

## MODELAMIENTO DE COMPONENTES DE SISTEMAS COMPUESTOS GENERACIÓN – TRANSMISIÓN PARA ESTUDIOS DE CONFIABILIDAD

### RESUMEN

Este artículo presenta una metodología para el modelamiento de componentes de sistemas compuestos generación – transmisión para estudios de confiabilidad.

**PALABRAS CLAVES:** Confiabilidad de sistemas eléctricos, generadores eléctricos, líneas de transmisión, transformadores de potencia.

### ABSTRACT

*This paper presents a methodology for modeling of composite power systems components for reliability studies.*

**KEYWORDS:** *Power system reliability, synchronous generators, power transmission lines, power transformers.*

### CARLOS JULIO ZAPATA

Profesor

Escuela de Tecnología Eléctrica  
Universidad Tecnológica de Pereira  
cjzapata@utp.edu.co

### LINA PAOLA GARCÉS

Ingeniero Electricista

Universidad Tecnológica de Pereira  
lpgarces@utp.edu.co

### OSCAR GÓMEZ CARMONA

Ingeniero Electricista

Universidad Tecnológica de Pereira  
jr@utp.edu.co

## 1. INTRODUCCIÓN

Los primeros pasos a seguir en cualquier estudio de confiabilidad de un sistema eléctrico son:

1. Conseguir la información para construir los modelos probabilísticos que representarán los componentes del sistema.
2. Definir para cada componente los modelos probabilísticos de salida y restauración que mejor se ajustan a la información colectada y que por lo tanto tienen un alto nivel de confianza para ser utilizados.

Con esto, se busca garantizar una alta correlación entre los resultados del estudio (simulación) y el comportamiento real del sistema, dado que su confiabilidad depende de la confiabilidad de sus componentes. Esto quiere decir que, sin importar que se apliquen las metodologías más poderosas o el software más sofisticado para estudiar la confiabilidad a nivel de sistema, la calidad de los resultados y por lo tanto el riesgo de su utilización, depende del modelamiento de los componentes.

Sin embargo, es generalizada la práctica de modelar los componentes de los sistemas eléctricos aplicando la distribución de probabilidad exponencial lo cual implica hipótesis muy importantes con respecto al desempeño de los componentes que no son sustentadas.

Este artículo describe los inconvenientes de esta práctica y presenta una metodología general tanto para el tratamiento de la información como para la obtención de

modelos de los componentes que correspondan a la realidad.

## 2. INFORMACIÓN REQUERIDA

El desempeño en cuanto a confiabilidad de los componentes de un sistema eléctrico depende de las características propias del componente (diseño, fabricación y edad) y de condiciones locales como el medio ambiente y las prácticas operativas y de mantenimiento (O&M), las cuales a su vez dependen de la infraestructura, logística, tecnología, nivel de entrenamiento etc.

Por lo tanto, la información a ser utilizada para construir los modelos de los componentes del sistema, debe ser real, es decir, colectada en el sistema bajo estudio.

Dado esto, en los países desarrollados se han realizado exámenes (surveys) de confiabilidad de los componentes de los sistemas eléctricos desde largo tiempo atrás [4]. Sin embargo, este no es el caso de la restante mayoría de países, incluida Colombia.

Esta ausencia de información lleva a que en muchos casos se utilice la información publicada en la literatura técnica. Esto es incorrecto dadas las grandes diferencias existentes entre las condiciones ambientales y las prácticas de O&M con respecto a las de los países donde se realizaron los exámenes de confiabilidad.

Además, la información publicada solo presenta índices de confiabilidad de los componentes como tasas medias de eventos (fallas, reparación etc.), tiempos medios (falla, reparación, etc.) y disponibilidades. Los datos con que se

calcularon las estadísticas no son presentados y sólo se consideran salidas no planeadas ignorando la contribución de las salidas planeadas sobre la indisponibilidad del componente.

### 3. LA DISTRIBUCIÓN EXPONENCIAL

$$f(t) = h * e^{-h * t} \quad (1)$$

La ecuación (1) es la función de densidad de probabilidad de la distribución exponencial. Esta distribución está definida por un único parámetro de escala (h) el cual se denomina tasa de eventos. La variable t puede ser un tiempo de salida o de restauración, en cuyo caso h se denomina tasa de salidas ( $\lambda$ ) o tasa de restauración ( $\mu$ ), respectivamente.

