



## Método heurístico para la evaluación de la confiabilidad en un subsistema de líneas de transmisión

### Heuristic method for the evaluation of the reliability in a subsystem of transmissionlines

Yorlandys–Salgado Duarte  
Alfredo M.–delCastillo Serpa

Recibido: abril de 2015  
Aprobado: junio de 2015

#### RESUMEN/ABSTRACT

Se propone un método para la evaluación de la confiabilidad de un subsistema de líneas de transmisión basándose en el comportamiento de magnitudes de mayor generalidad tales como la disponibilidad a partir de estudiar las variables aleatorias  $X_i$ ,  $W_i$ - tiempo (en horas) de operación hasta el fallo y tiempo restauración del servicio respectivamente de la línea  $i$ . El comportamiento probabilístico de tales variables es caracterizando a partir de información disponible en la base de datos de los organismos destinados a la operación y mantenimiento de los Sistemas Eléctricos de Potencia (SEP). Se pretende evaluar la confiabilidad del subsistema después de que ha transcurrido un tiempo de explotación relativamente grande con la intención de identificar deterioro en la vida útil de sus componentes (líneas) con el objetivo de contribuir a tomas de decisiones pertinentes ya sea respecto a su mantenimiento o perspectivas de expansión.

**Palabras clave:** confiabilidad, herramientas estadísticas y probabilísticas, transmisión.

*A method is proposed for evaluating the reliability of a sub-transmission lines based on the behavior of magnitudes greater generality such as availability from studying the random variables  $X_i$ ,  $W_i$ - time (in hours) of operation until failure line and to restore service respectively of the line  $i$ . The probabilistic behavior of such variables is characterized from information available in the database of agencies for the operation and maintenance of Electrical Systems Power (ESP). The reliability of a subsystem of transmission lines is evaluated after a relatively big productive time has passed with the intention of identifying deterioration or not in the life of its components (lines) with the aim of help to take adequate decisions regarding whether maintenance or expansion prospects of the topology of the network.*

**Key words:** reliability, probability and statistical tools, transmission.

#### INTRODUCCIÓN

Uno de los descubrimientos que ha implicado un cambio cualitativo en el desarrollo de la humanidad es la Energía Eléctrica, con innumerables aplicaciones en la industria y todos los aspectos de la vida cotidiana de la sociedad.

Cuando de energía se trata, los SEP son la punta de la pirámide tanto en importancia como en complejidad y las líneas de transmisión como un subsistema de este son elementos pasivos y cómodos para la evaluación de la confiabilidad, pero no carecen de valor dado que tienen la función de transportar grandes bloques de energía desde las unidades generadoras hasta los centros de consumo regulando las transferencias, los niveles de tensión y la frecuencia. Actualmente los métodos conocidos para la evaluación son actualmente laboriosos y de gran dimensión espacial, haciéndose inevitable idear métodos relativamente sencillos que permitan modelar matemáticamente el subsistema de líneas de transmisión a partir de índices de desempeño. Los estudios de confiabilidad son temas de particular interés, en Cuba

existe la experiencia de trabajos realizados en los tres subsistemas del Sistema Electroenergético Nacional (SEN), dígase de modo general la generación [1], la transmisión [2] y la distribución [3]. En lo referente a la evaluación de la confiabilidad, se aplican en Cuba criterios de máxima generalidad, por ejemplo en el diseño de líneas de transmisión al utilizarse el criterio denominado  $N - 1$ , así como el correspondiente plan de mantenimiento para garantizar los niveles de desempeño del subsistema previsto en su diseño [4]. Las líneas de transmisión tienen un largo período de vida útil, pero resulta necesaria la evaluación periódica de los niveles de desempeño, por indicadores de confiabilidad como la disponibilidad que permiten identificar tendencias de deterioro en el tiempo del sistema evaluado.

En el presente trabajo se propone un método heurístico para la formulación de la evaluación de la confiabilidad en subsistemas de líneas de transmisión con aplicabilidad en el SEN, el cual parte de utilizar bases de datos que permitan calcular indicadores anuales como: número de fallas, energía cortada, horas al año sin servicio, horas al año con servicio, tasa de falla, tasa de reparación, los cuales proporcionan información de la situación actual del desempeño del subsistema y denotan variables para estudios de disponibilidad.

### Conceptos sobre confiabilidad en sistemas eléctricos

La confiabilidad de un SEP está relacionada con la evaluación de la habilidad del sistema para realizar su función de entregar energía, cuando y donde sea requerida, en los niveles de tensión y frecuencia apropiados. El término habilidad es usado para indicar la relación entre el comportamiento aleatorio y cronológico de la carga y la disponibilidad aleatoria de los componentes del sistema de generación, transmisión y distribución. Mediante el análisis del efecto combinado de estos fenómenos puede cuantificarse apropiadamente la confiabilidad del sistema para la toma de medidas pertinentes por parte del operador o planificador del sistema. La confiabilidad de un sistema compuesto puede ser descrita por dos atributos: adecuación y seguridad.

1. La adecuación del sistema se refiere a la existencia de una infraestructura suficiente en el sistema para satisfacer la demanda de los consumidores teniendo en cuenta las restricciones operativas del sistema. Estos incluyen las instalaciones necesarias para generar la energía suficiente y las instalaciones de transmisión y distribución para transportar la energía a los puntos de demanda. Por lo tanto, la adecuación está asociada con condiciones estáticas, que no incluyen perturbaciones del sistema [4].
2. La seguridad del sistema se refiere a la capacidad que este posee para responder a las perturbaciones que surgen dentro del mismo. Por lo tanto, la seguridad se asocia con la respuesta del sistema ante el surgimiento de perturbaciones. Estos incluyen las condiciones asociadas con trastornos tanto locales como generalizados y la pérdida no anticipada de las instalaciones principales de generación y transmisión. También se puede definir como la habilidad del sistema de sobreponerse a disturbios entre dos estados estables [4].

