

Análisis de confiabilidad y riesgo de una instalación experimental para el tratamiento de aguas residuales

Reliability and risk analysis of an experimental set-up for wastewater treatment

María-Adelfa Abreu-Zamora, Jesús-Salomón-Llanes, Daniel Áyax-García-Cortés, Ulises-Javier Jáuregui-Haza

Instituto Superior de Tecnologías y Ciencias Aplicadas InstEC. La Habana, Cuba
Correo electrónico: mabreu@instec.cu

Recibido: 7 de junio de 2013

Aceptado: 13 de octubre de 2013

Resumen

Una de las exigencias modernas para el uso de equipos en todas las ramas de la economía, la ciencia y la educación, es su explotación segura. En este trabajo, se realizó el análisis de confiabilidad y riesgo de una instalación experimental para el tratamiento de aguas residuales con radiación ultravioleta. Se empleó la técnica del árbol de fallos y se analizaron dos variantes de cálculo. La primera variante consideró fuentes no confiables de suministro de energía eléctrica y la segunda consideró la existencia de fuentes confiables. Como resultado se identificaron 20 conjuntos mínimos de corte, 12 de primer orden y 8 de tercer orden. Además, se infirió, la necesidad de contar con una fuente alternativa de electricidad y que es importante establecer redundancia de grupo de componentes para instalaciones a escala industrial. El análisis demostró que la instalación es segura para su uso en la experimentación a escala de laboratorio.

Palabras claves: confiabilidad, riesgo, instalación experimental, tratamiento de aguas residuales, radiación ultravioleta, árbol de fallos.

Abstract

One of the modern requirements for using equipments in all the areas of economy, science and education, is its safety operation. In this work, it was carried out the reliability and risk analysis of an experimental set-up for the wastewater treatment with ultraviolet radiation. The fault tree technique was used and two variants of calculation were analyzed. The first variant considered unreliable sources of electricity supply and the second considered the existence of reliable sources. As a result, 20 minimal cut sets were identified 12 of first-order and 8 of third-order. Besides, the necessity of an alternative supply electrical power source was inferred and it is important to establish redundant components group for industrial scale facilities. The analysis demonstrated the set-up is safety for its use in the laboratory.

Key words: reliability, risk, experimental set-up, wastewater treatment, ultraviolet radiation, fault tree.

Introducción

La contaminación de las aguas es una problemática que está directamente relacionada con el desarrollo, la salud y la calidad de vida de todos los seres humanos. Según estadísticas de la Organización Mundial de la Salud, el 13 % de la población mundial no tiene acceso a fuentes mejoradas de agua potable, lo que equivale aproximadamente a 886 millones de personas [1]. En el caso particular de Cuba, existe un 7.7 % de la población sin acceso al agua potable, y se realizan gastos de inversión para la protección del medio ambiente, destinando en el 2011, 309.4 millones de pesos para la protección del agua en particular [2].

Las aguas que se encuentran contaminadas por la actividad humana pueden, en general, ser procesadas eficientemente por plantas de tratamiento biológico, por adsorción con carbón activado u otros adsorbentes, o por tratamientos químicos convencionales (oxidación térmica, cloración, ozonización, permanganato de potasio, entre otros) [3]. Sin embargo, existen otros casos donde las aguas contienen contaminantes orgánicos persistentes. Estos constituyen una clase de contaminantes químicos de alta peligrosidad a los que se reconoce como una amenaza seria para la salud humana y los ecosistemas a nivel mundial [4].

Los Procesos Avanzados de Oxidación (PAO) se proponen como una alternativa para el tratamiento de aguas contaminadas con sustancias persistentes, difícilmente biodegradables [5-9]. Entre los PAO más comunes se encuentran los procesos fotoquímicos, tanto homogéneos como heterogéneos. En ellos se combina la radiación ultravioleta (UV) con agentes oxidantes como el ozono (O_3), el peróxido de hidrógeno (H_2O_2), el reactivo de Fenton (Fe^{2+} y H_2O_2) y, en el caso de la fotocatalisis heterogénea, se emplean catalizadores como el dióxido de titanio (TiO_2) y el oxígeno. Resulta de gran importancia el desarrollo de instalaciones experimentales, que permitan la implementación de estos procesos para el tratamiento de aguas residuales con contaminantes persistentes.

