

# Diseño de Software para Medición de Indicadores de Confiabilidad del Sistema de Generación Eléctrico Colombiano

Angélica Mendoza-González, MSc<sup>1</sup>, Haider Amaranto-Sanjuán, MSc<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Docente Investigador Fundación Tecnológica Antonio de Arévalo, Colombia, angelica.mendoza@tecnar.edu.co

<sup>2</sup>Investigador Confiabilidad de Sistemas, Colombia, haider.amaranto@uniandes.edu.co

*Abstract - Electric power generation systems must reliably provide the demand for electricity, taking into consideration technical and economic views, which includes analysis of energy costs no supplying and negative social impacts from supply disruptions. In this respect, the so-called reliability engineering has become important, which is the section in the asset management that allows to assess the useful life and performance of the assets, aiming to maximizing its operating times, that also maximize of operating times of the productive system. About, the reliability engineering studies firstly, identifies the indicators that allow to describe the operation the assets in the system and compare them, through benchmarking analysis, with the performance of those assets in systems of similar operation in the world. The reliability indicators are determined from failures reports and repairs of the assets of the system. For the particular case of the Colombian electrical power system, which there are more than 150 power generation units, failures and notifications of power recovery are continuously reported, leading to a high volume of data that must be managed in a way to facilitate the projection of reliability indicators. This project aims to develop tool that will enable of calculation of reliability pointers, both systematic and specific by type of power generation and for periods time of power generation, which will facilitate correlation analysis of failure rates and power recovery, with variables such as time, technology and principle of power generation, climate, and other. It will consist of a stage of data architecture design, analysis and data processing, and then the indicators computation from definitions and KPI (Key Performance Indicators) sheets, according to recognized standards. This tool will be useful given that the results will be source of information for the subsequent process in reliability engineering, benchmarking of indicators and action plan to implements the continuous improvement in asset management.*

*Keywords-- data architecture, reliability, software design, reliability engineering, power generation systems.*

*Resumen- Los sistemas de generación de energía eléctrica deben suplir confiablemente la demanda de electricidad, teniendo en cuenta criterios técnico-económicos en el que se incluya análisis de costos de energía dejada de suministrar y los aspectos sociales negativos que resultan de interrupciones en el suministro. En ese sentido, se ha hecho relevante la denominada ingeniería de confiabilidad, que es la rama en la gestión de activos que permite estudiar la vida útil y desempeño de los mismos, con el objetivo de maximizar sus tiempos de operación, que redunde en la maximización de los tiempos de operación del sistema productivo. Estos estudios de ingeniería de confiabilidad implican inicialmente la determinación de indicadores que permitan describir la operación de los activos en el sistema y compararlos, mediante análisis de benchmarking, con el desempeño de dichos activos en sistemas de similar operación en el mundo [1]. Los indicadores de*

*confiabilidad se determinan a partir de reportes de fallas y de reparación de los activos que hacen parte del sistema. Para el caso particular del sistema eléctrico colombiano, en el que existen más de 150 unidades de generación, continuamente se están reportando fallas y notificaciones de restablecimiento de las mismas, que trae como consecuencia un relativo alto volumen de datos que deben ser tratados para facilitar la organización y posterior uso para la determinación de los indicadores. Este proyecto tiene como objetivo el desarrollo de una herramienta que permitirá determinar los indicadores de confiabilidad tanto sistémicos, como específicos por tipo de generación y por períodos de tiempo, que facilitará el análisis de correlación de tasas de falla y reparación, con variables como tiempo, tecnología y principio de generación, clima, etc. Constará de una etapa de diseño de arquitectura de datos, análisis y tratamiento de datos, y posteriormente el cálculo de indicadores a partir de definiciones y hojas de vida de indicadores, según normas reconocidas. Esta herramienta será útil ya que sus resultados serán fuente de información para el proceso siguiente en la ingeniería de confiabilidad, de benchmarking de indicadores y plan de acciones para realizar el mejoramiento continuo en la gestión del activo.*

*Keywords-- arquitectura de datos, Confiabilidad, diseño de software, Ingeniería de Confiabilidad, Sistemas de Generación.*

## I. INTRODUCCIÓN

La red interconectada del sistema eléctrico colombiano está conformada por más de 150 centrales de generación de diferentes tipos: generadoras hídricas, Generadoras térmicas a carbón, generadoras térmicas a gas, que entran en operación por oferta de precio o por disponibilidad en caso de restricciones operativas [2]. La capacidad efectiva neta de esta generación es de 16,594.5 MW. La composición del Sistema Eléctrico Colombiano de acuerdo con su capacidad efectiva neta, es hidráulica: 66.06%, térmica: 28.49%, menores: 4.65%, cogeneración: 0.60% y autogeneración: 0.20% [3].

El sistema eléctrico colombiano es operado por la empresa XM S.A. E.S.P., quién también administra el mercado de energía en Colombia. Dentro de las funciones de esta empresa se encuentra [4]:

- Planeación de los recursos de generación de Colombia, es decir, las plantas hidroeléctricas, térmicas y eólicas; y los recursos de transmisión de acuerdo con la demanda de energía eléctrica de cerca de 45 millones de habitantes. Esta planeación se realiza a corto, mediano y largo plazo.
- La planeación de corto plazo, comprende la recepción de las ofertas diarias que presentan los generadores en la

Bolsa de Energía, donde se asignan hora a hora las plantas que suministrarán la energía al día siguiente. XM, realiza esta selección con criterios de seguridad y economía para garantizarle a los usuarios el servicio con estándares de calidad, confiabilidad y eficiencia.