El estudio del presente trabajo se enfoca en el primero de los conceptos antes mencionados. Básicamente los criterios de evaluación de la confiabilidad definen cuantitativamente los niveles aceptables de disponibilidad, históricamente existen dos: determinístico y probabilístico [4]. Los determinísticos se basan en examinar un número de situaciones restrictivas escogidas de acuerdo al planificador y a la experiencia del operador, tomando en consideración la incertidumbre de las cargas y la disponibilidad de los componentes del sistema. Los probabilísticos reconocen la naturaleza aleatoria de la demanda y las salidas no anticipadas de los componentes de los sistemas de generación, transmisión y distribución, donde el penúltimo mencionado conforma el estudio del trabajo. El comportamiento de la naturaleza aleatoria de las causas que provocan indisponibilidades intrínsecas en los componentes de un SEP es expresado mediante índices, los cuales cuantifican la calidad del funcionamiento [4]. Existen clasificaciones de los índices, el desempeño según pérdida de carga y lugar de aplicación que se muestra en la tabla 1 son tomados de la referencia [4].

**Tabla 1. Clasificación de índices de desempeño**

Según su estructura	Según pérdida de carga	Según lugar de aplicación
a.- Básicos	a.- Probabilidad de falla	a.- Totalidad del sistema
b.- Compuestos	b.- Frecuencia de falla	b.- Área
	c.- Duración de falla	c.- Barra o Subestación
	d.- Severidad de falla	d.- Falla específica en punto particular
	e.- Energía no suministrada	

Nota: La literatura utiliza el término falla, en el presente trabajo solo se consideran las que provocan indisponibilidad en las líneas, es decir pérdida total de su función, por solo citar los recierres exitosos no se consideran fallas.

Para la modelación matemática de  $X_i$ ,  $W_i$  tiempo (en horas) de operación hasta el fallo y tiempo (en horas) de restauración del servicio respectivamente de la línea  $i$  siendo una variable aleatoria con función de distribución  $F(x)$ . Si  $F(x)$  es continua, entonces para el caso de la distribución Exponencial, su función de densidad es dada por la ecuación (1):

$$f(t) = \lambda \cdot e^{-\lambda \cdot t}, t \geq 0 \quad (1)$$

Donde:  $\lambda$  es el parámetro de la distribución ajustada.

Los Tests de Bondad de Ajuste son útiles para cuantificar si existe evidencia mediante estadígrafos de que el comportamiento de los datos puede ser modelado por la distribución ajustada, se recomienda utilizar el Test Chi-cuadrado, si los datos son suficientes como para que este se ejecute (tamaño de la muestra superior a 25) o si el número de observaciones es demasiado pequeño, el criterio de decisión es a partir el Test de Kolmogorov–Smirnov que se adapta muy bien a muestras pequeñas, ambos definidos en la referencia [5].

Puede darse el caso donde no se ajuste ningún modelo teórico, haciéndose necesario la formalización de leyes de probabilidad empíricas, que con la ayuda de técnicas de identificación como las RN (Redes Neuronales) permiten al igual que las leyes teóricas conocer dado un tiempo hasta el fallo o reparación cuál es la probabilidad de que el sistema o componente según sea el caso funcione, la filosofía para estandarizar las variables está descrita en la metodología propuesta en la referencia [6] evidenciando además las potencialidades de estas técnicas para la evaluación de la confiabilidad.

El ajuste de los modelos probabilísticos es el sustento del cálculo de la disponibilidad de los componentes de una red. Considerando un caso sencillo de dos estados y suponiendo una distribución Exponencial de vida que funciona hasta que falla con parámetro  $\lambda$  y además que el tiempo de reparación es una variable aleatoria Exponencial con parámetro  $\mu$ , la definición de la disponibilidad puntual  $A(t)$  utilizada como una medida de rendimiento de un componente se define en la ecuación (2), y no es más que la probabilidad de que esté funcionando en cualquier instante de tiempo  $t$ .

$$A(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu} + \frac{\lambda}{\lambda + \mu} e^{-(\lambda + \mu)t} \quad (2)$$

Los SEP son sistemas cuyo funcionamiento es continuo, fallan cada cierto tiempo y son reparables, su comportamiento da lugar a una serie de parámetros probabilísticos relacionados con los índices de confiabilidad que se quieren calcular. Los valores de estos parámetros son en realidad valores medios esperados. Las predicciones que se hacen de estos valores se basan en gran medida en los valores históricos de los índices de confiabilidad de los componentes del sistema. Es importante por lo tanto, cuando se realiza un análisis de confiabilidad, no sólo verificar el método utilizado, sino también verificar la confiabilidad de los datos de partida. Se debe señalar que en general no existe mucha estadística con respecto al comportamiento de los sistemas eléctricos por lo tanto la escasez de estos datos ha sido uno de los principales problemas para realizar estudios sobre el comportamiento de los SEP.

La bibliografía referencia principalmente dos enfoques para el cálculo de la disponibilidad, el analítico haciendo alusión en este trabajo a las CM (Cadenas de Markov) y el de simulación, donde en el presente trabajo se utiliza la SMCS (Simulación de Monte Carlo Secuencial). El primero de estos enfoques está descrito en la referencia [7], donde se definen sus propiedades y el segundo se precisa más adelante. Los sistemas eléctricos de generación, transmisión y distribución, aunque en el trabajo solo se refiere a la transmisión, pueden describirse a partir de CM, las cuales pueden modelar dos etapas del mismo: en funcionamiento, o estado disponible, y averiado, o estado indisponible. Entre los dos estados que puede tener el sistema, se definen tasas de transición. En el caso del subsistema de transmisión, las tasas de transición de un estado a otro cuando la ley de ajuste de las variables aleatorias es Exponencial son para cada componente analizado (líneas):  $\lambda_i$  razón de falla del componente  $i$ , y  $\mu_i$  razón de reparación del componente  $i$ . En la figura 1, está representada de forma ilustrativa una CM con dos estados, disponible e indisponible, y sus respectivas razones de transición  $\lambda$  y  $\mu$ .