Una de las exigencias modernas para el uso de equipos en todas las ramas de la economía, la ciencia y la educación, es su explotación segura. Por ello, un elemento esencial a tener en cuenta, antes de poner en marcha cualquier instalación incluyendo la etapa de proyecto técnico-ejecutivo, es el análisis de confiabilidad y riesgo de la misma. Con este fin se emplean diversos procedimientos tales como el Análisis de Peligros Operacionales, el Análisis de Modos y Efectos de Fallos, la técnica del Árbol de Fallos (AF) [10, 11], siendo una de las más utilizadas [12-16], entre otros.

El objetivo del presente trabajo es realizar el análisis de confiabilidad y riesgo de una instalación experimental para el estudio del tratamiento de aguas residuales con radiación ultravioleta empleando la técnica del AF.

Métodos y Materiales

La instalación en estudio cuenta con un reactor UV de canal abierto, un tanque homogeneizador, un criostato, un agitador mecánico y una bomba (ver Fig. 1). Esta instalación funciona a ciclo cerrado, lo que permite extender el tiempo de residencia del residual en el reactor hasta su degradación. Por otra parte, la existencia del tanque homogeneizador permite evaluar la influencia de la temperatura en los procesos de degradación de los diferentes contaminantes persistentes. La bomba asegura la circulación del fluido desde el tanque homogeneizador hasta el reactor. En el tanque homogeneizador, mediante el empleo de un agitador mecánico se evita la formación de perfiles de concentración y temperatura y la conexión entre los diferentes equipos se realiza con mangueras flexibles.

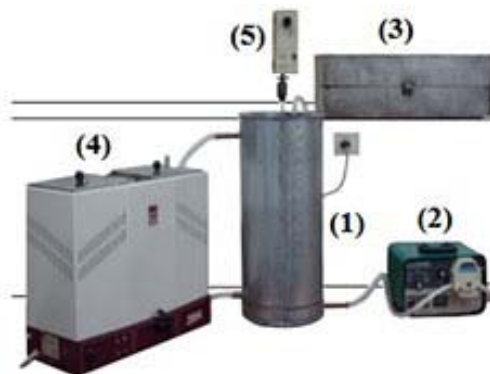


Fig. 1. Instalación experimental para el tratamiento de aguas residuales con radiación UV. 1) Tanque homogeneizador, 2) Bomba peristáltica, 3) Reactor UV de canal abierto, 4) Criostato, 5) Agitador mecánico



Fig. 2. Reactor UV de canal abierto

El reactor UV de canal abierto (ver Fig. 2), construido en acero inoxidable tiene un largo de 650 mm y un ancho de 240 mm, y posee tres lámparas UV colocadas en forma paralela. El volumen útil del reactor es de 15 L. Además, se encuentran colocados dos distribuidores de flujo tipo placas horadadas, uno posterior a la entrada, y el otro anterior a la salida del fluido del reactor. Los mismos tienen la función de distribuir la entrada y la salida del fluido de forma homogénea a través de la sección transversal del reactor. Entre el orificio de entrada del fluido y el distribuidor de flujo, se colocó un deflector circular para evitar el efecto del chorro de entrada del fluido sobre el distribuidor, y a la misma vez que no se favorezca la salida del fluido por los orificios presentes en la zona de impacto.

El tanque homogeneizador es un tanque cilíndrico de cinc galvanizado con una doble pared formando una camiseta (ver Fig. 3). Los tubos de entrada y salida son de cobre.



Fig. 3. Tanque homogeneizador

Análisis de confiabilidad y riesgo

Para realizar el análisis de confiabilidad y riesgo se utiliza el código de APS-1 [17] ARCONWIN v.5 el cual es un programa comercial que se basa en la técnica del árbol de fallos. En este análisis, no se tuvo en cuenta el fallo del reactor UV de canal abierto pues como se mencionó anteriormente es un recipiente de acero inoxidable por lo que posee una resistencia alta a la corrosión y es un recipiente a presión atmosférica, siendo su tasa de fallo muy baja por la poca agresividad de la disolución modelo que se emplea en los experimentos. Además, se despreciaron los modos de fallos de causa común, pues la instalación trabaja un tiempo reducido y en condiciones ambientales de muy baja intensidad. Por otra parte, se asumió como suceso no desarrollado el fallo en la generación externa de energía eléctrica.

Para la modelación con el programa ARCONWIN v.5 es necesario realizar una descripción de los componentes de la instalación, de los componentes-modos de fallo (sucesos básicos) y de las compuertas, es decir, establecer el nivel de resolución de la base de datos de confiabilidad. En la tabla 1 se muestra la descripción de los componentes de la instalación involucrados en la seguridad y confiabilidad de la misma.