El alcance de esta última actividad, incluye la recepción de notificaciones de falla y reparaciones de unidades de generación por parte de las centrales de generación al operador del sistema XM S.A. E.S.P., con el fin de que ésta esté informada de la disponibilidad de las mismas, y así realizar la planeación de corto plazo y suplir la demanda con criterios de confiabilidad.

Esta información en tiempo real, se presenta en un esquema de notificación por evento, en el que se notifica cada evento de las unidades de generación, mediante presentación de información del cambio de estado operativo de la unidad de generación (novedad operativa), capacidad disponible al momento de la notificación e información de la falla o reparación.

Desde el punto de vista de planeación de corto plazo, esta información es fundamental ya que con ella se toman decisiones de puesta en marcha o apagada de unidades de generación.

La ventaja de disponer la información en el esquema de notificación por evento, es la facilidad para realizar análisis estadístico que permita obtener resultados de desempeño de las unidades de generación o determinar correlaciones entre variables como clima y tiempo en las tasas de falla de dichas unidades, que sería soporte para análisis de confiabilidad más elaborados y que por consiguiente respalde la toma de decisiones con unidades de generación específicas.

El procedimiento ampliamente usado para realizar estos análisis estadísticos es el empleado mediante esquemas de reporte por fallas, entendiendo éstos como conjunto de eventos que inician desde que se presenta la falla hasta el momento en que se logra la reparación y la disponibilidad de la unidad de generación. La diferencia con el esquema de notificación por evento es que mientras éste tiene información sólo del evento o novedad sucedida, el esquema de reporte por fallas contiene la información completa de la falla hasta que se logra la disponibilidad operativa de la unidad de generación.

Para el caso particular estudiado, una de las problemáticas consiste en la gestión de los datos suministrados en un esquema de notificación por evento para transformarlo a un esquema de reporte por fallas para análisis de confiabilidad, que requiere un tratamiento de los datos que puede resultar engorroso y complejo si no se cuenta con la herramienta tecnológica adecuada.

Si se tiene en cuenta que actualmente en promedio se generan 125 registros por día, que conlleva a un volumen de datos considerable, disponibles en numerosos archivos planos con un número significativo de registros, resulta importante desarrollar una herramienta tecnológica que sirva de apoyo en la consolidación y tratamiento de datos.

Este artículo presenta ConfiSoft, una herramienta desarrollada con el fin de facilitar los cálculos de los indicadores de confiabilidad.

## II. CONFISOFT: ARQUITECTURA DEL SISTEMA

El Software para Medición de Indicadores de Confiabilidad del Sistema de Generación Eléctrico Colombiano consta básicamente de tres fases, como lo muestra la Fig. 1.

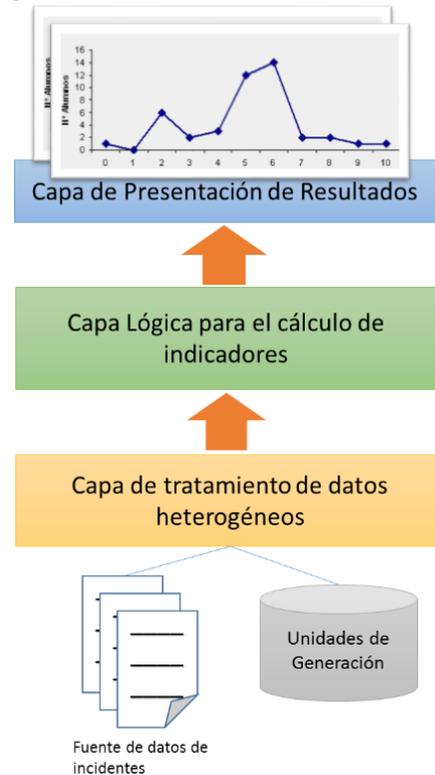


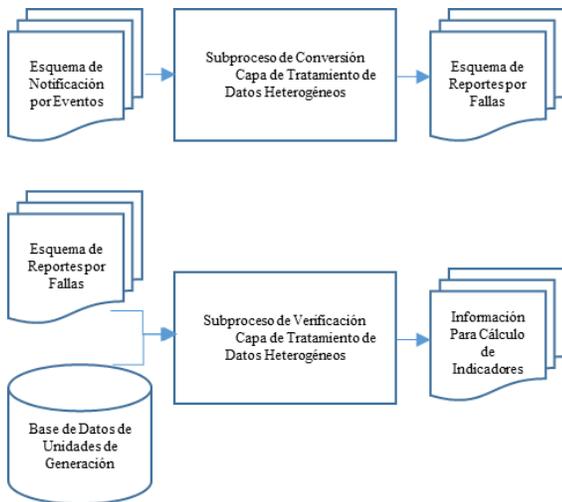
Fig. 1. Arquitectura de ConfiSoft

- **Capa de Tratamiento de Datos Heterogéneos:** que incluye la recolección de datos de reportes de las unidades de generación y el tratamiento de los mismos.
- **Capa Lógica para el Cálculo de Indicadores,** que consiste en la determinación de los indicadores de confiabilidad. Los indicadores determinados son la tasa de fallas, tiempo medio entre fallas y tiempo medio de reparación.
- **Capa de Presentación de Resultados,** con un enfoque de presentación de resultados al usuario final mediante gráficos y tablas de datos.