Es una práctica muy difundida el aplicar en forma indiscriminada esta distribución para modelar componentes debido a:

- La facilidad para definir la distribución simplemente asignando a su parámetro los valores medios de las tasas de salida o restauración reportadas en la literatura técnica o calculadas de información real.
- Las tasas de salida ( $\lambda$ ) y el tiempo medio de restauración ( $r=1/\mu$ ) son los únicos parámetros requeridos en técnicas de análisis como los bloques de frecuencia y duración y el proceso de Markov, las cuales están basadas en la distribución exponencial.
- Solo se dispone de los valores medios de tasas de eventos publicados o solo se quiere calcular estos índices a partir de información real. Para analizar la distribución que mejor modela los tiempos para salida o restauración es necesario contar con los registros históricos de estos tiempos.

Sin embargo, asumir la distribución exponencial y por lo tanto tasas de eventos constantes implica aceptar que:

- Los tiempos para salida y restauración se ajustan a una distribución exponencial lo cual constituye una hipótesis que debe probarse.
- Los componentes tienen tasa de fallas constante, lo cual sólo ocurre en su periodo de vida útil. Si los componentes están por fuera de su vida útil esto no es cierto [3].
- La tasa de restauración de los componentes es constante. Las investigaciones muestran que por lo general, las tasas de restauración son crecientes [2], [3].

Entonces, se recomienda el análisis de la información real de tiempos de salida y restauración debido a que ellos pueden corresponder a cualquier distribución de probabilidad y sus tasas de eventos con respecto al tiempo pueden ser constantes, crecientes o decrecientes.

## 4. METODOLOGÍA

### 4.1 Recolección de información

Para cada componente se requieren reportes de eventos de salida/restauración que incluyan: fecha y hora de salida, descripción del evento de salida, fecha y hora de restauración y descripción del método de restauración. A mayor tiempo de los registros, mayor será el intervalo de confianza de las estadísticas y de los parámetros calculados a partir de la información, por lo cual, los registros deben cubrir un periodo mayor a un año.

La revisión de esta información requiere bastante tiempo pero brinda la confianza de acceder a información original antes de ser filtrada, clasificada y agrupada.

### 4.2 Definición de componente

Cada componente incluye su equipo terminal localizado en las subestaciones, como interruptores, seccionadores, transformadores de instrumentación, etc. Es decir, se debe agrupar la información del componente con la de su equipo terminal.

Especial cuidado debe tenerse con componentes que comparten equipos o instalaciones que puedan producir fallas de modo común. Por ejemplo, unidades de generación que comparten instalaciones civiles e hidráulicas y líneas de transmisión que comparten estructuras. En estos casos, se recomienda modelar el componente común en forma independiente.

### 4.3 Secuencia operativa del componente

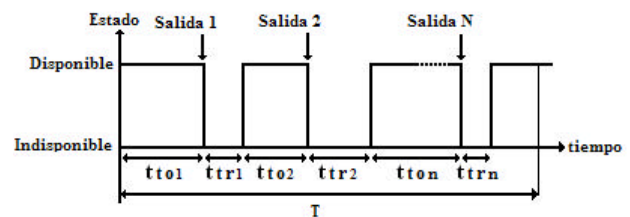


Figura 1. Secuencia operativa de un componente

Los componentes del sistema eléctrico son operados continuamente por lo cual tienen una secuencia operativa de estados de disponibilidad e indisponibilidad definidos por salidas y restauraciones tal como se muestra en la Figura 1.

Cada salida i tiene un tiempo para salida (ttoi) y su

correspondiente tiempo para restauración (ttri) los cuales son aleatorios para el caso de salidas no planeadas. El número de salidas N en un periodo de tiempo dado T también es aleatorio. T es el tiempo durante el cual existen registros válidos para ser utilizados.

El origen de tiempo en la Figura 1 es estrictamente el momento en que el componente empezó su operación “nuevo” en el sistema. Sin embargo, dado que generalmente no existe un registro completo de eventos desde dicho momento, se aproxima al momento de una pasada restauración que es seguida por un reporte consistente de eventos o al momento en el cual se inició el registro de eventos.