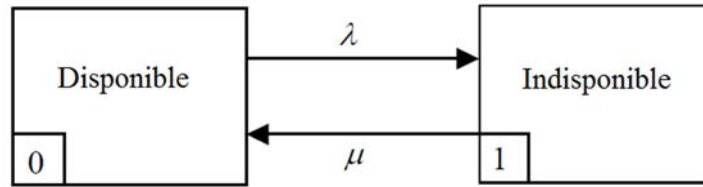


Fig. 1. Cadenas de Markov de un sistema con dos estados

La técnica típica que se aplica para conocer todos los estados operativos de un subsistema de transmisión es la Enumeración de Estados (EE), probado en la referencia [8]. Dado que cada componente del subsistema se supone que solo puede estar en dos estados posibles, haciendo alusión incluso al criterio determinista denominado N – 1: disponible o no disponible; la dimensión del problema es igual a  $2^n$ , donde  $n$  es el número de componentes analizados. Por tanto, la probabilidad de pasar de un estado a otro depende en gran medida al grado de incidencia de la razón de falla o reparación del componente que puede provocar la indisponibilidad. Para un sistema como la figura 1 de dos estados el sistema de ecuaciones diferenciales que resulta de ser modelado mediante CM se muestra en la ecuación (3), siguiente:

$$\begin{aligned} \frac{\partial P_1}{\partial t} &= -\lambda P_1(t) + \mu P_2(t) \\ \frac{\partial P_2}{\partial t} &= -\mu P_1(t) + \lambda P_2(t) \end{aligned} \quad (3)$$

Nota: Antes de continuar es necesario aclarar que la solución del estado 1 del sistema de ecuaciones diferenciales 3 conduce a la ecuación (2).

Por otro lado la Simulación de Monte Carlo (SMC) es una técnica ventajosa para el cálculo de las integrales de alta dimensional y para hacer frente a los integrados no suavizados [9]. Aunque los métodos de cuadratura como las CM pueden extenderse a múltiples dimensiones, estas técnicas están casi invariablemente derrotadas por la dimensionalidad citada anteriormente. Si se quiere aproximar la integral ver la ecuación (4).

$$E[g(X)] = \int_{-\infty}^{\infty} g(x) f(x) dx \quad (4)$$

donde  $g(X)$  es de un integrando arbitrario, es posible a partir de una muestra  $X_1, \dots, X_n$  estimar  $E[g(X)]$  por el promedio de la muestra  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(X_i)$ . La ley de los grandes números implica que estas estimaciones de Monte Carlo convergen a  $E[g(X)]$  cuando  $n$  tiende a  $\infty$ . Si  $g(X)$  es de cuadrado integrable, entonces el teorema del límite central nos permite refinar esta conclusión afirmando que el estimador  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n g(X_i)$  es una distribución aproximadamente Normal alrededor de  $E[g(X)]$  con una desviación estándar  $\sqrt{\text{Var}[g(X)]/n}$ . En la práctica, se estima el orden del error de la SMC como  $\sqrt{v/n}$ , donde la ecuación (5), es el estimador no sesgado habitual de  $\text{Var}[g(X)]$  y por tanto el error en la estimación de  $E[g(X)]$  tiene descensos de tasa lenta  $n^{-1/2}$ . El cálculo de la disponibilidad mediante la SMC ha tomado fuerza con el uso de la computación, tal es así que en los estudios más recientes son enfocados con este método [10-12].

$$v = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left[ g(X_i) - \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n g(X_j) \right]^2 \quad (5)$$

La SMC consiste en la simulación de una gran cantidad de situaciones o estados del sistema, generadas de forma aleatoria, donde los valores de los índices de confiabilidad están asociados a la combinación de todos los momentos de las distribuciones de probabilidad de cada componente del sistema. El método de SMC se clasifica según sea el caso de estudio en: Método de SMCS (Simulación de Monte Carlo Secuencial) y SMCNS (Simulación de Monte Carlo No – Secuencial). Para el caso de la disponibilidad de los componentes del subsistema de transmisión de este trabajo se utiliza la SMCS la cual corresponde a una simulación cronológica de la operación del subsistema en un lapso de tiempo definido, para este caso un

año. El ciclo “disponible” – “no disponible” de cada componente es simulado a lo largo de una línea de tiempo, obteniéndose como resultado una secuencia cronológica de estados del subsistema de transmisión que se puede apreciar en un vector aleatorio  $X = (X_1, \dots, X_k)$  mediante el muestreo de cada componente en cada paso como se muestra en la ecuación (6):

$$\Pr(X_1 = x_1, \dots, X_k = x_k) = \Pr(X_1 = x_1) \prod_{j=2}^k \Pr(X_j = x_j | X_1 = x_1, \dots, X_{j-1} = x_{j-1}) \quad (6)$$

Esta metodología permite incluir factores cronológicos como la modelación horaria de la demanda, impacto de la hidrología y realizar cálculos más precisos de los indicadores relacionados con la frecuencia y duración. No obstante, esta metodología consume considerablemente más recursos computacionales debido a la mayor complejidad de la simulación, en el ejemplo de aplicación se profundiza este aspecto.