### A. Capa de Tratamiento de Datos Heterogéneos

En esta capa se realiza la conversión del esquema de notificación por evento al esquema de reportes por fallas, como se ilustra en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia..**

**Digital Object Identifier:** (to be inserted by LACCEI).  
**ISSN, ISBN:** (to be inserted by LACCEI).



**Fig. 2. Esquema de la Capa de Tratamiento de Datos Heterogéneos**

La fuente de información de confiabilidad y mantenimiento del sistema de generación colombiano fue el portal WEB de la empresa XM S.A. E.S.P., que muestra en tiempo real las notificaciones de cambio de estado de las unidades de generación, en un esquema de notificación por eventos.

Es de anotar que XM S.A. E.S.P., de acuerdo con los criterios de gestión de calidad de información, ha tomado medidas para garantizar la calidad de los datos obtenidos:

- Definición del objetivo de recopilación de la información en el sentido de recopilar datos relevantes para el uso previsto: reporte de disponibilidad de unidades de generación para la planeación de corto plazo.
- Investigación de la fuente de la información para revisar calidad y disponibilidad. El alcance de la información es de los equipos de generación, de eventos de confiabilidad y mantenimiento, y los impactos a las plantas asociadas.
- Definición de la información taxonómica que será incluida en la base de datos de cada unidad.
- Identificación de la fecha de instalación, períodos de operación para los equipos que serán recopilados.
- Definición de las fronteras para cada clase de equipos, indicando qué información de confiabilidad y mantenimiento será recopilada.
- Aplicación de definición uniforme de falla y los métodos de clasificación.
- Aplicación de definición de mantenimiento de fallas y los métodos de clasificación.
- Definición del nivel de detalle de la información de confiabilidad y mantenimiento reportado y recopilado.
- Preparación de un plan para el proceso de colección de información.
- Planeación para definir los criterios para consolidar y reportar los datos (incluyendo el método para transferencia de datos desde la fuente a la base de datos de confiabilidad usando métodos confiables).

## B. Capa Lógica para el cálculo de indicadores

En esta capa se calcula los indicadores de confiabilidad: tasa de fallas, tiempo medio entre fallas, tiempo medio para reparar y disponibilidad [5], [6] y [7].

### 1) Tasa de Fallas

La tasa de falla es definida como una frecuencia promedio  $\lambda$  de fallas, es decir, es la cantidad de fallas por unidad de tiempo. Un valor estimado para la tasa de fallas se determina a partir de información histórica de confiabilidad y mantenimiento, dividiendo el número de fallas observadas,  $n$ , de los ítems considerados por su tiempo acumulado de trabajo (tiempo operacional) durante el mismo período de tiempo, por medio de la ecuación (1):

$$\hat{\lambda} = \frac{n}{\sum t_{TFi}} \quad (1)$$

Donde,

$n$  es el número de fallas observadas

$t_{TFi}$  es el tiempo  $i$ -ésimo para falla (es decir, el tiempo de funcionamiento observado)

$\lambda$  es una función de tiempo y asintóticamente tiende al valor (2)

$$\frac{1}{t_{MTF}} \quad (2)$$

Donde,

$t_{MTF}$  es el tiempo medio para fallar.

En la práctica, el término  $\sum t_{TFi}$  es reemplazado por el tiempo de operación total de cada una de las unidades o equipos en observación.

### 2) Tiempo Medio entre fallas

El tiempo medio entre fallas es definido como el tiempo promedio entre dos fallas consecutivas. Este indicador es determinado por medio de la expresión (3):

$$TMEF = \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

Donde  $\lambda$  es la tasa de fallas.

### 3) Tiempo Medio para Reparar

El tiempo medio para reparar es definido como el tiempo promedio en el que un ítem o artículo es reparado. Este indicador se relaciona con la tasa de reparación (4):

$$TMPR = \frac{1}{\mu} \quad (4)$$

Donde  $\mu$  es la tasa de reparación.

En la práctica, el tiempo de reparación se determina a partir de los tiempos reportados de mantenimiento por parte de las unidades de generación.

### 4) Disponibilidad

La disponibilidad de un equipo es definida por medio de la expresión (5):

$$Disponibilidad = \frac{TMEF}{TMEF + TMPR} \times 100 \quad (5)$$

Donde TMEF es el tiempo medio entre fallas y TMPR es el tiempo medio para reparar.

### C. Capa de Presentación de Resultados

En esta etapa se muestran tablas que contienen los resultados de indicadores de confiabilidad obtenidos en la Capa de Cálculo de Indicadores y una gráfica de evolución de la tasa de falla y tasa de reparación semanales. Los resultados se muestran en la sección IV.

### III. PRUEBAS

Se realizaron los siguientes casos de pruebas para el software diseñado:

#### A. CASO 1

Número de Generadores: 1

En la TABLA. 1 se muestra la fecha de puesta en marcha de los generadores, en la TABLA. 2 se muestra la información de los eventos, en la TABLA. 3 la fecha de fin de análisis del caso, y por último, en la TABLA. 4 los resultados del caso (TMEF, TMRP y tasa de fallas).

