Ingeniería Energética
ISSN: 1815-5901
Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría.Cujae

Filgueiras Sainz de Rozas, Miriam Lourdes; Martín Fernández, Roberto-Manuel; Curbelo Colina, Abel; Santos Fuentefría, Ariel; López Prado, Olga B.; Rivero Oliva, José de Jesús

El Análisis Probabilista de Seguridad para la evaluación de la confiabilidad en sistemas técnicos complejos

Ingeniería Energética, vol. XL, núm. 3, 2019, pp. 203-211
Instituto Superior Politécnico José A. Echeverría.Cujae

Ingeniería Energética, 2019, vol. 40, n. 3, septiembre/diciembre, p. 203-211
Centro de Investigación y Pruebas Electroenergéticas, Facultad de Ingeniería Eléctrica,
Universidad Tecnológica de La Habana, José Antonio Echeverría, Cujae
ISSN 1815-5901 RNPS- 1958

TRABAJO TEÓRICO-EXPERIMENTAL

El Análisis Probabilista de Seguridad para la evaluación de la confiabilidad en sistemas técnicos complejos

The Probabilistic Safety Analysis to the complex technical systems reliability evaluation

Miriam Lourdes-Filgueiras Sainz de Rozas[1], **Roberto-Manuel Martín Fernández,** [2]**Abel-Curbelo Colina**[1], **Ariel Santos Fuentefría**[1], **Olga B. López Prado**[1], **José de Jesús Rivero Oliva**[3]

[1] Universidad Tecnológica de La Habana José A. Echeverría Cujae. Cuba
[2] Dirección de Infraestructura y Vivienda del Ministerio del Interior(MININT). Cuba
[3] Escuela Politécnica. Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ). Brasil
E-mail: miriaml@electrica.cujae.edu.cu

Recibido: febrero de 2019 Aprobado: mayo de 2019

RESUMEN/*ABSTRACT*
Con el desarrollo tecnológico alcanzado, los sistemas técnicos son cada vez más sofisticados y complejos; por tanto, la confiabilidad, la disponibilidad y la mantenibilidad de estos sistemas constituyen herramientas imprescindibles para asegurar el confort de la vida cotidiana, totalmente dependiente de estos sistemas. Este artículo tiene como objetivo exponer la aplicación del Análisis Probabilista de Seguridad, empleando el software docente CSolv, en dos sistemas técnicos complejos, como casos de estudio: un grupo electrógeno STEMAC y en un subsistema de transmisión del sistema electroenergético, ubicado en la región occidental del país, como una aproximación a la evaluación de la confiabilidad en sistemas tecnológicos complejos. Como principal resultado, se obtuvieron los conjuntos mínimos de fallo del grupo electrógeno, y del subsistema de transmisión. En el primer caso se propone un programa para la mejora en la gestión del mantenimiento, demostrándose su importancia en la confiabilidad de estos sistemas.
Palabras clave: Confiabilidad; CSolv; Mantenimiento.

Actually, with the technological development achieved, the technical systems are increasingly sophisticated and complex. Therefore, the reliability, availability and maintainability of these systems are essential tools to ensure the comfort of everyday life, which is totally dependent on these systems.The objective of this paper is to expose the application of the Probabilistic Safety Analysis, using the CSolv teaching software, in two complex technical systems, as case studies: a STEMAC generator and a transmission subsystem of the electrical system, located in the western region of the country, as an approach to the evaluation of reliability in complex technological systems. As the main result, the minimum sets of failure of the generator set, and of the transmission subsystem were obtained. In the first case, a program for improvement the maintenance management is proposed, demonstrating its importance in the reliability of these systems.
Key words: *CSolv; Maintenance; Reliability.*

INTRODUCCIÓN

El entorno impone, cada vez más, que los sistemas tecnológicos se desarrollen preservando la naturaleza y el medio ambiente para las generaciones futuras, asegurando así el desarrollo sostenible. Por ello, una condición indispensable para las organizaciones es la producción de bienes y servicios de calidad y a bajo costo; pero además con seguridad y preservando el medio ambiente. Por otra parte, la notable evolución y complejidad de determinados sistemas industriales, exige la utilización de un conjunto de criterios para determinar su funcionamiento, conocidos como RAMSE (reliability, availability, maintainability, safety, environment). El suministro eléctrico se garantiza por medio de un sistema tecnológico complejo y también se evalúa su desempeño por medio de estos criterios.

La confiabilidad a nivel internacional se ha generalizado a todo tipo de industria, como criterio de desempeño, razón por la cual, resulta un tema de actualidad y pertinencia para las investigaciones referidas a estos sistemas, asociada a la calidad, la seguridad y la preservación del medio ambiente, del servicio y la producción. Los estudios de confiabilidad tienen su origen en la necesidad de reducir la incertidumbre de fallo en un sistema; el evento que más afecta a un consumidor como el fallo pronto y repentino de un componente que afecta el suministro eléctrico. En la industria, un fallo de algún sistema provoca, en el mejor de los casos, pérdida de imagen y competitividad, pero también ha provocado accidentes grandes y con graves consecuencias. En la actualidad, los productos y sistemas son cada vez más complejos, así mismo un mercado cada vez más competitivo exige productos y sistemas con menor índice de fallo; en otras palabras, se desea que los sistemas y productos sean altamente confiables. Se realizan estudios de confiabilidad con la finalidad de cumplir con la legislación en materia de riesgo potencial que un sistema industrial puede causar; pero, también enfocados a la calidad y competitividad en el desempeño de las organizaciones. De ahí que el mejoramiento de la confiabilidad operacional de cualquier instalación o de sus sistemas y componentes esté asociado con cuatro aspectos fundamentales: confiabilidad humana, mantenibilidad, confiabilidad funcional de sistemas y equipos y la confiabilidad de los procesos y funciones [1], representado en la figura 1.

