mu = 186.8997$ $\sigma = 197.2375$ | Gamma $\alpha = 0.5379$ $\beta = 131.0524$ | Weibull $\alpha = 0.1303$ $\beta = 0.5946$ |
| t_{20} | Lognormal $\mu = -2.8943$ $\sigma = 0.8932$ | Lognormal $\mu = -3.2594$ $\sigma = 0.8573$ | Normal $\mu = 0.7335$ $\sigma = 0.9267$ |

Tabla 1. Modelos de confiabilidad de los componentes de la planta Libaré

El detalle del procedimiento para construir estos modelos se presenta en [21].

5) Resultados de la valoración de confiabilidad

| Índice | Caso 1 Sin borrascas | Caso 2 Con borrascas | $\Delta = (\frac{caso2}{caso1})\%$ |
|--------------|----------------------|----------------------|------------------------------------|
| A_G [%] | 88.66 | 74.87 | -15.56 |
| LOLE [Horas] | 1827 | 2922 | +59.93 |
| LOLP [%] | 0.20852 | 0.33358 | +59.97 |
| EENS [MW-h] | 4786 | 10423 | +117.78 |

Tabla 2. Resultados de la valoración de confiabilidad de la Planta Libaré

6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Como se observa en los resultados de este estudio, al incluir el efecto de las borrascas la predicción de disponibilidad efectiva de la planta Libaré disminuye en un 15% y la de sus índices de confiabilidad aumenta de 60% a 118%; quiere esto decir que la valoración sin incluir el efecto de las borrascas es optimista lo cual puede llevar a decisiones de planeamiento e inversión equivocadas.

Los resultados presentados en este estudio ilustran el efecto que las borrascas pueden tener sobre la valoración de disponibilidad e índices de confiabilidad de plantas de generación a filo de agua. Sin embargo, estos resultados no pueden extrapolarse a plantas existentes o proyectadas en otras corrientes de agua, pues la dinámica de cada río depende de las particularidades de la zona geográfica donde se ubica.

Se recomienda realizar estudios similares al aquí presentado como parte de los estudios de factibilidad de nuevas plantas de generación a filo de agua.

La teoría de los procesos estocásticos puntuales permite modelar fácilmente fenómenos aleatorios como el de las borrascas siempre y cuando se cumpla la condición de que la duración de los eventos que ocurren sea mucho menor a la de los tiempos interarrivo.

La simulación de Montecarlo es la herramienta más poderosa para realizar valoraciones de confiabilidad, pues, como se observa, se puede incorporar cualquier tipo de modelamiento.

7. AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a los señores Fernando Valencia y Jorge Valencia, funcionarios de la Empresa de Energía de Pereira, por suministrar la información para este estudio.

8. BIBLIOGRAFÍA

[1] Ascher H, Feingold H, *Repairable systems reliability: Modeling, inference, misconceptions and their causes*, Marcel Dekker, 1984.

[2] Rigdon S. E, Basu A. P, *Statistical methods for the reliability of repairable systems*, Wiley, 2000.

[3] Billinton R, Allan R. N, *Reliability Evaluation of Power Systems*, Plenum Press, 1996.

[4] Law A. M, Kelton D. W, *Simulation Modeling and Analysis*, Mc-Graw Hill, 2000.

[5] ReliaSoft, *Reliability Growth and Repairable System Data Analysis Reference*, ReliaSoft Publishing, 2005, Disponible en: www.weibull.com

[6] Zapata C. J, *Análisis probabilístico y simulación*, Universidad Tecnológica de Pereira, 2006.

[7] Zapata C. J, *Confiabilidad de sistemas eléctricos*, Universidad Tecnológica de Pereira, 2006.

[8] Torres A, *Probabilidad, procesos estocásticos y confiabilidad en ingeniería eléctrica*, Universidad de los Andes, 2005.

[9] Ascher H. E, Hansen C. K, "Spurious exponentially observed when incorrectly fitting a distribution to nonstationary data", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 47, No. 4, December 1998.

[10] Park W. J, Kim Y. G, "Goodness-of-fit tests for the power law process", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 41, No. 1, March 1992.

[11] Klefsjo B, Kumar U, "Goodness-of-fit tests for the power law process based on the TTT plot", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 41, No. 4, December 1992.

[12] Park W. J, Kim Y. G, "More goodness-of-fit tests for the power law process", *IEEE Transactions on Reliability*, Vol. 43, No. 2, June 1994.

[13] 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.

[14] C. J. Zapata, Garcés Lina P, Gómez O, "Modelamiento de componentes de sistemas compuestos generación-transmisión para estudios de confiabilidad", *Revista Scientia et Technica*, No. 25, 2004, www.utp.edu.co/ciencia

[15] Zapata C. J, Rengifo E, López J, "Efecto del modelamiento de la demanda en estudios de confiabilidad de largo plazo", *Revista Scientia y Technica*, No. 31, 2006. Disponible en: www.utp.edu.co/ciencia

[16] Zapata C. J, Campos E. L, "Valoración de confiabilidad de sistemas de generación con recursos limitados de energía utilizando simulación de Montecarlo", *Revista Scientia et Technica*, No. 29, 2005. Disponible en: www.utp.edu.co/ciencia

[17] Zapata C. J, Vahos M. E, Romero C. A, "Modelamiento del caudal de un río para estudios de confiabilidad de largo plazo de sistemas eléctricos", *Revista Scientia y Technica*, No. 32, 2007. Disponible en: www.utp.edu.co/ciencia

[18] Choy S, English J. R, Landers T, Yan L, "Collective approach for modeling complex system failures", *Proceedings of Annual Reliability and Maintainability Symposium*, IEEE, 1996.

[19] Zapata C. J, L. P. Garcés, Gómez O, "Reliability assessment of energy limited systems using sequential Montecarlo simulation", *IEEE Transmission & Distribution Latin America Conference & Exhibition*, 2006.

[20] "Power law model – Goodness-of-fit test and estimation methods", IEC Standard 61710, 2000.

[21] Ruíz M. Y, "Modelos multiestado de componentes para estudios de confiabilidad", Proyecto de Grado, Universidad Tecnológica de Pereira, 2006.