**TABLA. 1 Fecha de Puesta en Marcha Generadores Caso 1**

Generador 1	26/01/2016
-------------	------------

**TABLA. 2 Información de Eventos Caso 1**

Generador 1	Falla	01/04/2016
Generador 1	Reparación	01/05/2016

**TABLA. 3 Fecha de Fin de Análisis Caso 1**

Generador 1	26/01/2017
-------------	------------

**TABLA. 4 Resultados Caso 1**

Variable	Valor Teórico	Resultado
TMEF, años	0.9155	0.92
TMRP, días	31	31
$\lambda$ , fallas/Millón de horas	124.72	124.05*

\* Los errores son mínimos y son causados por la hora de ejecución de la aplicación, ya que la determinación de los parámetros tiene en cuenta la hora en que se realiza la simulación.

#### B. CASO 2

Número de Generadores: 1

En la TABLA. 5 se muestra la fecha de puesta en marcha de los generadores, en la TABLA. 6 se muestra la información de los eventos, en la TABLA. 7 la fecha de fin de análisis del caso, y por último, en la TABLA. 8 los resultados del caso (TMEF, TMRP y tasa de fallas).

**TABLA. 5 Fecha de Puesta en Marcha Generadores Caso 2**

Generador 1	26/01/2016
-------------	------------

**TABLA. 6 Información de Eventos Caso 2**

Generador 1	Falla	01/04/2016
Generador 1	Reparación	01/05/2016

Generador 1	Falla	01/06/2016
Generador 1	Reparación	01/07/2016

**TABLA. 7 Fecha de Fin de Análisis Caso 2**

Generador 1	26/01/2016
-------------	------------

**TABLA. 8 Resultados Caso 2**

Variable	Valor Teórico	Resultado
TMEF, años	0.4192	0.42
TMRP, días	30	30
$\lambda$ , fallas/Millón de horas	271.58	271.52*

\* Los errores son mínimos y son causados por la hora de ejecución de la aplicación, ya que la determinación de los parámetros tiene en cuenta la hora en que se realiza la simulación.

#### C. CASO 3

Número de Generadores: 1

En la TABLA. 9 se muestra la fecha de puesta en marcha de los generadores, en la TABLA. 10 se muestra la información de los eventos, en la TABLA. 11 la fecha de fin de análisis del caso, y por último, en la TABLA. 12 los resultados del caso (TMEF, TMRP y tasa de fallas).

**TABLA. 9 Fecha de Puesta en Marcha Generadores Caso 3**

Generador 1	26/01/2016
-------------	------------

**TABLA. 10 Información de Eventos Caso 3**

Generador 1	Falla	01/04/2016
Generador 1	Reparación	01/05/2016
Generador 1	Falla	01/06/2016
Generador 1	Reparación	01/08/2016

**TABLA. 11 Fecha de Fin de Análisis Caso 3**

Generador 1	26/01/2016
-------------	------------

**TABLA. 12 Resultados Caso 3**

Variable	Valor Teórico	Resultado
TMEF, años	0.3767	0.38
TMRP, días	45.5	45.5
$\lambda$ , fallas/Millón de horas	302.20	301.98*

\* Los errores son mínimos y son causados por la hora de ejecución de la aplicación, ya que la determinación de los parámetros tiene en cuenta la hora en que se realiza la simulación.

### IV. RESULTADOS

Se presentan los resultados de los indicadores de confiabilidad del sistema de generación colombiano, para el período de tiempo transcurrido entre el 1 de junio de 2014 y el

11 de noviembre de 2016. En ese período de tiempo operaron 139 unidades de generación. Esta sección corresponde al alcance de la Capa de Presentación de Resultados.

En ese período se presentaron 15,251 eventos que implicaron modificación de la disponibilidad de equipos, 13382 de ellos para la generación hídrica y 1869 para la generación térmica. Las fallas semanales se muestran en la Fig. 3.

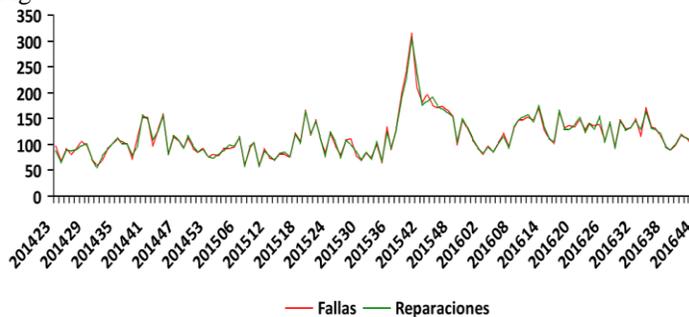


Fig. 3. Frecuencia Semanal de Fallas

El aplicativo permitirá obtener el número de fallas, el tiempo medio entre fallas, el tiempo medio de reparación y la tasa de fallas por cada modo de falla reportado, para cada una de las tecnologías de generación. Básicamente la tecnología de generación se ha considerado el combustible que se utiliza para generar la energía eléctrica.