Fig. 1. Aspectos de la confiabilidad operacional. Fuente: [1]

La calidad de la energía eléctrica se cuantifica a través de un grupo de parámetros relacionados con indicadores como: la confiabilidad, el contenido de armónicos de las formas de onda de tensión y de corriente, y las variaciones de frecuencia. Los índices de confiabilidad de los SEP se han establecido con el fin de cuantificar los eventos relacionados con estos sistemas, tanto para su operación en estado estable como en fallo, debido a las pérdidas económicas y afectaciones a los clientes que provoca este último. Estos índices consideran el registro de eventos pasados y la predicción de la confiabilidad en el futuro. Las empresas de servicio eléctrico normalmente llevan un registro estadístico de los eventos pasados, con los cuales pueden evaluar el desempeño de sus sistemas a partir de indicadores como, el de energía no suministrada. Además, los grupos electrógenos (GE) requieren la evaluación de su confiabilidad, pues están ampliamente difundidos con la función de proveer energía de reserva, suplementaria o de emergencia, para una amplia diversidad de sectores como la industria, los centros deportivos, los hospitales, entre otros. También se utilizan en comunidades que por su lejanía y difícil acceso no se encuentran conectadas al Sistema Electroenergético Nacional (SEN), y por tanto aseguran el respaldo al SEN.

Por tanto, la confiabilidad en el suministro continuo de la energía eléctrica es una condición básica para el desarrollo de la sociedad moderna. Y Cuba, para avanzar hacia una sociedad socialista, próspera y sostenible, está enfrascada en la actualización de su Modelo Económico; en el proyecto de Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta 2030: Propuesta de Visión de la Nación, Ejes y Sectores Estratégicos se plantea como objetivo del eje estratégico infraestructura: "Garantizar un suministro energético confiable, diversificado, moderno, a precios competitivos y en condiciones de sostenibilidad ambiental, aumentando sustancialmente el porcentaje de participación de las fuentes renovables de energía en la matriz energética nacional, esencialmente de la biomasa, eólica y fotovoltaica" [2]. Por lo que hoy en día, en Cuba, se realizan esfuerzos para incluir los estudios de evaluación de la confiabilidad en la operación y planificación del sistema de potencia, pero la carencia de cultura sobre las potencialidades de estos, condiciona que se hayan realizado pocos estudios relacionados con la confiabilidad. De ahí que el objetivo del presente trabajo sea: exponer la aplicación del Análisis Probabilista de Seguridad, empleando el software docente CSolv, en dos sistemas técnicos complejos, como casos de estudio: un grupo electrógeno STEMAC de respaldo al suministro eléctrico y en un subsistema de transmisión del SEN, ubicado en la región occidental del país, como una aproximación a la evaluación de la confiabilidad en sistemas tecnológicos complejos.

La confiabilidad y el riesgo

El concepto de riesgo asociado a una instalación o un proceso se define en la literatura de diversas maneras, pero en todos los casos se toman en cuenta los siguientes factores: el daño que se puede producir derivado del funcionamiento inadecuado de la instalación o proceso, y la probabilidad (o frecuencia, si se fija una referencia temporal) de que se produzca dicho daño. El hecho de cuantificar el riesgo permite establecer un criterio de aceptabilidad, y poner un valor límite al mismo, por debajo del cual una instalación o un proceso se considera aceptablemente seguro. Esto significa que aquellas situaciones o escenarios, cuyo daño sea muy grave, deben tener una probabilidad muy baja, a fin de que el riesgo sea aceptable, mientras que en el caso de sucesos cuyo daño sea leve se puede aceptar una probabilidad mayor. Los estudios de confiabilidad ayudan a clasificar de una manera sistemática y completa todos los aspectos que implican un riesgo para la población, las instalaciones de una planta, un sistema tecnológico, los trabajadores y el medio ambiente. El analizar los riesgos permite estimar de antemano la probabilidad de una eventualidad, así como la gravedad de sus consecuencias y mediante el estudio de las posibles causas se pueden prevenir o minimizar las consecuencias. La confiabilidad es la probabilidad de que un sistema o equipo no falle, es decir, que cumpla sus funciones satisfactoriamente dentro de los límites de desempeño establecidos, en una determinada etapa de su vida útil y para un tiempo de operación estipulado, teniendo como condición que el sistema o equipo se utilice para el fin y con la carga que fue diseñado. A mayor confiabilidad menor riesgo de que el sistema o equipo falle.Los criterios utilizados para la evaluación de la confiabilidad en las instalaciones industriales son clasificados como deterministas o como probabilísticos. Los criterios deterministas se utilizan a la hora de proyectar una instalación eléctrica, mientras que los probabilistas se utilizan con el objetivo de optimizar la instalación [3]. Los primeros proporcionan un análisis de confiabilidad con información sobre cómo puede suceder un fallo en el sistema o cómo se puede lograr el éxito en este. La hipótesis subyacente en estos criterios es que, si las funciones del sistema están protegidas para la situación más severa, lo mismo es cierto para todos los otros casos más favorables [4].