#### 4.4 Clasificación de los datos

Las salidas se clasifican de acuerdo a su naturaleza [4] en:

- **Salidas planeadas:** mantenimiento preventivo, expansión del sistema, solicitudes de organismos externos o autoridad pública, etc. Aunque las salidas planeadas son determinísticas en el corto plazo y contribuyen a la indisponibilidad del componente, por lo cual, deben tenerse en cuenta para estudios predictivos de mediano y largo plazo.
- **Salidas no planeadas:** Fallas (salidas forzadas y mantenimiento correctivo), accidentes, vandalismo, sabotaje, solicitud de entidades externas o autoridad pública no planeadas, etc. son aleatorias.

#### 4.5 Estadísticas

Tabla 1. Índices de confiabilidad de los componentes

Índice	Ecuación
Tiempo medio para restauración	$MTTRS = \frac{\sum_{vi}^N ttri}{N} \quad (2)$
Tiempo medio para reparación	$MTTR = r = \frac{\sum_{vi \in falla}^{N_f} ttri}{N_f} \quad (3)$
Tiempo medio para salida	$MTTO = \frac{x * \sum_{vi}^N tto_i}{N} = x * \left( \frac{T}{N} - MTTRS \right) \quad (4)$
Tiempo medio para falla	$MTTF = \frac{x * \sum_{vi \in falla}^{N_f} tto_i}{N_f} = x * \left( \frac{T}{N_f} - MTTR \right) \quad (5)$
Tasa de salidas	$\lambda_o = \frac{N}{x * \sum_{vi}^N tto_i} = \frac{1}{MTTO * x} \quad (6)$
Tasa de fallas	$\lambda = \frac{N_f}{x * \sum_{vi \in falla}^{N_f} tto_i} = \frac{1}{MTTF * x} \quad (7)$

Disponibilidad operacional	$A_o = \frac{\sum_{vi}^N tto_i}{T} = \frac{N * MTTO}{T} \quad (8)$
Disponibilidad inherente	$A_i = \frac{\sum_{vi \in falla}^{N_f} tto_i}{T} = \frac{N_f * MTTF}{T} \quad (9)$

Para cada componente se calculan las estadísticas mostradas en la Tabla 1 [1], [7], donde:

Npo: Número de salidas planeadas en el periodo T

Nuo: Número de salidas no planeadas en el periodo T

Nf: Número de fallas en el periodo T

x: Para líneas de transmisión es su longitud en km. Es igual a uno para los otros componentes.

Estas estadísticas constituyen índices de confiabilidad de los componentes.

#### 4.6 Modelos probabilísticos de los componentes

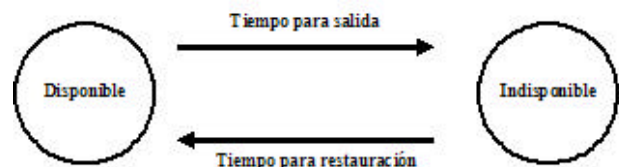


Figura 2. Modelo probabilístico de dos estados

Para cada componente, se aplica el modelo probabilístico de dos estados mostrado en la Figura 2. Este modelo se define matemáticamente por

- La función de densidad de probabilidad de los tiempos para salida  $f_{tto}(t)$  o su función de distribución de probabilidad  $F_{tto}(t)$ .
- La función de densidad de probabilidad de los tiempos para restauración  $f_{ttr}(t)$  o su función de distribución de probabilidad  $F_{ttr}(t)$ .

Las funciones de densidad de probabilidad  $f_{tto}(t)$  y  $f_{ttr}(t)$  se obtienen a partir de los datos, según el procedimiento presentado en la sección 4.7.

Considerando la naturaleza de las salidas, se pueden construir dos diferentes modelos para cada componente:

- **Modelo para análisis de disponibilidad:** Incluye las salidas planeadas y no planeadas, por lo tanto, se utilizan todos los tiempos para salida y restauración. Se aplica para análisis predictivo de mediano y largo plazo.

- **Modelo para análisis de fallas:** Considera solamente salidas no planeadas debidas a falla del componente, por lo tanto, se utilizan los tiempos para falla y tiempos para reparación.