La información de confiabilidad para cada uno de las tecnologías del parque de generación de Colombia se detalla a continuación:

Equipo: Acpm

MODO DE FALLA	FALLAS	TMEF	TMPR	TASA	Disp	No Disp	
Acpm: Otros, administrativos, paros	2	1,04	0,01	110,09	99,99844	0	
Acpm: Sistema propio de combustible	1	2,07	0,2	55,06	99,97358	0,03	
Acpm: Suministro combustible transporte o produccion	3	0,64	20,3	179,57	91,95399	8,05	
Acpm: Turbina	2	1,04	0,63	110,27	99,83304	0,17	
Gas: Generador	3	0,69	0,02	165,14	99,99074	0,01	
Acpm: Generador	2	1,04	0,57	110,25	99,84909	0,15	
Subtotal Acpm							
Cantidad Equipos:	1	13	0,15	4,89	781,17	92,14855	7,85

Fig. 4. Información de Confiabilidad Equipo ACPM

Equipo: Combustoleo

MODO DE FALLA	FALLAS	TMEF	TMPR	TASA	Disp	No Disp	
Combustoleo: Servicios auxiliares	6	0,69	0,62	165,53	99,754146	0,25	
Combustoleo: STN: Sistema de transmision nacional	1	4,15	0,11	27,52	99,992523	0,01	
Combustoleo: Mantenimiento programado	7	0,41	67,23	279,54	68,916272	31,08	
Combustoleo: Interruptores – transformadores	3	1,38	0,40	82,63	99,920694	0,08	
Combustoleo: Generador	4	1,03	0,89	110,34	99,764192	0,24	
Combustoleo: Condensador	3	1,38	0,13	82,58	99,974176	0,03	
Combustoleo: Caldera - sistema combustion	53	0,07	2,16	1.577,65	92,454269	7,55	
Combustoleo: Turbina	19	0,21	4,00	550,55	94,976424	5,02	
Subtotal Combustoleo							
Cantidad Equipos:	2	96	0,02	6,98	4.738,80	68,102325	31,90

Fig. 5. Información de Confiabilidad Equipo Combustoleo

Equipo: Dual Gas - Acpm

MODO DE FALLA	FALLAS	TMEF	TMPR	TASA	Disp	No Disp	
Acpm: Sistema propio de combustible	39	0,21	1,44	546,82	98,142155	1,86	
Gas: Caldera - sistema combustion	3	2,76	1,57	41,35	99,844782	0,16	
Gas: Suministro combustible transporte o produccion	15	0,55	0,34	206,75	99,833498	0,17	
Gas: Sistema propio de combustible	96	0,09	0,30	1.333,62	99,053716	0,95	
Gas: Servicios auxiliares	2	4,15	0,11	27,52	99,992592	0,01	
Gas: Otros, administrativos, paros	34	0,24	0,27	469,28	99,696123	0,30	
Gas: Mantenimiento programado	10	0,80	9,59	142,11	96,832755	3,17	
Gas: Interruptores – transformadores	1	8,29	2,83	13,77	99,906521	0,09	
Gas: Generador	21	0,39	0,37	289,72	99,742381	0,26	
Gas: Condensador	1	8,30	0,08	13,76	99,997340	0,00	
Acpm: Condensador	3	2,76	0,22	41,29	99,978671	0,02	
Acpm: Suministro combustible transporte o produccion	2	4,14	3,33	27,58	99,780016	0,22	
Acpm: Caldera - sistema combustion	3	2,76	0,14	41,29	99,986400	0,01	
Acpm: Turbina	17	0,49	0,45	234,52	99,748803	0,25	
Acpm: Generador	6	1,38	0,77	82,69	99,848039	0,15	
Acpm: Mantenimiento programado	2	4,12	10,47	27,71	99,308354	0,69	
Acpm: Otros, administrativos, paros	5	1,66	0,22	68,83	99,962984	0,04	
Acpm: Servicios auxiliares	4	2,07	0,24	55,06	99,968099	0,03	
Gas: Turbina	17	0,49	0,54	234,64	99,695733	0,30	
Acpm: STR: Sistema de transmision regional	1	8,30	0,04	13,76	99,998693	0,00	
Subtotal Dual Gas - Acpm							
Cantidad Equipos:	4	282	0,03	0,93	4.249,40	91,979227	8,02

Fig. 6. Información de Confiabilidad Equipo Dual Gas - Acpm

Equipo: Dual Gas - Acpm - Jet-A1

MODO DE FALLA	FALLAS	TMEF	TMPR	TASA	Disp	No Disp
Gas: Sistema propio de combustible	3	0,69	0,02	165,14	99,990643	0,01
Jet-A1: STR: Sistema de transmision regional	3	0,69	0,04	165,15	99,984680	0,02
Jet-A1: Mantenimiento programado	5	0,41	0,60	276,31	99,601589	0,40
Jet-A1: Interruptores – transformadores	2	1,04	0,06	110,10	99,984130	0,02
Jet-A1: Generador	8	0,26	0,35	441,96	99,631770	0,37
Jet-A1: Caldera - sistema combustion	3	0,69	0,03	165,14	99,989359	0,01
Gas: Turbina	9	0,23	0,14	496,18	99,838177	0,16
Gas: STR: Sistema de transmision regional	1	2,07	0,02	55,04	99,997890	0,00
Jet-A1: Turbina	11	0,19	0,15	606,79	99,780842	0,22
Acpm: Caldera - sistema combustion	1	2,07	0,01	55,04	99,998349	0,00
Gas: Mantenimiento programado	3	0,68	4,45	168,09	98,236093	1,76
Gas: Interruptores – transformadores	1	2,07	0,46	55,08	99,938812	0,06
Gas: Generador	32	0,06	0,28	1.782,65	98,804767	1,20
Gas: Caldera - sistema combustion	9	0,23	0,37	497,59	99,554712	0,45
Acpm: Turbina	2	1,04	0,07	110,10	99,981928	0,02
Acpm: Mantenimiento programado	2	1,02	5,32	111,65	98,593865	1,41
Acpm: Generador	4	0,52	0,21	220,41	99,890467	0,11
Gas: Servicios auxiliares	1	2,07	0,48	55,08	99,936610	0,06
Subtotal Dual Gas - Acpm - Jet-A1	100	0,02	0,47	5.872,09	94,084703	5,92
Cantidad Equipos:	1					