Estos criterios no incluyen una evaluación clara de la confiabilidad del sistema, sino que establecen exigencias aceptadas de diseño que satisfacen requerimientos deseables de confiabilidad prácticos de acuerdo al suministrador-consumidor y no incorporan la naturaleza probabilística o estocástica del comportamiento del sistema y fallos de componentes. Estos enfoques, por lo tanto, podrían ser inadecuados, y no deben utilizarse para la comparación de las configuraciones de equipos alternativos, y la realización de los análisis económicos. De ahí que en este trabajo se utilice el enfoque probabilista. Los criterios probabilísticos por otra parte, pueden responder a factores más significativos que afectan la confiabilidad de un sistema. Estos proporcionan índices cuantitativos que se pueden utilizar para decidir si el rendimiento del sistema es aceptable o si se necesitan hacer cambios. En los últimos años, la mayoría de los trabajos publicados sobre la evaluación de la confiabilidad de los sistemas de ingeniería se basan en enfoques probabilísticos, en vez de enfoques deterministas. Sin embargo, existe una considerable resistencia al uso de técnicas probabilísticas en muchas áreas, debido a la dificultad en la interpretación de los índices numéricos resultantes. Aunque los criterios deterministas no consideran el comportamiento estocástico (probabilístico) de los componentes del sistema, son más fáciles para los planificadores de sistemas, diseñadores y operadores de entender que un índice de riesgo numérico determinado utilizando técnicas probabilísticas [5]. No obstante, los métodos probabilístico cualitativos de evaluación de la confiabilidad y la seguridad, han probado ser una herramienta útil para la toma de decisiones, bajo situaciones de escasa disponibilidad de datos, como la matriz de riesgo y los estudios HAZOP. Sin embargo, suelen presentar insuficiencias en el rigor y cierta subjetividad; esto los hace menos atractivos que sus similares de naturaleza cuantitativa. Además, al no depender de datos estadísticos para obtener resultados fidedignos, su grado de detalle y facilidades descriptivas, les proveen su fortaleza principal, aunque queda sin resolver el problema de sus debilidades respecto al modelado de las dependencias, aspecto clave en la fortaleza de los métodos cuantitativos, como el Análisis Probabilista de Seguridad (APS) [6].

Mediante el Análisis Probabilista de Seguridad (APS) se identifican las alteraciones o errores (denominadas sucesos iniciadores) que, de no ser interceptados por los sistemas de seguridad (denominados barreras), conducirían al daño, es decir, aquellos sucesos que pueden ocurrir de forma creíble y que potencialmente conducen a una consecuencia indeseada. Así mismo se identifican las barreras que se interponen a la evolución del suceso iniciador hacia un accidente [7]. Estas barreras pueden consistir en sistemas de seguridad como acciones y procedimientos, y se analizan mediante técnicas de álgebra booleana, cuantificando su probabilidad de fallo a partir de fallos más sencillos. Una consecuencia indeseada se puede producir a pesar del éxito de una barrera cuyo efecto sea sólo mitigar, aunque si la barrera actúa correctamente las consecuencias serán menores. La evolución que se deriva de un suceso iniciador y del posible fallo de las barreras se denomina ‘secuencia accidental’. Cada una de estas secuencias conlleva un valor de riesgo, el cual se obtendrá multiplicando la frecuencia del suceso iniciador por la probabilidad de fallo de las barreras de la secuencia accidental. El riesgo total de la instalación se estima sumando los riesgos de todas las secuencias[7]. El esquema básico con las etapas del APS se muestra en la figura 2.

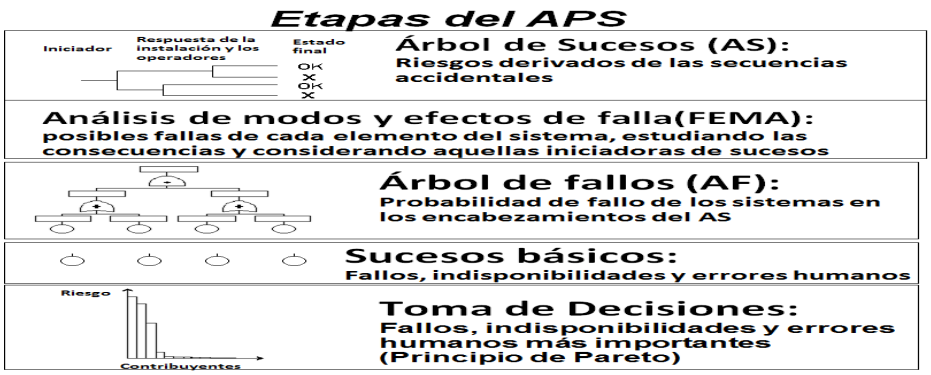

Fig. 2. Esquema básico con las etapas del APS. Fuente: [8].

El análisis de árbol de fallos es uno de los métodos de más amplio uso en el análisis de confiabilidad y es parte consustancial del APS. Constituye un procedimiento deductivo para determinar las diversas combinaciones de fallos a nivel componente que pueden desencadenar eventos no deseados especificados al inicio del análisis. Los árboles de fallo también son usados para calcular la probabilidad de que ocurrencia del evento en estudio a partir de la probabilidad de ocurrencia de los fallos de los componentes. Para un sistema dado, se pueden hacer tantos análisis como eventos no deseados se deseen estudiar [8]. Los árboles de fallo pueden ser realizados desde etapas tempranas del diseño, para luego ser actualizados en función del mayor conocimiento que se tenga del sistema. Luego de la puesta en marcha del sistema, los árboles también son utilizados para identificar las causas raíces de los fallos. En la construcción del árbol, el fallo a estudiar se denomina el evento principal. Otros eventos de fallo que puedan contribuir a la ocurrencia del evento principal son identificados y ligados al mismo a través de funciones lógicas. Los árboles terminan en eventos básicos (no abre, no inicia,...). Una vez que la estructura del árbol ha sido construida, el análisis subsiguiente toma dos formas. El análisis cualitativo reduce el árbol hasta obtener un conjunto mínimo de modos de fallo para el árbol; para realizarlo se utiliza álgebra booleana. El análisis cuantitativo del árbol de fallo consiste en calcular la probabilidad de ocurrencia del evento principal a partir de la probabilidad de ocurrencia de los eventos básicos en un cierto intervalo de tiempo. Cuando la cantidad de eventos básicos es mayor a 100 aproximadamente, el análisis cuantitativo debe realizarse apoyándose en software [9].