**4.7 Procedimiento para ajustar los datos a una distribución de Probabilidad**

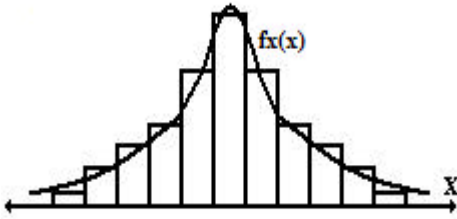


Figura 3. Relación entre histograma y función de densidad de probabilidad

1. Obtener el histograma de datos de la variable aleatoria X bajo estudio (tiempos para salida, falla, restauración, reparación).
2. Escoger una o más funciones de densidad de probabilidad continuas [6] como Weibull, Gamma, Gausiana, etc, que tengan una forma similar a los datos del histograma. Ver la Figura 3.
3. Para la distribución propuesta se estiman sus parámetros a partir de los datos utilizando el método de la máxima verosimilitud [6].
4. Utilizando la prueba de bondad de ajuste Kolmogorov-Smirnov con una probabilidad crítica del 5%, determinar cual de las distribuciones propuestas es aceptada [5].
5. Si varias de las distribuciones propuestas es aceptada, se escoge la de menor valor estadístico de prueba (D).

**5. EJEMPLO**

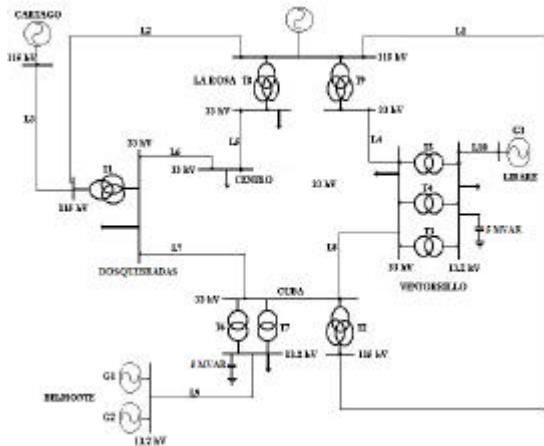


Figura 4. Sistema compuesto de la ciudad de Pereira.

Como ejemplo real de aplicación se toman los componentes del sistema compuesto que sirve a la ciudad de Pereira, el cual se muestra en la Figura 4. Los datos determinísticos de los componentes se presentan en las tablas 2 a 4 donde se utilizan valores base de 100 MVA y el voltaje nominal del equipo.

	Voltaje kV	Longitud km	Conductor	Capacidad térmica (A)	Impedancia p. u.	
					r	x
L1	115	7.8	336.4 MCM	535	0.0112	0.0293
L2	115	4.1	336.4 MCM	535	0.0059	0.0154
L3	115	26.5	336.4 MCM	535	0.0381	0.0997
L4	33	3.731	336.4 MCM	535	0.0651	0.1390
L5	33	3.6	477.0 MCM	666	0.0403	0.1300
L6	33	3.5	336.4 MCM	535	0.0611	0.1304
L7	33	4.301	336.4 MCM	535	0.0750	0.1602
L8	33	7.39	336.4 MCM	535	0.1289	0.2752
L9	13.2	4.48	4/0 AWG	358	0.9460	1.2140
L10	13.2	1.00	4/0 AWG	358	0.2110	0.2710

Tabla 2. Parámetros de las líneas de transmisión

Unidad	Capacidad		Tipo	Turbina	Voltaje kV	Reactancia p. u.
	MVA	MW				
G1, G2	2.35	1.88	Hidro	Pelton	2.4	1.2
G3	6.25	5.63	Hidro	Francis	13.8	1.24

Tabla 3. Parámetros de las unidades generadoras

Transformador	Tipo	Capacidad MVA	Voltaje kV	Reactancia p. u.
T1	Trifásico	75	115/34.5	0.118
T2	Monofásico	75	115/33.8	0.088
T3	Monofásico	10	33/13.75	0.125
T4	Monofásico	10	33/13.75	0.094
T5	Monofásico	12.5	34.5/13.8	0.094
T6	Monofásico	20	33/13.8	0.089
T7	Monofásico	20	33/13.8	0.088
T8	Trifásico	60	115/33	0.098
T9	Trifásico	60	115/33	0.094

Tabla 4. Parámetros de los transformadores de potencia

Se colectó información correspondiente a un periodo de cinco años (Jul 1998- Jun 2003) [7]. Para los bancos de condensadores y los transformadores de potencia T8 y T9 no se encontró información. Para el transformador T2 solo se reportaron dos fallas por lo cual, se asumieron modelos exponenciales para falla y reparación, dado que de todas formas, un proceso de ajuste no tendrá un alto nivel de confianza con tan pocos datos.