Fig. 7. Información de Confiabilidad Equipo Dual Gas - Acpm - Jet-A1

Equipo: Dual Gas - Carbón

MODO DE FALLA	FALLAS	TMEF	TMPR	TASA	Disp	No Disp
Mezcla Gas - Carbón: Interruptores – transformadores	8	0,26	0,17	441,14	99,818545	0,18
Mezcla Gas - Carbón: Mantenimiento programado	7	0,27	9,21	421,15	91,484845	8,52
Mezcla Gas - Carbón: Servicios auxiliares	3	0,69	0,50	165,45	99,802125	0,20
Mezcla Gas - Carbón: Generador	5	0,41	0,35	275,85	99,768274	0,23
Mezcla Gas - Carbón: Turbina	5	0,41	2,33	279,52	98,458645	1,54
Carbon: Mantenimiento programado	2	0,89	51,86	127,56	86,297795	13,70
Mezcla Gas - Carbón: STN: Sistema de transmision nacional	2	1,04	0,02	110,09	99,993487	0,01
Mezcla Gas - Carbón: Condensador	5	0,41	0,50	276,13	99,666997	0,33
Carbon: Suministro combustible transporte o produccion	1	2,07	1,04	55,12	99,862304	0,14
Carbon: Interruptores – transformadores	2	1,03	1,08	110,40	99,715525	0,28
Carbon: Generador	1	2,07	0,03	55,04	99,996422	0,00
Carbon: Caldera - sistema combustion	45	0,04	2,36	2.880,61	85,984515	14,02
Mezcla Gas - Carbón: Caldera - sistema combustion	145	0,01	2,80	17.190,31	46,427693	53,57
Subtotal Dual Gas - Carbón	231	0,00	3,04	174.719,63	50,038969	49,96
Cantidad Equipos:	2					

Fig. 8. Información de Confiabilidad Equipo Dual Gas - Carbón

Equipo: Dual Gas - Combustoleo

MODO DE FALLA	FALLAS	TMEF	TMPR	TASA	Disp	No Disp
Combustoleo: Interruptores – transformadores	1	2,07	0,46	55,08	99,938720	0,06
Combustoleo: Caldera - sistema combustion	27	0,07	1,90	1.594,31	93,214535	6,79
Combustoleo: Condensador	7	0,29	1,10	389,26	98,981084	1,02
Combustoleo: Mantenimiento programado	4	0,38	51,10	301,60	73,000422	27,00
Combustoleo: Servicios auxiliares	3	0,69	0,57	165,50	99,776071	0,22
Combustoleo: STN: Sistema de transmision nacional	1	2,07	0,25	55,06	99,966608	0,03
Combustoleo: Turbina	9	0,23	1,96	507,22	97,665034	2,33
Gas: Caldera - sistema combustion	2	1,04	0,11	110,11	99,972204	0,03
Combustoleo: Generador	1	2,07	0,13	55,05	99,982937	0,02
Subtotal Dual Gas - Combustoleo	55	0,02	5,16	4.843,87	71,873658	28,13
Cantidad Equipos:	1					

Fig. 9. Información de Confiabilidad Equipo Dual Gas - Combustoleo

Equipo: Dual Gas - Mezcla Gas y Fuel Oil - Acpm

MODO DE FALLA	FALLAS	TMEF	TMPR	TASA	Disp	No Disp
Mezcla Gas-Fuel Oil (ACPM o Combustoleo): Caldera - sistema combustion	4	1,04	0,40	110,20	99,894549	0,11
Mezcla Gas-Fuel Oil (ACPM o Combustoleo): Turbina	1	4,14	4,43	27,60	99,707499	0,29
Mezcla Gas-Fuel Oil (ACPM o Combustoleo): STN: Sistema de transmision nacional	1	4,15	0,37	27,53	99,975461	0,02
Mezcla Gas-Fuel Oil (ACPM o Combustoleo): Generador	1	4,15	0,15	27,52	99,989909	0,01
Gas: Turbina	14	0,29	1,32	390,07	98,776007	1,22
Gas: Suministro combustible transporte o produccion	2	2,07	0,10	55,05	99,986377	0,01
Gas: Sistema propio de combustible	1	4,15	0,62	27,53	99,959177	0,04
Gas: Servicios auxiliares	1	4,15	0,36	27,53	99,975919	0,02
Gas: Interruptores – transformadores	2	2,07	0,19	55,06	99,974497	0,03
Gas: Generador	4	1,04	0,49	110,23	99,870101	0,13
Gas: Condensador	1	4,15	0,10	27,52	99,993257	0,01
Gas: Caldera - sistema combustion	14	0,29	0,52	387,15	99,520998	0,48
Acpm: Caldera - sistema combustion	3	1,38	1,33	82,78	99,736304	0,26
Acpm: Turbina	1	4,15	0,77	27,53	99,948995	0,05
Acpm: Sistema propio de combustible	1	4,15	0,25	27,53	99,983212	0,02
Acpm: Mantenimiento programado	1	4,11	13,40	27,77	99,114881	0,89
Gas: Mantenimiento programado	6	0,68	4,52	168,14	98,209352	1,79
Mezcla Gas-Fuel Oil (ACPM o Combustoleo): Servicios auxiliares	2	2,07	1,79	55,17	99,763366	0,24
Subtotal Dual Gas - Mezcla Gas y Fuel Oil - Acpm	60	0,07	1,42	1.749,58	94,663138	5,34
Cantidad Equipos:	2					