MATERIALES Y MÉTODOS

En el trabajo se llevaron a cabo todas las tareas o etapas que tradicionalmente se requieren en los APS. Así el primer paso consistió en definir el daño o evento no deseado que se desea evitar. El siguiente paso fue analizar el sistema y sus componentes, identificar los modos y efectos de fallo, así como los errores humanos, la frecuencia anual de los mismos y las secuencias desencadenadas por cada uno. Posteriormente, se modelaron dichas secuencias por medio de la construcción del árbol de fallo para cada caso, se determinándose la probabilidad (o frecuencia anual) con que podría ocurrir dicho daño y a continuación se determinaron los conjuntos mínimos de fallo para cada caso. Los casos objeto de estudio fueron: un grupo electrógeno STEMAC y un SEP de la región occidental del país. En la determinación de los conjuntos mínimos de fallos, que lo producen, el análisis de sensibilidad y el de importancia para determinar los elementos más significativos desde el punto de vista de la seguridad, se utilizó el software CSolv, desarrollado por el Dr. José de Jesús Rivero y finalmente se hicieron recomendaciones para mejorar la confiabilidad de esta instalación, sobre la base de la evaluación de su confiabilidad. El programa CSolv permite de manera general: calcular la probabilidad de fallo de un evento indeseado, calcular los cortes mínimos más importantes, calcular las medidas de importancia de los componentes, realizar el análisis de sensibilidad, calcular la indisponibilidad instantánea y realizar el análisis de incertidumbre. Otras características más específicas con las que cuenta son que: permite evaluar hasta 10 000 CM y puede trabajar con CM hasta de orden 15; la posibilidad de evaluar los CM como sucesos raros o como sucesos independientes; Una página donde se calcula a partir de la introducción de los datos de los componentes del subsistema objeto de estudio, la probabilidad de fallo de cada componente; otra página donde se especifica para el programa a partir de determinadas reglas, la lógica del árbol de fallos y, finalmente, el análisis de Pareto de la medida de reducción de riesgo de los componentes [3].

RESULTADOS

Se determinaron los árboles de fallo, los conjuntos mínimos de fallo y para los dos sistemas estudiados, en las figuras 3 a la 10. Se realiza, también, un análisis de sensibilidad donde se analiza el comportamiento de la probabilidad de fallo del sistema frente a la probabilidad o frecuencia de fallo del suceso más crítico según el análisis de importancia realizado anteriormente. Se realiza este análisis para una probabilidad de ocurrencia del evento del 95 %, 75 %, 50 %, 25 % y 0 %, obteniéndose para cada probabilidad de ocurrencia una función lineal monótona creciente donde a medida que aumenta la probabilidad o la frecuencia del fallo analizado aumenta la probabilidad de fallo del grupo electrógeno o del SEP estudiados. (En las figuras 6 y 10, respectivamente).