Tabla 1. Descripción de los componentes de la instalación

No.	Componentes	Código	Descripción/Función
1	Reactor UV de canal abierto	RPUV	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Recipiente de acero inoxidable con una capacidad útil de 15 L. ▪ Contener la disolución que será tratada
2	Lámparas de luz UV	LUV	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Fuentes artificiales de luz UV ▪ Irradiar la disolución contenida dentro del RPUV
3	Interruptor triple	INT	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Permite el encendido opcional de cada una de las lámparas UV
4	Tanque homogeneizador	RA	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Recipiente de zinc galvanizado y tubos de cobre ▪ Suministrar la disolución que será tratada en RPUV por LUV
5	Agitador mecánico eléctrico	AM	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Homogeneizar la disolución contenida en RA
6	Criostato	C	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Contiene el agua de enfriamiento ▪ Garantizar y estabilizar la temperatura de trabajo (20 - 50 °C)
7	Bomba	BP	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Bomba peristáltica ▪ Garantizar la recirculación del fluido
8	Mangueras	MN	<ul style="list-style-type: none"> ▪ Garantizar la circulación del fluido

La descripción de los componentes-modos de fallo o sucesos básicos se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Descripción de los componentes-modos de fallo

No.	Sucesos básicos	Descripción
1	LF-BP-S	Fallo de la bomba BP al arranque.
2	LF-BP-R	Fallo de la bomba BP en operación.
3	LF-RA-T	Fallo del recipiente RA a la ruptura.
4	LF-MN-T	Fallo local por deshermetización y rotura por envejecimiento de las mangueras.
5	LF-LUV1-F	Fallo de la lámpara UV # 1 a funcionar.
6	LF-LUV2-F	Fallo de la lámpara UV # 2 a funcionar.
7	LF-LUV3-F	Fallo de la lámpara UV # 3 a funcionar.
8	LF-I1-C	Fallo del interruptor sección # 1 a cambiar de posición.
9	LF-I2-C	Fallo del interruptor sección # 2 a cambiar de posición.
10	LF-I3-C	Fallo del interruptor sección # 3 a cambiar de posición.
11	HE1-IT	Errores humanos en la manipulación del interruptor triple.
12	HE1-EG	Errores humanos en la interrupción del enchufe general.
13	LF-BK-D	Fallo del <i>breaker</i> a mantener la posición.
14	F-GE	Fallo en la generación externa de energía eléctrica.
15	LF-C-S	Fallo del criostato C al arranque.
16	LF-C-R	Fallo del criostato C en operación.
17	LF-AM-S	Fallo del agitador mecánico AM al arranque.
18	LF-AM-R	Fallo del agitador mecánico AM en operación.

En la tabla 3 se observa la descripción de las compuertas y la lógica del árbol de fallos para su entrada al programa de cálculo donde TC es el tipo de compuerta.

Tabla 3. Descripción de las compuertas y la lógica del árbol de fallos

No.	TC	Código	Lógica de Compuerta	Descripción
1	O	F-IL	C2 C3 C7 C12	Fallo de la instalación para el estudio del tratamiento de aguas residuales (suceso tope)
2	Y	F-LUA	C4 C5 C6	Fallo de la iluminación.
3	O	F-REC	C8 C9 C10 C11 C13	Fallo en la recirculación. Pérdida de la circulación del fluido
4	O	F-LUV1	1 2	Fallo de la lámpara UV 1
5	O	F-LUV2	3 4	Fallo de la lámpara UV 2
6	O	F-LUV3	5 6	Fallo de la lámpara UV 3
7	O	F-HE-AG	15 16	Fallo por errores humanos de manipulación.
8	O	F-BP	7 8	Fallo de la bomba peristáltica
9	O	F-MN	9	Pérdida de la hermeticidad del sistema por la rotura de las mangueras
10	O	F-RA	10	Pérdida de la hermeticidad por rotura del tanque homogeneizador
11	O	F-C	11 12	Fallo del criostato. No se garantiza la temperatura de trabajo (20 - 50 °C)
12	O	F-CE	13 14	Fallo por carencia en el suministro de corriente eléctrica
13	O	F-AM	17 18	Fallo del agitador mecánico. No existe homogeneización del fluido dentro del tanque homogeneizador

La tabla 4 muestra la base de datos de confiabilidad según la modelación explícita propuesta en el código, necesaria para la conformación del AF.