Las salidas de la instalación civil/hidráulica de la planta Belmonte producen salidas de modo común en las dos unidades generadoras. Por esto, se considera la instalación como un componente independiente, identificado como BF, el cual desde el punto de vista de confiabilidad, es un componente en serie con el paralelo las dos unidades.

6. RESULTADOS

	Unidades	L1	L2	L3	L4	L5	L6	L7	L8	L9	L10
MTTO	Día	19.8291	62.8235	62.2926	10.9400	16.5322	36.3528	15.8934	11.0150	12.5230	18.7982
MTTF	Día	95.9785	364.9557	304.3211	31.4367	86.9158	100.7815	41.7079	29.5302	75.8652	55.3143
MTTRS	Horas	5.6837	3.4075	16.1506	1.4403	1.6272	4.0130	20.6127	14.7738	1.6820	0.6376
MTTR	Horas	3.0412	5.8633	0.2944	1.1060	0.8770	15.9111	18.1721	21.6756	5.2347	0.4576
$\lambda_o$	Salidas/año-km	2.3599	1.4171	0.2211	8.9423	6.1328	2.8687	5.3396	4.4840	6.5059	19.4168
$\lambda$	Fallas/año-km	0.4876	0.2439	0.0453	3.1119	1.1665	1.0348	2.0347	1.6726	1.0739	6.5987
$A_o$	%	98.8198	99.7745	98.9313	99.4544	99.5917	99.5421	94.8732	94.7073	99.4435	99.8589
$A_l$	%	99.8681	99.9331	99.9960	99.8536	99.9580	99.3465	98.2170	97.0324	99.7133	99.9655
N	--	91	29	29	166	110	50	109	157	145	97
Npo	--	27	16	14	42	22	16	44	71	27	27
Nuo	--	64	13	15	124	88	34	65	86	118	70
Nf	--	19	5	6	58	21	18	43	60	24	33

Tabla 5. Estadísticas de líneas de transmisión

	Unidades	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7
MTTO	Día	85.3117	227.6704	70.1727	72.9890	91.2226	55.1998	53.6410
MTTF	Día	202.8448	912.9552	121.7205	130.4139	202.8314	182.5719	152.1364
MTTRS	Horas	39.3770	13.9104	1.3936	1.2233	1.8583	3.2045	1.5564
MTTR	Horas	1.0574	1.0750	0.3078	0.3524	1.3796	0.6750	0.7264
$\lambda_o$	Salidas/año	4.2784	1.6032	5.2015	5.0008	4.0012	6.6123	6.8054
$\lambda$	Fallas/año	1.7994	0.3998	2.9987	2.7988	1.7995	1.9992	2.3992
$A_o$	%	98.1131	99.7461	99.9173	99.9302	99.9152	99.7587	99.8793
$A_l$	%	99.9783	99.9951	99.9895	99.9887	99.9717	99.9846	99.9801
N		21	8	26	25	20	33	34
Npo		7	2	8	9	8	12	10
Nuo		14	6	18	16	12	21	24
Nf		9	2	15	14	9	10	12