Fig. 10. Información de Confiabilidad Equipo Dual Gas - Mezcla Gas y Fuel Oil - Acpm

Equipo: Dual Gas - Mezcla Gas y Fuel Oil - Acpm - Combustoleo

MODO DE FALLA	FALLAS	TMEF	TMPR	TASA	Disp	No Disp
Gas: Mantenimiento programado	2	2,07	3,00	55,26	99,603699	0,40
Mezcla Gas-Fuel Oil (ACPM o Combustoleo): Turbina	20	0,21	0,84	556,59	98,890678	1,11
Mezcla Gas-Fuel Oil (ACPM o Combustoleo): Suministro combustible transporte o produccion	2	2,07	0,84	55,10	99,888632	0,11
Mezcla Gas-Fuel Oil (ACPM o Combustoleo): Sistema propio de combustible	3	1,38	0,85	82,70	99,831297	0,17
Mezcla Gas-Fuel Oil (ACPM o Combustoleo): Interruptores – transformadores	2	2,07	0,33	55,07	99,955967	0,04
Mezcla Gas-Fuel Oil (ACPM o Combustoleo): Generador	15	0,28	0,41	414,51	99,589892	0,41
Mezcla Gas-Fuel Oil (ACPM o Combustoleo): Caldera - sistema combustion	26	0,16	1,50	734,46	97,424822	2,58
Gas: Generador	6	0,69	0,17	165,23	99,933766	0,07
Gas: Caldera - sistema combustion	5	0,83	0,40	137,79	99,869046	0,13
Mezcla Gas-Fuel Oil (ACPM o Combustoleo): Condensador	4	1,03	1,11	110,41	99,705526	0,29
Subtotal Dual Gas - Mezcla Gas y Fuel Oil - Acpm - Combustoleo	85	0,05	0,95	2.470,37	94,935220	5,06
Cantidad Equipos:	2					

Fig. 11. Información de Confiabilidad Equipo Dual Gas - Mezcla Gas y Fuel Oil - Acpm - Combustoleo

Equipo: Generación Carbon

MODO DE FALLA	FALLAS	TMEF	TMPR	TASA	Disp	No Disp
Carbon: Sistema propio de combustible	5	4,56	0,67	25,03	99,959819	0,04
Carbon: Turbina	58	0,39	2,66	295,70	98,146750	1,85
Carbon: Suministro combustible transporte o produccion	3	7,60	0,19	15,01	99,993095	0,01
Carbon: Caldera - sistema combustion	379	0,06	1,27	2.012,86	94,216179	5,78
Carbon: STR: Sistema de transmision regional	3	7,60	0,02	15,01	99,999233	0,00
Carbon: STN: Sistema de transmision nacional	1	22,81	0,01	5,00	99,999908	0,00
Carbon: Otros no controlables (sabatajes)	1	22,81	0,07	5,00	99,999116	0,00
Carbon: Mantenimiento programado	31	0,62	43,87	185,40	83,666695	16,33
Carbon: Interruptores – transformadores	22	1,04	0,46	110,22	99,879692	0,12
Carbon: Condensador	33	0,69	0,96	165,75	99,620670	0,38
Carbon: Generador	47	0,48	2,76	238,91	98,439414	1,56
Carbon: Servicios auxiliares	8	2,85	2,41	40,12	99,768924	0,23
Subtotal Generación Carbon	591	0,03	3,71	4.013,12	78,802017	21,20
Cantidad Equipos:	11					

Fig. 12. Información de Confiabilidad Equipo Generación Carbón

Equipo: Generación Gas

MODO DE FALLA	FALLAS	TMEF	TMPR	TASA	Disp	No Disp	
Gas: Suministro combustible transporte o producción	57	0,18	0,38	631,12	99,422483	0,58	
Gas: Turbina	52	0,19	3,01	597,11	95,867404	4,13	
Gas: STR: Sistema de transmisión regional	18	0,58	0,03	198,18	99,984276	0,02	
Gas: Sistema propio de combustible	29	0,36	0,16	319,62	99,880963	0,12	
Gas: Servicios auxiliares	5	2,07	0,09	55,05	99,987542	0,01	
Gas: Otros, administrativos, paros	4	2,59	0,41	44,05	99,957031	0,04	
Gas: Mantenimiento programado	19	0,54	2,47	211,79	98,758898	1,24	
Gas: Interruptores – transformadores	2	5,18	0,21	22,02	99,988771	0,01	
Gas: Generador	169	0,06	0,53	1.905,71	97,622908	2,38	
Gas: RAG: rechazo automatico de generación	1	10,37	0,03	11,01	99,999303	0,00	
<b>Subtotal Generación Gas</b>							
Cantidad Equipos:	5	356	0,03	0,91	4.284,46	92,077798	7,92