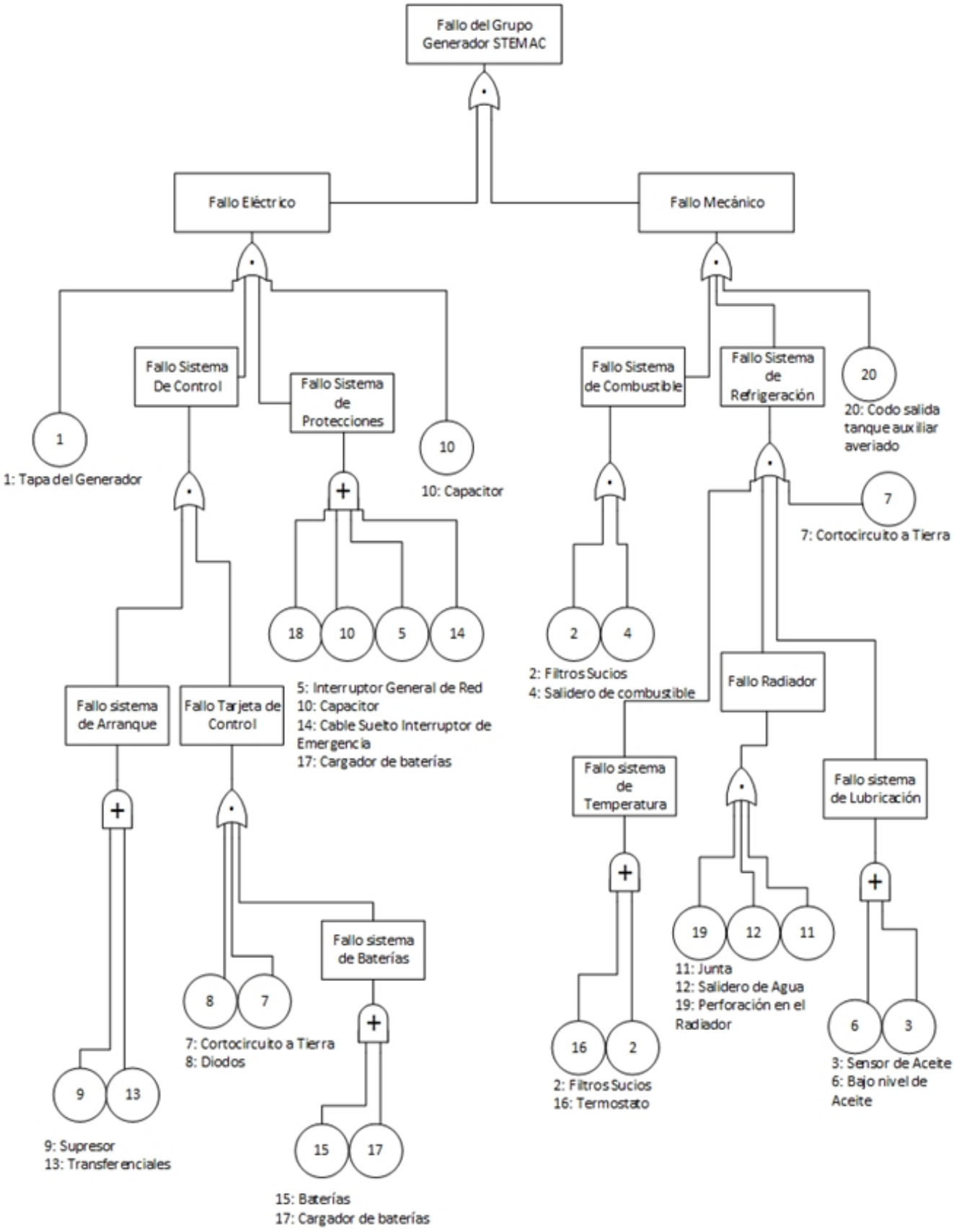

Fig. 3. Árbol de fallos del grupo electrógeno STEMAC con los datos aportados por los reportes de fallos. Fuente: [10].

0:00:04	100%				Calcular			Códigos	Números		Prof. José de Jesús Rivero Oliva	
No.	Prob.	Pr. Acum.	%	% Acum.	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	
1	8,94E-02	8,94E-02	43,04	43,04	8H							
2	3,61E-02	1,26E-01	17,36	60,40	4T							
3	1,82E-02	1,44E-01	8,77	69,16	20T							
4	1,80E-02	1,62E-01	8,68	77,84	1T							
5	1,80E-02	1,80E-01	8,68	86,52	7G							
6	1,79E-02	1,98E-01	8,61	95,13	10H							
7	1,79E-02	2,08E-01	8,61	100,00	2Q							
8	8,79E-03	2,08E-01	4,23	100,00	15F	17F						
9	1,30E-03	2,08E-01	0,63	100,00	9F	13Q						
10	1,29E-03	2,08E-01	0,62	100,00	3F	6T						
11	2,16E-04	2,08E-01	0,10	100,00	11T	12T	19F					
12	2,16E-07	2,08E-01	0,00	100,00	5F	9F	14I	18F				

Fig. 4. Tabla con los conjuntos mínimos de fallo para el grupo electrógeno STEMAC tomada del CSolv. Fuente: [10].

Orden	Cantidad	Probabilidad / Frecuencia
1	7	1,99E-01
2	3	1,14E-02
3	1	2,16E-04
4	1	2,16E-07
5	0	0
6	0	0
7	0	0
8	0	0
9	0	0
10	0	0
11	0	0
12	0	0
13	0	0
14	0	0
15	0	0
Total	12	2,08E-01

Fig. 5. Resumen de los conjuntos mínimos de fallos y las probabilidades de ocurrencia de estos con CSolv. Fuente: [10].

No	Descripción	Código	Indisponibilidad / Probabilidad de fallo	FV	RRW	RRWacum	%	%Acum	RAW
8	Problemas en los diodos	8H	8,94E-02	4,30E-01	8,94E-02	8,94E-02	37,42	37,42	7,92E-01
4	Salidero de combustible	4T	3,61E-02	1,74E-01	3,61E-02	1,26E-01	15,10	52,52	7,92E-01
20	Codo salida tanque auxiliar averiado	20T	1,82E-02	8,77E-02	1,82E-02	1,44E-01	7,62	60,14	7,92E-01
1	Tapa del generador	1T	1,80E-02	8,68E-02	1,80E-02	1,62E-01	7,55	67,69	7,92E-01
7	Cortocircuito a tierra	7G	1,80E-02	8,68E-02	1,80E-02	1,80E-01	7,55	75,24	7,92E-01
2	filtros sucios	2Q	1,79E-02	8,61E-02	1,79E-02	1,98E-01	7,48	82,72	7,92E-01
10	Capacitor	10H	1,79E-02	8,61E-02	1,79E-02	2,16E-01	7,48	90,21	7,92E-01
15	Baterías	15F	1,62E-01	4,23E-02	8,79E-03	2,24E-01	3,68	93,88	3,62E-02
17	Cargador de baterías	17F	5,41E-02	4,23E-02	8,79E-03	2,33E-01	3,68	97,56	1,23E-01
9	Supresor	9F	3,61E-02	6,26E-03	1,30E-03	2,34E-01	0,54	98,10	2,76E-02
13	Transferenciales sucios	13Q	3,61E-02	6,26E-03	1,30E-03	2,36E-01	0,54	98,65	2,76E-02
3	Sensor de presión de aceite	3F	1,80E-02	6,21E-03	1,29E-03	2,37E-01	0,54	99,19	5,57E-02
6	Bajo nivel de aceite	6T	7,15E-02	6,21E-03	1,29E-03	2,38E-01	0,54	99,73	1,33E-02
11	Salidero de líquido refrigerante	11T	7,16E-02	1,04E-03	2,16E-04	2,39E-01	0,09	99,82	2,22E-03
12	Salidero de agua	12T	5,37E-02	1,04E-03	2,16E-04	2,39E-01	0,09	99,91	3,02E-03
19	Radiador	19F	5,63E-02	1,04E-03	2,16E-04	2,39E-01	0,09	100,00	2,87E-03
5	Interruptor General de Red	5F	1,82E-02	1,04E-06	2,16E-07	2,39E-01	0,00	100,00	9,22E-06
14	Cable suelto en el Interruptor de Emergencia	14I	1,82E-02	1,04E-06	2,16E-07	2,39E-01	0,00	100,00	9,22E-06
18	Fusibles	18F	1,80E-02	1,04E-06	2,16E-07	2,39E-01	0,00	100,00	9,32E-06