Si se considera un modelo de dos estados, a partir de la distribución ajustada, tomando como ejemplo la Exponencial, se obtienen los valores aleatorios de las variables  $X_i$  y  $W_i$ , que se denotan como *TTF* (Tiempo hasta el Fallo) y *TTR* (Tiempo de reparación) respectivamente mostrados en las ecuaciones (7) y (8), a partir de la inversa de la distribución ajustada, generando con una función de distribución Uniforme números aleatorios  $U_1$  y  $U_2$  entre [0; 1]. El ciclo “disponible” – “no disponible” de cada componente es simulado, para el caso de dos componentes se muestra en la figura 2, y el cálculo de la disponibilidad es a partir de la ecuación (9), donde  $N$  es el número total de ciclos simulados y  $x_i$  es la cantidad de ciclos simulados en que el sistema está funcionando, denotando 1 cuando el sistema o componente está funcionando según sea el caso y 0 cuando no está funcionando.

$$TTF = -\frac{1}{\lambda} \ln U_1 \quad (7)$$

$$TTR = -\frac{1}{\mu} \ln U_2 \quad (8)$$

$$E(x) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i \quad (9)$$

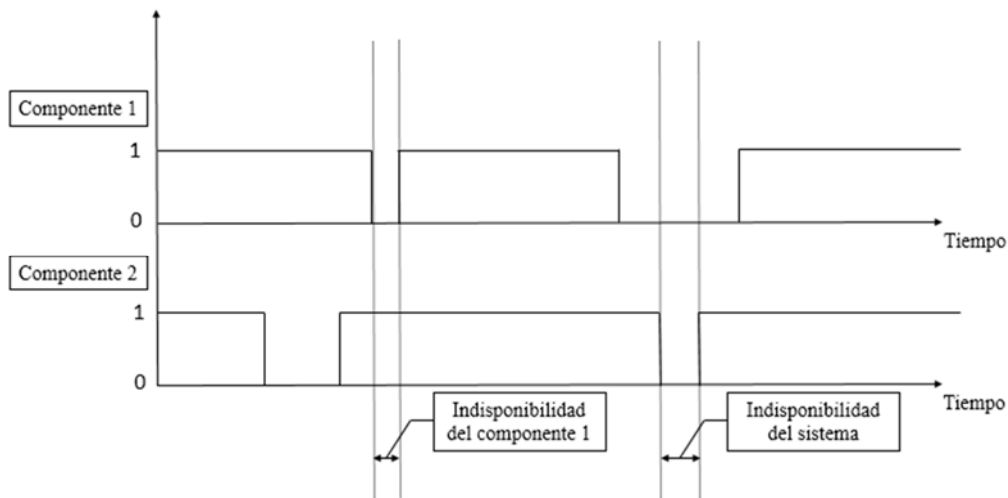


Fig. 2. Secuencia de estado de un sistema de dos componentes

### Método propuesto

El método propuesto se fundamenta a partir de estudiar las variables aleatorias  $X_i$  tiempo (en horas) de operación hasta el fallo de la línea  $i$  y  $W_i$  tiempo (en horas) de restauración del servicio de la línea  $i$ . El comportamiento probabilístico de tales variables es caracterizado a partir de información disponible en la base de datos de los organismos destinados a la operación, mantenimiento y planificación de los SEP. Para su aplicación, como es práctica común en cualquier estudio basado en datos, debe realizarse una previa

revisión de estos antes de su utilización, para eliminar datos dudosos o que no se correspondan con el interés del estudio, por ejemplo el mantenimiento programado no es aleatorio, por tanto no se considera en el comportamiento de estas variables. La intención del método propuesto es evaluar la confiabilidad de un subsistema de transmisión después que ha transcurrido un tiempo relativamente grande después de su período de explotación, con la intención de identificar si hay deterioro o no en la vida útil de sus componentes (líneas) y contribuir a la toma de decisiones pertinentes ya sea respecto a su mantenimiento o perspectivas de expansión de la topología de la red. Las consideraciones de los modelos matemáticos abordados anteriormente es necesario garantizarlas para la aplicación del método. No obstante para solucionar de este problema en particular se considera:

1. La salida de algún elemento del subsistema caso estudio escogido no viola ningún parámetro abordado en la seguridad. El estudio está enmarcado en el comportamiento aleatorio de la disponibilidad de los componentes (líneas) del subsistema sin tener en cuenta implicaciones en la operación tanto dinámica como estática del sistema.
2. Cada componente solo posee dos estados, disponible e indisponible.
3. Los espacios de estados operativos del subsistema caso de estudio están definidas por la disponibilidad o indisponibilidad de los componentes.
4. Solo se consideran fallas en los componentes "líneas de transmisión" (la generación y la transformación se consideran con confiabilidad uno, es decir, están siempre disponible).
5. Solo se analizan fallas intrínsecas de los elementos de las líneas de transmisión.
6. Independencia entre las variables aleatorias.
7. Función de probabilidad unimodal para cada  $X_i$  y  $W_i$ .

La evaluación de la confiabilidad es posible obtenerla correctamente siguiendo los pasos enumerados a continuación:

**Paso 1.** Ajuste de modelos probabilísticos unimodales posibles para cada variable aleatoria  $X_i$  y  $W_i$  determinando sus correspondientes funciones de riesgo o razones de fallas.

Los modelos probabilísticos unimodales para las variables aleatorias se obtienen de la estadística de las fallas correspondientes a cada una de las líneas almacenada en las bases de datos, a partir de la cual se pueden obtener los valores de las variables  $X_i$  y  $W_i$ . Los valores de estas variables permiten aplicar los métodos de estadística inferencial no paramétrica descritos anteriormente y así obtener, en caso de ser posible, los modelos puntualizados en el trabajo. Los ajustes de leyes que se realizan a partir de los Test mencionados denotan los parámetros estimados de las funciones de densidad de cada distribución ajustada, que son utilizadas tanto para la SMC como para el sistema de ecuaciones diferenciales de las CM.

El criterio de decisión de los Test realizados es a partir del p-valor más pequeño de los Test que se realizan. Si p-valor es superior o igual a 0,5; no se rechaza con un nivel de confianza de al menos un 95% que se ajustan los datos a la ley bajo estudio. En ocasiones puede que se ajuste a más de una ley de distribución de probabilidad, en tales casos se mantienen todas las leyes que se ajusten a reserva de que se seleccionan las que resulten de más interés para el estudio.