Fig. 13. Información de Confiabilidad Equipo Generación Gas

Equipo: Hidroeléctrica

MODO DE FALLA	FALLAS	TMEF	TMPR	TASA	Disp	No Disp	
Agua: Generador	1183	0,19	1,33	614,74	98,075264	1,92	
Agua: STR: Sistema de transmisión regional	137	1,63	0,04	69,83	99,993527	0,01	
Agua: STN: Sistema de transmisión nacional	59	3,79	0,58	30,08	99,958407	0,04	
Agua: Servicios auxiliares	273	0,82	0,10	139,18	99,966746	0,03	
Agua: Río	2547	0,09	0,59	1.322,56	98,148483	1,85	
Agua: RAG: rechazo automatico de generación	3	74,66	0,01	1,53	99,999952	0,00	
Agua: Otros, administrativos, paros	45	4,97	1,13	22,95	99,937922	0,06	
Agua: Otros no controlables (sabotajes)	2	111,98	4,40	1,02	99,989231	0,01	
Agua: Conducciones	142	1,58	0,67	72,45	99,883234	0,12	
Agua: Interruptores – transformadores	300	0,75	0,56	153,21	99,795847	0,20	
Agua: Evento de generación en otra unidad de la planta	12	18,66	0,53	6,12	99,992205	0,01	
Agua: Embalse	6921	0,03	1,03	3.864,10	91,282940	8,72	
Agua: Turbina	631	0,35	0,43	322,65	99,671939	0,33	
Agua: Mantenimiento programado	1127	0,18	5,06	617,46	93,020942	6,98	
<b>Subtotal Hidroeléctrica</b>							
Cantidad Equipos:	108	13382	0,01	1,24	8.555,42	82,931428	17,07

Fig. 14. Información de Confiabilidad Equipo Hidroeléctrica

Nota: Los resultados presentados se basan en la muestra de datos tomados desde el 1 de junio de 2014 a 11 de noviembre de 2016.

Con base en los resultados obtenidos, se puede concluir que la herramienta permite determinar para cada tipo de equipo de generación y cada uno de los modos de falla establecidos para dichos equipos, los siguientes parámetros:

- Cantidad de fallas.
- Tiempo medio entre fallas.
- Tiempo medio para reparar.
- Tasa de fallas.
- Disponibilidad de equipo.

Como se puede observar desde la Fig. 4 hasta la Fig. 14, los parámetros anteriores se determinan para cada uno de los modos de falla de cada tipo de equipo de generación y se complementa con los parámetros globales calculados para cada tipo de equipo (al final de la tabla en fondo color gris).

Por ejemplo en la Fig. 14, se muestra que para la generación hidroeléctrica, se reportaron 13,382 fallas, correspondiente a 108 unidades de generación, de las cuales 6,941 fueron reportadas para el modo de falla de embalse, para un tiempo medio entre fallas de 0.03 años y 1.05 días para reparar. La tasa de fallas para este modo de falla es de

3,864.10 fallas/millón de horas, y una disponibilidad de la generación por este modo de falla de 91.28%. Lo anterior es la información para el modo de falla Embalse, los parámetros globales serían: tiempo medio entre fallas de 0.01 años y 1.24 días para reparar, tasa de fallas de 8555.42 fallas/millón de horas, y una disponibilidad total de la generación hidroeléctrica de 82.93%.

Como trabajo futuro se continuará con la determinación de los indicadores de confiabilidad de la generación, considerando la información de fallas en un mayor período de tiempo, complementando con análisis:

- Benchmarking de la generación de energía eléctrica en Colombia en comparación con estándares internacionales.
- Comportamiento de la confiabilidad de la generación teniendo en cuenta fenómenos ambientales como Fenómenos de El Niño y Fenómeno de La Niña en Colombia.
- Predicción de la Confiabilidad de la Generación de Energía Eléctrica en Colombia en el corto, mediano y largo plazo.
- Predicción de la Confiabilidad de la Generación de Energía Eléctrica en Colombia en Fenómenos Climáticos Adversos.
- Recomendaciones en la Planeación de la Generación en el Mediano y Largo Plazo Basado en la Confiabilidad de la Generación de Energía Eléctrica.

## V. REFERENCIAS

D. Elmakias, *New Computational Methods in Power System Reliability*, vol. 111, Springer Science & Business Media, 2008, p. 404.

XM S.A. E.S.P., «Informe de Operación del Sistema y Administración del Mercado Eléctrico Colombiano,» 2009.

XM S.A. E.S.P., «Informe de Oferta y Generación,» [3] 2016.

XM S.A. E.S.P., «Portafolio de Servicios. Operación del SIN y Administración del Mercado,» [En línea]. Available: <http://www.xm.com.co/Pages/OperaciondelSINyAdministraciondelMercado.aspx>. [Último acceso: 28 Enero 2017].

D. J. Smith, *Reliability Maintainability and Risk. Practical Methods for Engineers*, Eighth ed., Butterworth-Heinemann, 2011.

ISO 2006, *ISO 14224:2006 Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries — Collection and Exchange of Reliability and Maintenance Data for Equipment*, Second ed., 2006.

ISO 2008, *ISO 20815:2008 Petroleum, Petrochemical and Natural Gas Industries — Production Assurance and Reliability Management*, First ed., 2008.