Fig. 6. Análisis de Importancia acumulada de los sucesos para el STEMAC tomada del CSolv. Fuente: [10].

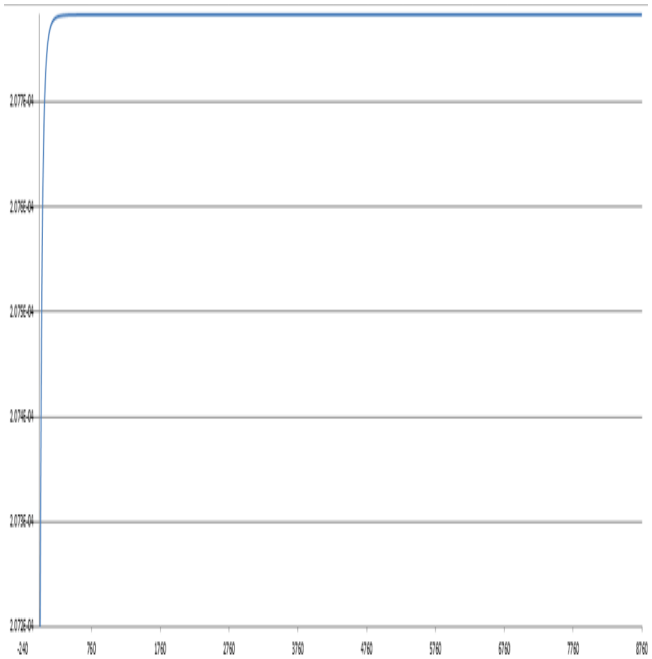

Fig. 7. Análisis de indisponibilidad instantánea para el grupo electrógeno STEMAC tomada del CSolv. Fuente: [10].

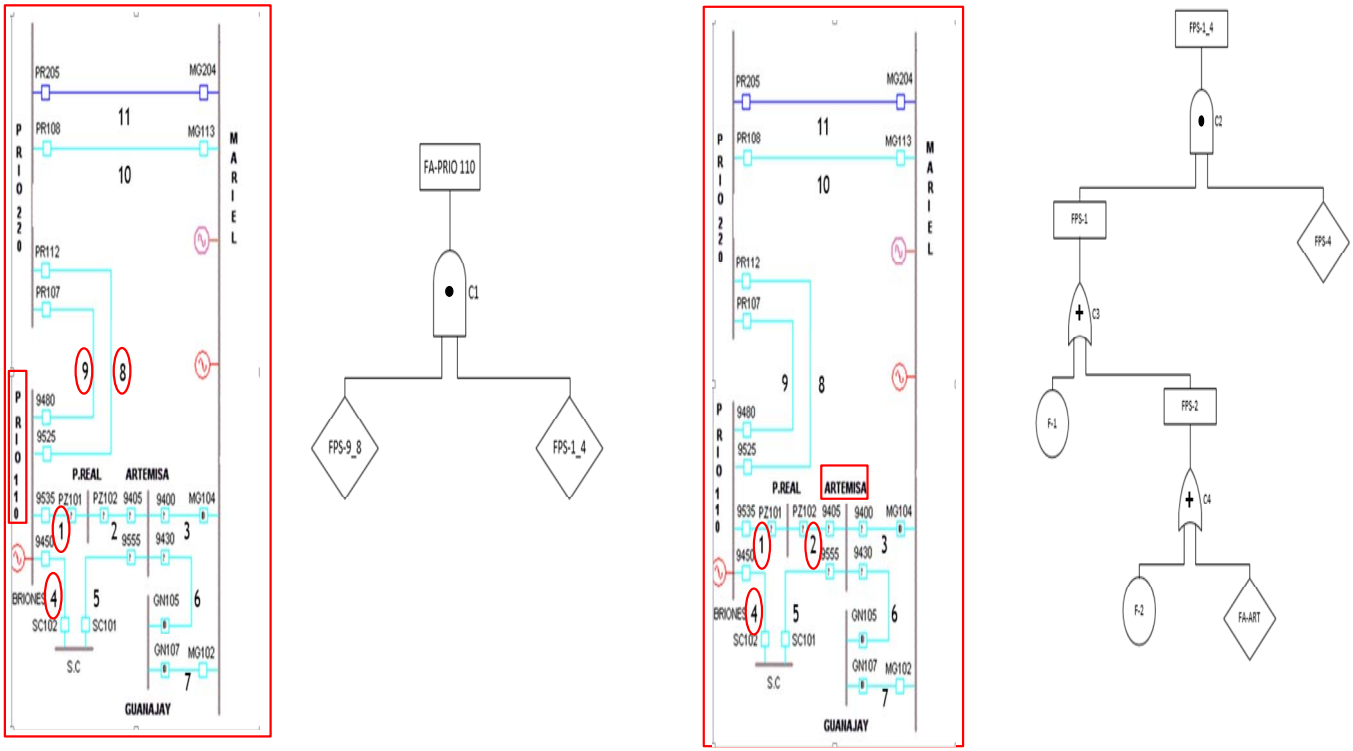

Fig. 8. Árbol de fallo PRIO 110 a partir de los datos aportados por los reportes de fallos. Fuente: [11].