**Paso 2.** Representar la estructura de la red del caso de estudio mediante diagramas en bloque, muy utilizados en ingeniería para representar y enmarcar la funcionalidad del componente analizado de la manera más simple posible y para poder visualizar correctamente su configuración.

La terminología a ser utilizada para el diagrama en bloque es criterio del investigador, pero para este tipo de estudios es recomendable separar el SEP en bloques generación, encerrando todos los componentes que pueden fallar en la planta, desde el motor primario hasta el generador eléctrico, bloque de transformación o subestación, involucrando todos los componentes en la transformación: el transformador, los interruptores, seccionadores, etc. y bloque transportación, enmarcando a todos los componentes de las líneas de transmisión que pueden provocar la pérdida de su función: las protecciones, los cables protectores, los aisladores, conductores, etc.

Es conveniente, debido a la intención del estudio, realizar simplificaciones. Para el análisis de la confiabilidad en las líneas de transmisión se pueden suponer que los bloques de generación y transformación no fallan, es decir su confiabilidad es uno, entonces solo se consideran para el estudio el

bloque de transportación. Estas simplificaciones permiten reducir la dimensionalidad que es uno de los principales problemas de algunos métodos referenciados.

**Paso 3.** Evaluación de la condición de independencia estadística entre las variables aleatorias.

En cualquier estudio se necesitan realizar suposiciones, las cuales son hechas a partir de la experiencia y manejo de los problemas por parte de los especialistas, la presente investigación no está exento de esto. Este método supone la condición de independencia estadística entre las variables aleatorias  $X_i$  y  $W_i$ . Esta condición es bastante fuerte en algunos sistemas y puede limitar la aplicación del método en algunos casos, por tanto se considera implícita esta condición para la  $W_i$  y solo se evalúa para  $X_i$ , dado que son las variables que más influyen en la evaluación de la disponibilidad. La condición de independencia entre las variables aleatorias  $X_i$  se comprueba al utilizar una prueba de hipótesis estadística relativa a la correlación lineal entre los valores de estas variables. El método que comúnmente se utiliza está basado en el momento producto de Pearson entre cada par de variables [5]. Es importante destacar que estos coeficientes de correlación miden la fuerza de la relación lineal entre las variables, así una alta correlación lineal entre las variables indicaría dependencia y no es aplicable el método.

En este procedimiento el criterio de decisión es a partir del  $p$  – valor que comprueba la significancia estadística de las correlaciones estimadas. Si los  $p$  – valor están por debajo de 0,05 indican significancia estadística de correlaciones no – cero para un nivel de confianza del 95%, es decir existe evidencia de relación lineal entre las variables con un 95% de confianza. El resultado de este análisis es la matriz de correlación, capaz de mostrar si existe o no correlación lineal entre cada par de variables.

**Paso 4.** Análisis de la disponibilidad del caso de estudio utilizando las CM en caso de ajustes de leyes Exponenciales y Weibull y SMC en el caso de ajuste de cualquier tipo de ley teórica.

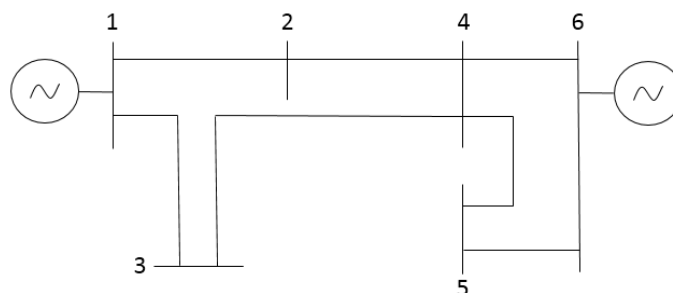
El método de CM para la modelación matemática del cálculo de la disponibilidad es posible aplicar si se cumplen los pasos anteriores. Como se citó anteriormente para conocer todos los estados operativos del caso de estudio se utiliza la EE para las CM, dando como resultado un sistema de ecuaciones lineales con coeficientes constantes o variables según la ley de probabilidad de las variables aleatorias, si son constantes resulta de ajustes de distribución Exponencial y variables pueden ser Weibull, el uso de otras leyes para las CM complejiza la solución del sistema de ecuaciones diferenciales. Para cualesquiera sean los casos donde se calcula la disponibilidad se supone que todos los componentes del subsistema caso de estudio están funcionando en el instante inicial.

Los sistemas de ecuaciones diferenciales que resultan de la modelación mediante CM se pueden resolver con el método numérico de Runge Kutta de 4to Orden, muy bien fundamentado en la referencia [13], para así obtener una solución con error absoluto del método incluso menor que 10<sup>-10</sup>. Para el caso de la SMC el cálculo de la disponibilidad es mediante el procedimiento descrito anteriormente, que puede ser implementada la secuencia en cualquier lenguaje de programación.

Nota: Las RN se utiliza cuando no es posible ajustar funciones de probabilidad teórica, y es necesario utilizar la empírica. Para calcular la disponibilidad con RN el método a utilizar es la SMC.

**Ejemplo de aplicación**

En la figura 3, se muestra el monolineal de las líneas que se analizan en el subsistema de transmisión de 110kV seleccionado como caso de estudio y su nomenclatura.



**Fig. 3. Monolineal del caso de estudio para la evaluación de la confiabilidad**

**Paso 1**

Los resultados de las tablas 2 y 3, son los parámetros de las leyes de probabilidad teórica ajustada para las fallas y reparaciones respectivamente de la Línea 4-6, que permite modelar matemáticamente el comportamiento de las variables  $X_i$  y  $W_i$ . La ecuación (10), muestra para la Línea 5-4, la ley acumulada empírica propuesta para la variable  $X_i$  normalizada y los resultados de su ajuste mediante RN de una red del tipo algoritmo de retro-propagación 1-20-1, y una neurona a la entrada, una capa oculta de 20 neuronas y una neurona a la salida, con función de aprendizaje Levenberq-Marquardt y función de transferencia entre capas Sigmoidea se muestra en la tabla 4. Para entrenar la red se utiliza la inversa la función de distribución empírica para obtener simulaciones de la variable aleatoria mediante SMC. Estos resultados son obtenidos para cada una de las líneas del caso de estudio.