Tabla 6. Estadísticas de transformadores de potencia

Tabla 7. Modelos para análisis de disponibilidad

	Tiempo para salida		Tiempo para restauración			
	a	b	a	b		
L1	Gamma	0.3832	51.7437	Weibull	3.2696	0.4715
L2	Weibull	0.0807	0.6577	Weibull	5.0019	0.7500
L3	Lognorm	3.0773	1.6626	Lognorm	-3.3171	2.0103
L4	Gamma	0.5457	20.0481	Lognorm	-4.2070	1.6644
L5	Weibull	0.2116	0.6315	Lognorm	-4.3222	1.6048
L6	Weibull	0.1631	0.5817	Lognorm	-3.4078	1.8570
L7	Gamma	0.3897	40.7863	Lognorm	-2.9675	2.1346
L8	Gamma	0.5081	21.8198	Weibull	2.1124	0.4465
L9	Gamma	0.5527	22.6584	Lognorm	-4.3879	1.4371
L10	Gamma	0.6049	31.0784	Lognorm	-4.8468	1.4617
T1	Lognorm	2.7903	1.9180	Lognorm	-3.0151	1.9775
T2	Weibull	0.0538	0.5824	Lognorm	-2.8784	1.9630
T3	Gamma	0.4574	153.4271	Lognorm	-4.3204	1.8035
T4	Gamma	0.4591	158.9674	Lognorm	-4.2656	1.6625
T5	Gamma	0.4921	195.1411	Lognorm	-3.8450	1.5951
T6	Gamma	2.5897	2.1240	Lognorm	-3.7845	1.8459
T7	Gamma	2.5549	2.0906	Weibull	6.7162	0.5902
BF	Weibull	0.2752	0.7141	Lognorm	-2.1042	1.1568
G1	Weibull	0.3146	0.5556	Lognorm	-2.8668	2.0909
G2	Weibull	0.2972	0.6317	Lognorm	-3.4047	2.0604
G3	Weibull	0.5273	0.6393	Lognorm	-3.0667	1.3423

Nota: Las ecuaciones de las distribuciones se presentan en la Tabla 9

Tabla 8. Modelos para análisis de falla

	Tiempo para falla		Tiempo para reparación			
	a	b	a	b		
L1	Weibull	0.1230	0.5249	Lognorm	-3.5321	2.0091
L2	Weibull	0.0705	0.0505	Lognorm	-2.7056	1.6480
L3	Lognorm	3.9836	2.2841	Weibull	2.80E+15	8.1972
L4	Gamma	0.6233	50.4321	Lognorm	-4.7021	1.4046
L5	Weibull	0.0216	0.8734	Lognorm	-4.7176	1.2635
L6	Gamma	0.3346	301.1595	Lognorm	-3.6722	2.3221
L7	Gamma	0.3848	108.3925	Lognorm	-3.6288	2.2045
L8	Gamma	0.4154	71.0895	Lognorm	-2.9935	2.5453
L9	Gamma	0.6996	108.4343	Lognorm	-4.5971	1.6835
L10	Weibull	0.0566	0.7488	Lognorm	-5.1022	1.2111
T1	Lognorm	3.7168	1.9649	Normal	0.0441	0.0441
T2	Exponen	912.9552	---	Exponen	0.0448	---
T3	Gamma	0.4141	293.9713	Lognorm	-5.2816	1.3300
T4	Gamma	0.3956	329.6603	Lognorm	-5.0868	1.3705
T5	Gamma	0.5582	363.3712	Lognorm	-4.3996	1.5827
T6	Gamma	0.6487	281.4563	Weibull	10.5704	0.5637
T7	Gamma	0.5907	257.5313	Lognorm	-4.6693	1.7199
BF	Gamma	0.9053	133.0033	Lognorm	-1.5536	2.0535
G1	Weibull	0.1960	0.5993	Lognorm	-3.4147	1.8051
G2	Gamma	0.4762	31.7617	Lognorm	-3.6899	1.9552
G3	Weibull	0.2430	0.6103	Lognorm	-3.8778	1.1898

Nota: Las ecuaciones de las distribuciones se presentan en la Tabla 9

	Unidad	BF	G1	G2	G3
MTTO	Día	7.7565	15.2076	9.8266	3.9728
MTTF	Día	120.4083	25.3925	15.1243	15.1660
MTTRS	Horas	9.4859	19.4380	11.7542	3.1342
MTTR	Horas	31.8000	7.8200	5.2857	1.2164
$\lambda_o$	Salidas/año	47.0571	24.0011	37.1440	91.8752
$\lambda$	Fallas/año	3.0314	14.3743	24.1333	24.0670
$A_o$	%	95.1514	94.9436	95.2526	96.8175
$A_I$	%	98.9116	98.7331	98.5647	99.6669
N	--	224	114	177	445
Npo	--	44	29	33	120
Nuo	--	180	85	144	325
Nf	--	15	71	119	120