0:00:18	100%				Calcular		Códigos	Números
No.	Prob.	Pr. Acum.	%	% Acum.	E1	E2	E3	E4
1	1.84E-08	1.84E-08	79.67	79.67	F-3	F-7	F-10	
2	1.92E-09	2.03E-08	8.33	88.01	F-3	F-6	F-10	
3	1.69E-09	2.20E-08	7.35	95.36	F-2	F-5	F-10	
4	5.78E-10	2.26E-08	2.51	97.86	F-2	F-4	F-10	
5	3.66E-10	2.29E-08	1.59	99.45	F-1	F-5	F-10	
6	1.25E-10	2.31E-08	0.54	99.99	F-1	F-4	F-10	
7	1.89E-12	2.31E-08	0.01	100.00	F-3	F-7	F-8	F-9
8	1.98E-13	2.31E-08	0.00	100.00	F-3	F-6	F-8	F-9
9	1.74E-13	2.31E-08	0.00	100.00	F-2	F-5	F-8	F-9
10	5.95E-14	2.31E-08	0.00	100.00	F-2	F-4	F-8	F-9
11	3.77E-14	2.31E-08	0.00	100.00	F-1	F-5	F-8	F-9
12	1.28E-14	2.31E-08	0.00	100.00	F-1	F-4	F-8	F-9

Fig. 9. Tabla con los conjuntos mínimos de fallo para el SEP PRIO 110 tomada del CSolv. Fuente: [11].

En este caso, atendiendo a las medidas de importancia, las líneas que se destacan por su influencia en la ocurrencia del suceso indeseado son la 3, la 7 y la 10. Continúa siendo la línea 10 la que más se destaca, pero esta vez con una más clara diferencia sobre las demás líneas, tal como se muestra en la figura 10.

No	Descripción	Código	Indisponibilidad / Probabilidad de fallo	FV	RRW	RRW	RAW	RAW
10	Falla en la línea 10	F-10	1.18E-03	1.00E+00	9713.43	2.31E-08	847.08	1.95E-05
3	Falla de la línea 3	F-3	5.37E-03	8.80E-01	8.34	2.03E-08	164.03	3.76E-06
7	Falla de la línea 7	F-7	2.90E-03	7.97E-01	4.92	1.84E-08	275.07	6.32E-06
2	Falla de la línea 2	F-2	6.88E-04	9.86E-02	1.11	2.27E-09	144.20	3.30E-06
5	Falla de la línea 5	F-5	2.09E-03	8.94E-02	1.10	2.06E-09	43.70	9.84E-07
6	Falla de la línea 6	F-6	3.03E-04	8.34E-02	1.09	1.92E-09	275.07	6.32E-06
4	Falla de la línea 4	F-4	7.12E-04	3.05E-02	1.03	7.03E-10	43.70	9.84E-07
1	Falla de la línea 1	F-1	1.48E-04	2.13E-02	1.02	4.91E-10	144.20	3.30E-06
8	Falla en la línea 8	F-8	3.57E-04	1.03E-04	1.00	2.37E-12	1.29	6.64E-09
9	Falla en la línea 9	F-9	3.40E-04	1.03E-04	1.00	2.37E-12	1.30	6.97E-09

Fig. 10. Tabla con el análisis de importancia de los sucesos para el SEP PRIO 110 tomada del CSolv. Fuente: [11].

Con la evaluación de la confiabilidad del grupo electrógeno STEMAC, mediante el método del Análisis Probabilista de Seguridad, utilizando el software CSolv, se obtuvo un índice de indisponibilidad media del grupo de $2{,}08 \cdot 10^{-01}$ que, comparado con las tasas de fallos por hora que se conocen en el mundo para los grupos electrógenos, este valor de indisponibilidad constituye un valor muy alto.

Se determinaron los elementos críticos que contribuyen a la alta indisponibilidad que presenta el grupo electrógeno. Estos elementos resultaron ser: los diodos de la tarjeta de control, salideros en el tanque de combustible, averías en el codo de salida del tanque auxiliar, roturas en la tapa del generador, cortocircuitos a tierra, filtros sucios y capacitores fundidos.

Se determinó con el análisis de importancia, por medio del diagrama de Pareto, que estos fallos constituyen el 90,21% de los fallos más importantes que presenta el grupo, por lo que se procedió a proponer un grupo de medidas en función de optimizar los ciclos de mantenimiento que se le realizan al grupo y de reforzar el control sobre los mismos. Elaborándose, además, un manual para la mejora de la gestión del mantenimiento a los grupos electrógenos, sobre la base del Procedimiento de la política de mantenimiento a los Grupos Electrógenos de Emergencia contenido en el Manual de Generación Distribuida de la UNE.