**Tabla 2. Parámetros de las leyes de probabilidad ajustada para la variable aleatoria  $X_i$**

Exponencial	Gamma	Lognormal	Weibull
media = 1074,23	forma = 0,771964	media = 1559,38	forma = 0,846821
	escala = 0,000718622	desviación estándar = 4646,27	escala = 986,934
		Escala log: media = 6,2069	
		Escala log: desv. est. = 1,51337	

**Tabla 3. Parámetros de las leyes de probabilidad ajustada para la variable aleatoria  $W_i$**

Exponencial	Gamma	Lognormal	Weibull
media = 6,18056	forma = 0,856795	media = 9,92028	forma = 0,92887
	escala = 0,138627	desviación estándar = 30,0409	escala = 5,98908
		Escala log: media = 1,13485	
		Escala log: desv. est. = 1,52298	

$$p(X_i) = \begin{cases} 0,142857 & \text{si} & 0 \leq X_i < 0,003374 \\ 0,285714 & \text{si} & 0,003374 \leq X_i < 0,241289 \\ 0,428571 & \text{si} & 0,241289 \leq X_i < 0,518006 \\ 0,571429 & \text{si} & 0,518006 \leq X_i < 0,546560 \\ 0,714286 & \text{si} & 0,546560 \leq X_i < 0,591367 \\ 0,857143 & \text{si} & 0,591367 \leq X_i < 0,749405 \\ 1 & \text{si} & 0,749405 \leq X_i < 1 \end{cases} \quad (10)$$

**Tabla 4. Resultados de ajuste con RN de la línea 5-4**

Fallas Normalizadas	Salida de la Red	Error
0,003373963	0,003376458650607	-2,49570e-06
0,241288953	0,241288951945950	1,05400e-09
0,518005594	0,518005599659324	-5,65930e-09
0,546560474	0,546560461574585	1,24250e-08
0,591367219	0,591367225356351	-6,35640e-09
0,749405196	0,749405193985420	2,01460e-09
1	0,999679397104845	3,20600e-04

**Paso 2**

En el presente trabajo solo se estudian las líneas de transmisión, por ende se considera que la Generación y Transformación (refiriéndose a las subestaciones) no fallan, no obstante no invalida ningún resultado y no deja de ser pertinente. Se muestra en la figura 4, el equivalente en bloques del monolineal del subsistema caso de estudio escogido para una mejor comprensión.



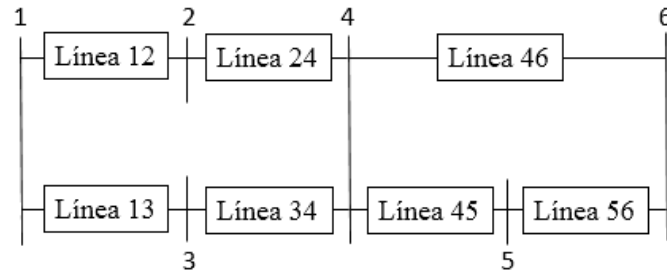


Fig. 4. Diagrama en Bloque del Monolineal caso de estudio

### Paso 3

La tabla 5, muestra la hipótesis estadística relativa a la correlación lineal entre los valores de cada par de variables aleatorias  $X_i$ . En este caso ningún p-valor (tercer valor de cada casilla) está por debajo de 0,05 indicando que no existe significancia estadística de correlaciones lineales para un nivel de confianza del 95 % entre las variables aleatorias.

Tabla 5. Correlación lineal entre cada par de variables aleatorias  $X_i$

	4 – 6	1 – 2	1 – 3	4 – 5	5 – 6	2 – 4	3 – 4
4 – 6		-0,3086 (7) 0,5006	0,4336 (7) 0,3311	-0,5660 (7) 0,1853	-0,0387 (7) 0,9343	-0,0713 (7) 0,8793	0,3980 (7) 0,3766
1 – 2	-0,3086 (7) 0,5006		-0,2520 (7) 0,5856	0,2656 (7) 0,5649	0,0167 (7) 0,9717	0,0014 (7) 0,9977	0,7059 (7) 0,0763
1 – 3	0,4336 (7) 0,3311	-0,2520 (7) 0,5856		0,3627 (7) 0,4239	0,0758 (7) 0,8717	0,6280 (7) 0,1310	0,0321 (7) 0,9455
4 – 5	-0,5660 (7) 0,1853	0,2656 (7) 0,5649	0,3627 (7) 0,4239		0,5047 (7) 0,2481	0,5154 (7) 0,2365	-0,0870 (7) 0,8529
5 – 6	-0,0387 (7) 0,9343	0,0167 (7) 0,9717	0,0758 (7) 0,8717	0,5047 (7) 0,2481		-0,1575 (7) 0,7359	0,0950 (7) 0,8395
2 – 4	-0,0713 (7) 0,8793	0,0014 (7) 0,9977	0,6280 (7) 0,1310	0,5154 (7) 0,2365	-0,1575 (7) 0,7359		0,0444 (7) 0,9247
3 – 4	0,3980 (7) 0,3766	0,7059 (7) 0,0763	0,0321 (7) 0,9455	-0,0870 (7) 0,8529	0,0950 (7) 0,8395	0,0444 (7) 0,9247	

### Paso 4

La enumeración utilizando CM y la SMC no son mutuamente excluyentes, el uso de estos métodos está determinado según el estudio en particular. Para el caso del cálculo de la disponibilidad de los componentes de una red de líneas de transmisión eléctrica ambos son análogos, pero las CM están limitadas por la dimensión y aumento de la complejidad del sistema de ecuaciones diferenciales por tipo de ley ajustada; sin embargo la SMC no. El registro de falla y reparación según sea el caso se ajusta en la mayoría de los casos a varias de estas leyes de probabilidad teóricas típicas, como se muestran en las tablas 2 y 3, el uso de una ley u otra es a criterio del investigador. La analogía entre las CM y la SMC, se comprueba mediante el cálculo de la disponibilidad para el mismo componente por ambos métodos mediante el ajuste de ley Exponencial, dado que según la teoría para este caso las CM es superior. En la figura 5, se muestra la línea 4 – 6 para 1000 horas de funcionamiento. En el caso de la SMC, a medida que se aumente el número de simulaciones se acerca a la solución exacta (SMC 1), pero criterios prácticos demuestran que es más factible fijar un número de simulaciones y calcularla  $n$  veces y promediar los resultados (SMC 2).