Tabla 9. Estadísticas de equipos de generación

Distribución	Función de densidad de probabilidad
Exponencial	$f(t) = \frac{1}{a} * e^{-\frac{t}{a}}$ (10)
Gamma	$f(t) = \frac{1}{b^a \Gamma(a)} * t^{a-1} * e^{-\frac{t}{b}}$ (11)
Normal	$f(t) = \frac{1}{b\sqrt{2p}} * e^{-\frac{(t-a)^2}{2b^2}}$ (12)
Weibull	$f(t) = ab(t^{b-1}) * e^{-at^b}$ (13)
Lognormal	$f(t) = \frac{1}{tb\sqrt{2p}} * e^{-\frac{(\ln(t)-a)^2}{2b^2}}$ (14)

Nota: Las unidades del tiempo corresponden a días.

Tabla 10. Funciones de densidad de probabilidad

### 7. IMPACTO DEL MODELAMIENTO

Para mostrar el impacto que el modelamiento de los componentes tiene sobre los resultados de un estudio de confiabilidad a nivel de sistema, se realizaron las siguientes simulaciones de Montecarlo [7]:

- **Caso 1:** Utilizando modelos de componentes obtenidos mediante la metodología presentada (Tabla 7).
- **Caso 2:** Utilizando modelos exponenciales definidos por  $\lambda_o$  y MTTRS de cada componente.

Punto de carga	Frecuencia de Falla* [eventos/año]		Duración de Falla [horas/evento]	
	Caso 1	Caso 2	Caso 1	Caso 2
Cuba 13.2 kV	12.311	3.6475	2.1084	2.2847
Ventorillo 13.2 kV	4.0234	1.4918	1.7404	5.6383
Ventorillo 33 kV	0.22074	0.094262	0.1883	0.7904
Centro 33 kV	0.013378	0.0040984	0.0636	0.0060
La Rosa 33 kV	0.013378	0.0040984	0.0636	0.0060
Dosquebradas 33 kV	0.013378	0.0040984	0.0636	0.0060

\* Se considera falla en un punto de carga cuando: Está aislado, se aplica un corte de carga o violaciones a los límites de voltaje.

Tabla 11. Resultados a nivel de sistema

### 8. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

1. Los modelos probabilísticos obtenidos con la metodología presentada no corresponden a la distribución exponencial en prácticamente todos los casos y sus tasas de eventos son crecientes. Esto ilustra lo erróneo de asignar los promedios estadísticos de las tasas de eventos de los componentes a una distribución exponencial para utilizarla como modelo.
2. El utilizar arbitrariamente modelos exponenciales para los componentes conduce a resultados muy diferentes con respecto a los que se obtienen utilizando modelos verificados en cuanto a su nivel de ajuste a los datos reales.
3. Debe aclararse que la correlación entre los modelos hallados y el fenómeno estudiado depende de la cantidad de datos utilizados para su construcción independientemente del nivel de ajuste de la distribución a los datos.

### 9. AGRADECIMIENTOS

Los autores manifiestan su agradecimiento a Fernando Valencia, Jefe de Planeamiento Operativo de la EEP, por suministrar la información para realizar este estudio.

### 10. BIBLIOGRAFÍA

- [1] P. S. Hale Jr, R. G. Arno, "Survey of reliability and availability information for power distribution, power generation and HVAC components for commercial, industrial and utility installations", *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 37, pp. 191-196, Feb. 2001.
- [2] IEEE standard 493, "Recommended Practice for the Design of Reliable Industrial and Commercial Systems, IEEE, 1990.
- [3] R. Billinton, R. N. Allan, *Reliability Evaluation of Power Systems*, Plenum Press, 1996.
- [4] CIGRE, *Power System Reliability Analysis - Application Guide*, Cigre, 1987.
- [5] I. R. Miller, J. E. Freund, R. Johnson, *Probability and Statistics for Engineers*, Prentice Hall, 1992.
- [6] A. M. Law, D. W. Kelton, "Simulation Modeling and Analysis", Mc-Graw Hill, 2000.
- [7] L. P. Garcés, O. Gómez, "Análisis de confiabilidad del sistema de transmisión regional usando simulación de Montecarlo", tesis de pregrado, Universidad Tecnológica de Pereira, 2003.