Con relación al SEP estudiado el análisis de confiabilidad demostró que la probabilidad de que una de sus barras del PRIO 110 quede sin alimentación eléctrica del SEN es nula, estando indisponible solamente durante una hora en 2 965 071 años. Y las medidas de importancia indican que la línea diez es la que más peso tiene en la probabilidad de ocurrencia del suceso indeseado. Con el análisis de sensibilidad, se constató que el impacto de esta en la variación de la probabilidad de ocurrencia de este suceso es considerable; particularmente, al aumentársele el tiempo de reparación al componente. De no encontrarse presente la única línea de 220 kV de este subsistema, la probabilidad de ocurrencia del evento tope aumentaría en el orden de 10E-03, pero continuaría considerándose nulo debido a que estaría indisponible solamente durante una hora en 4 796 años. La componente más crítica continúa siendo la línea número diez.

CONCLUSIONES

Como resultado del trabajo se explican dos estudios de caso sobre la evaluación de la confiabilidad, mediante el método del Análisis Probabilista de Seguridad utilizando el software CSolv a: un grupo electrógeno STEMAC de respaldo al suministro eléctrico y un subsistema de transmisión del SEN; este software, a pesar de haberse diseñado para la docencia, resulta de utilidad para estudiar sistemas técnicos complejos, demostrándose para ambos casos sus potencialidades.

REFERENCIAS

[1] MAC Smith, A.; Meyer, N.; Shima, N. ``Optimizar el mantenimiento proactivo al utilizar RCM´´.Uptime. [online]. 2019. [consultado 2019-06-03], Disponible en: <https://reliabilityweb.com/sp/articles/entry/optimizing-proactive-maintenance-using-rcm>. 2019. ISSN 1557-0193

[2] PCC (Partido Comunista de Cuba). Conceptualización del Modelo Económico y Social Cubano de Desarrollo Socialista. Plan Nacional de Desarrollo Económico y Social hasta 2030: Propuesta de Visión de la Nación, Ejes y Sectores Estratégicos. [online] La Habana, 2017. [consultado 2019-06-03], Disponible en: http://www.granma.cu/file/pdf/gaceta/Conceptualizaci%C3%B3n%20del%20modelo%20economico%20social%20Version%20Final.pdf.

[3] RIVERO Oliva, José de Jesús;*et al*. ´´Avaliação de árvores de falhas mediante uma planilha EXCEL´´. Energética [online]. 2018, v.39, n.1 [cosultado 2019-06-03], pp.56-61. Disponible en: <http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-59012018000100008&lng=es&nrm=iso>. ISSN 1815-5901.

[4] ÁLVARES, M. C., *et al*., ``Análisis de herramientas para el estudio de la confiabilidad de un sistema eléctrico de potencia´´. Universidad de la República Oriental del Uruguay [online] 2002. [consultado 2019-06-03] Disponible en: http://iie.fing.edu.uy/~jesus/proy_confiabilidad.pdf

[5] SALGADO, Yorlandis. ``Comparación de modelos para la evaluación de la confiabilidad de sistemas de generación eléctrica´´. Tesis para optar por el grado de master en Ingeniería Eléctrica, CIPEL, [online] 2016. [consultado 2019-06-03] Disponible en: http://tesis.cujae.edu.cu:8080/bitstream/handle/123456789/4299/Maestria1848.pdf?sequence=1&isAllowed=y

[6] PERDOMO Ojeda, Manuel Y. Salomon LLanes, Jesús, ``Análisis de modos y efectos de falla expandido: Enfoque avanzado de evaluación de fiabilidad´´. Revista Cubana de Ingeniería, [online], 2019 v. 7, n. 2, p. 5-14, [consultado 2019-06-03] Disponible en: http://rci.cujae.edu.cu/index.php/rci/article/view/509/pdf. Doi:https://doi.org/10.1234/rci.v7i2.509. ISSN 2223-1781.

[7] IAEA-TECDOC-1670/S: ``Análisis Probabilista de Seguridad de Tratamientos de Radioterapia con Acelerador Lineal´´. Ed. Díaz de Santos: Madrid [online] 2012. [consultado 2019-06-03] Disponible en: http://www.foroiberam.org/documents/193375/193723/TE_1670_S_web.pdf/5b361fb8-a4af-4ceb-b674-778cc5329682. ISBN 978-92-0-322610-3

[8] RIVERO Oliva, José De Jesús; *et al*. ``Advanced combinatorial method for solving complex fault trees´´. Annals of Nuclear Energy [online] 2018, vol.120, p. 666-681,[consultado 2019-06-03]. Disponible en: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0306454918303190. Doi:https://doi.org/10.1016/j.anucene.2018.06.019

[9] LÓPEZ, Carvajal, G. A, *et al*. ``Árbol de fallo como herramienta para la mejora de procesos´´. Estudio de caso cementera XPZ. Revista Espacios [online] 2018 vol.39 n.(6) [consultado 2019-06-03], Disponible en: http://www.revistaespacios.com/a18v39n06/18390619.html, ISSN 0798 1015

[10] MARTÍN Fernandez, Roberto Manuel. ``Evaluación de la confiabilidad en el grupo electrógeno STEMAC del Instituto Superior del MININT´´. Trabajo de Diploma. Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de La Habana, [online] 2018 [consultado 2019-06-03], Disponible en: http://tesis.cujae.edu.cu:8080/handle/123456789/8542

[11] CURBELO Colina, Abel. ``Análisis de confiabilidad en un subsistema de transmisión de la zona occidental con el software CSolv´´. Trabajo de Diploma. Facultad de Ingeniería Eléctrica, Universidad Tecnológica de La Habana, [online] 2018 [consultado 2019-06-03], Disponible en: http://tesis.cujae.edu.cu:8080/bitstream/handle/123456789/8562/An%c3%a1lisis%20de%20confiabilidad%20en%20un%20subsistema%20de%20transmisi%c3%b3n%20mediante%20el%20software%20Csolv.pdf?sequence=1&isAllowed=y