Las tablas 6 y 7, muestran el cálculo de la disponibilidad para 1000 horas de funcionamiento del enlace 1 – 6. En el Anexo 1 se muestra para el enlace 4 – 6 el sistema de ecuaciones diferenciales resultante de

modelar mediante CM para ajuste Exponencial. Es necesario evidenciar que la SMC consume más recursos computacionales que las CM, mientras que este último el resultado es casi instantáneo la SMC en busca de mayor exactitud en la simulación de los resultados, aumenta linealmente el tiempo computacional con el número de simulaciones, este efecto se evidencia en la figura 6.

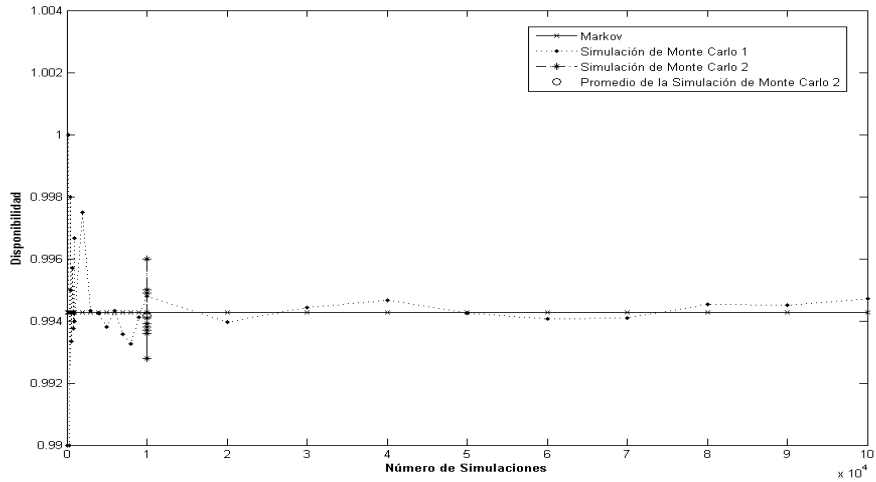


Fig. 5. Disponibilidad de la Línea 4 – 6 para 1000 horas de funcionamiento

Tabla 6. Markov Exponencial

Línea	Disponibilidad
4 – 6	0,994279
1 – 2	0,999833
1 – 3	0,999646
4 – 5	0,999697
5 – 6	0,996956
2 – 4	0,999826
3 – 4	0,997983
1 – 6	0,999980

Tabla 7. Simulación de Monte Carlo

Línea	Disponibilidad
4 – 6	0,994072
1 – 2	0,999732
1 – 3	0,999644
4 – 5	0,999720
5 – 6	0,995648
2 – 4	0,999790
3 – 4	0,996316
1 – 6	0,999971

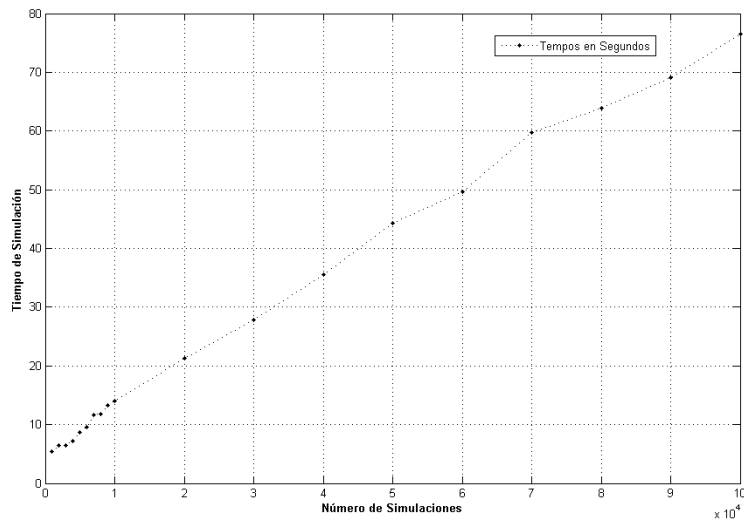


Fig. 6. Comportamiento del tiempo computacional

## CONCLUSIONES

1. La base de datos de los organismos destinados a la operación y mantenimiento de los SEP en la actualidad permiten obtener muestras representativas de las variables aleatorias como  $X_i$  y  $W_i$ , de las cuales es posible calcular indicadores probabilísticos de rendimiento como la disponibilidad a partir de ajustarlas matemáticamente con modelos probabilísticos unimodales.
2. El método propuesto disminuye la complejidad y la dimensionalidad del problema a partir de representar la estructura de la red mediante diagramas en bloque para poder visualizar correctamente su configuración y enmarcar la funcionalidad del componente analizado.
3. La evaluación de la condición de independencia estadística para la variable aleatoria  $X_i$  es alcanzable como se muestra en el ejemplo de aplicación mediante la matriz de correlación.
4. El método propuesto brinda el procedimiento necesario para calcular la disponibilidad como medida de rendimiento del funcionamiento de los componentes de un sistema utilizando dos métodos de cálculo muy referenciados en la literatura del tema permitiendo evaluar la condición actual del sistema y las posibles mejoras en la configuración de la red.

## REFERENCIAS

- [1] Dorrbercker S, Torres W, Mole J. Experiencias en el diagnóstico del aislamiento de los generadores de potencia. *Ingeniería Energética*. 2012; 33(1):59-67. ISSN 1815 - 5901.
- [2] Gondres I, Baez R, Lajes S, del Castillo A. Determinación de la confiabilidad en interruptores de potencia: caso de estudio. *Revista chilena de Ingeniería*. 2013;21(2):271-278. ISSN 0718-3291.
- [3] Sierra E, Lajes S. Evolución de los métodos de evaluación de la confiabilidad para redes eléctricas de distribución. *Ingeniería Energética*. 2010;31(3)42-48. ISSN 1815-5901.
- [4] Billinton R, Allan R. *Reliability evaluation of power systems*. Second ed. New York:Plenum Press; 1996. ISBN 0-306-45259-6.
- [5] Miller I, Freund J, Johnson R. *Probability and Statistics for Engineers*. Four ed. Prentice Hall; 1990. ISBN 968-880-235-2.
- [6] Mohammoud MH, Ahmed N AA, Sazali P AK. Reliability Evaluation of Distribution Power Systems Based on Artificial Neural Network Techniques. *Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2012, ID 560541.
- [7] Norris JR. *Markov Chain*. Cambridge University Press; 1997. ISBN 0-521-48181-3.
- [8] Fuentes V, Duarte O. Evaluación mediante enumeración de estados de la confiabilidad del Sistema Interconectado del Norte Grande de Chile (SING). *Revista chilena de Ingeniería*. 2011;19(2):292-306. ISSN 0718-3291.
- [9] LANGE K. *Numerical Analysis for Statisticians*. Statistics and Computing. Springer; 2010. ISBN 978-1-4419-5945-4\_22.
- [10] Zhao Q, Wang P, Goel L, Ding Y. Evaluation of nodal reliability risk in a deregulated power system with photovoltaic power penetration. *IET Generation, Transmission & Distribution*. 2014;8:421-430.
- [11] Wangdee W, Billinton R, Li W. *Wind Integrated Power System Well-Being Analysis*. IEEE. 2013. ISSN 978-1-4799-1303-9.
- [12] Lio B, Wu H. Reliability evaluation of generation and transmission systems considering the effects of wind farm. *Applied Mechanics and Materials*. 2014;541-542:932-936.
- [13] Cheney W, Kincaid D. *Numerical Mathematics and Computing*. Sixth ed, Thomson Corporation; 2008. ISBN 13: 978-0-495-11475-8.

## AUTORES

### Yorlandys Salgado Duarte

Ingeniero Electricista. Profesor Adiestrado. Centro de Estudios de Matemática para las Ciencias Técnicas (CEMAT), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (IPSJAE).Calle 114 No. 11901 entre Ciclo Vía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba.  
e-mail: ysalgado@cemat.cujae.edu.cu

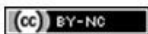
### Alfredo M. del Castillo Serpa

Ingeniero Electricista. Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Titular. Centro de Estudios de Matemática para las Ciencias Técnicas (CEMAT), Instituto Superior Politécnico José Antonio Echeverría (IPSJAE).Calle 114 No. 11901 entre Ciclo Vía y Rotonda, Marianao, La Habana, Cuba.  
e-mail: acastillo@cemat.cujae.edu.cu

## ANEXOS

### Anexo 1. Sistema de ecuaciones diferenciales con ajuste Exponencial (coeficientes constantes)

$$\begin{aligned}\frac{\partial P_1(t)}{\partial t} &= -\left[\sum_{i=1}^n \lambda_i\right] \cdot P_1(t) + \sum_{j=1}^n \mu_j \cdot \sum_{k=2}^4 P_k(t) \\ \frac{\partial P_2(t)}{\partial t} &= -\left[\sum_{i=2}^n \lambda_i + \mu_1\right] \cdot P_2(t) + \lambda_1 \cdot P_1(t) + \sum_{j=2}^n \mu_j \cdot \sum_{k=5}^6 P_k(t) \\ \frac{\partial P_3(t)}{\partial t} &= -\left[\lambda_1 + \lambda_3 + \mu_2\right] \cdot P_3(t) + \lambda_2 \cdot P_1(t) + \mu_1 \cdot P_5(t) + \mu_3 \cdot P_7(t) \\ \frac{\partial P_4(t)}{\partial t} &= -\left[\sum_{i=1}^{n-1} \lambda_i + \mu_3\right] \cdot P_4(t) + \lambda_3 \cdot P_1(t) + \sum_{j=1}^{n-1} \mu_j \cdot \sum_{k=6}^7 P_k(t) \\ \frac{\partial P_5(t)}{\partial t} &= -\left[\sum_{j=1}^{n-1} \mu_j + \lambda_3\right] \cdot P_5(t) + \lambda_2 \cdot P_2(t) + \lambda_1 \cdot P_3(t) + \mu_3 \cdot P_8(t) \\ \frac{\partial P_6(t)}{\partial t} &= -\left[\lambda_2 + \mu_3 + \mu_4\right] \cdot P_6(t) + \lambda_3 \cdot P_2(t) + \lambda_1 \cdot P_4(t) + \mu_2 \cdot P_8(t) \\ \frac{\partial P_7(t)}{\partial t} &= -\left[\sum_{j=2}^n \mu_j + \lambda_1\right] \cdot P_7(t) + \lambda_3 \cdot P_3(t) + \lambda_2 \cdot P_4(t) + \mu_1 \cdot P_8(t) \\ \frac{\partial P_8(t)}{\partial t} &= -\left[\sum_{j=1}^n \mu_j\right] \cdot P_8(t) + \lambda_3 \cdot P_5(t) + \lambda_2 \cdot P_6(t) + \lambda_1 \cdot P_7(t)\end{aligned}$$



Los contenidos de la revista se distribuyen bajo una licencia Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License.