Se puede observar que existen componentes (T) tipo 1 que caracterizan los errores humanos con una probabilidad de fallo cercana a los valores de barrido de 5×10^{-3} y 10^{-2} , componentes tipo 5 que son los que caracterizan a los elementos en operación, con tasas de fallo entre 3.00×10^{-6} y 3.00×10^{-5} , componentes tipo 3 que se aplican a los componentes monitoreados continuamente, cuyo fallo se detecta en cuanto se produce y son sometidos de inmediato a la reparación, componentes tipo 4 que son aquellos cuyo estado se comprueba cada cierto tiempo mediante pruebas que permiten detectar los fallos del componente y un componente tipo 7 de tipo no desarrollado con una probabilidad de fallo de 7.00×10^{-2} (constituye una primera variante de cálculo), a los efectos del cálculo este tipo de componente no se diferencia de los componentes tipo 1.

El tiempo medio de reparación (TR) establecido fue de 48 horas, tomando en cuenta el conjunto promedio de tareas a ejecutar por parte de la organización para restablecer un componente y ponerlo en servicio. Como tiempo de operación (Tmis) se tomaron 2920 horas considerando las horas hábiles del año en correspondencia con el cronograma de trabajo y el régimen periódico de operación de la instalación experimental.

Se definió un tiempo permisible fuera de servicio para los componentes del sistema (AOT, de sus siglas en inglés) de 72 horas, con el objetivo de garantizar la no extensión del tiempo promedio de puesta en servicio de la instalación tras las paradas por roturas u otras causas no planificadas, con vista a cumplir el plan de trabajo en el tiempo previsto de la investigación. De esta forma el programa, a partir de los datos de cada componente, calcula automáticamente su indisponibilidad media (Qcomp) en correspondencia con el tipo de dato específico.

Tabla 4. Base de datos de confiabilidad

No.	T	Código	Tasa de Fallo	Probabilidad de Fallo	TR	T1Pr	TePr	DP	Qp	Inef	AOT	Fde	Tmis	Qcomp
1	3	LF-LUV1-F	1.00E-7		48						72			4.80E-06
2	5	LF-I1-C	3.00E-6		48								2920	1.44E-04
3	3	LF-LUV2-F	1.00E-7		48						72			4.80E-06
4	5	LF-I2-C	3.00E-6		48								2920	1.44E-04
5	3	LF-LUV3-F	1.00E-7		48						72			4.80E-06
6	5	LF-I3-C	3.00E-6		48								2920	1.44E-04
7	4	LF-BP-S	2.00E-6		48	24	24	0	0	0	72	0		1.20E-04
8	5	LF-BP-R	3.00E-5		48								2920	1.44E-03
9	3	LF-MN-T	1.00E-7		48						72			4.80E-06
10	3	LF-RA-T	1.00E-9		48						72			4.80E-08
11	4	LF-C-S	2.00E-6		48	24	24	0	0	0	72	0		1.20E-04
12	5	LF-C-R	3.00E-5		48								2920	1.44E-03
13	3	LF-BK-D	1.00E-6		48						72			4.80E-05
14	7	F-GE		7.00E-02 1.10E-04							72 72			7.00E-02 1.10E-04
15	1	HE1-IT		5.00E-03							72			5.00E-03
16	1	HE1-EG		1.00E-02							72			1.00E-02
17	4	LF-AM-S	2.00E-6		48	24	24	0	0	0	72	0		1.20E-04
18	5	LF-AM-R	3.00E-5		48								2920	1.44E-03

Analizando el caso de una generación eléctrica en redes de distribución confiables, típica de zonas tropicales, sin el uso de líneas soterradas, puede considerarse un valor de indisponibilidad en la generación externa de energía eléctrica de 1.10×10^{-4} (valor en rojo de la tabla 4), que es equivalente a no más de una hora acumulada fuera de servicio anual. Esta variación de la probabilidad de fallo en la generación externa de energía eléctrica constituye una segunda variante de cálculo.

Resultados y Discusión

Como resultado de la primera variante de cálculo, cuando se emplea en la modelación una probabilidad de fallo en la generación externa de energía eléctrica de 7.00×10^{-2} , se obtuvo un valor de la indisponibilidad a la demanda de 8.54×10^{-2} , una probabilidad de fallo en operación de 4.31×10^{-3} y una probabilidad de no cumplir la función de seguridad de 8.97×10^{-2} . Al comparar estos valores con los valores típicos de los sistemas de industrias de excelencia, los cuales son de uno o dos órdenes más bajo, aspecto lógico que está en correspondencia con el nivel de redundancia de estos sistemas que pueden ser de dos y tres canales de acuerdo a las exigencias regulatorias establecidas, observamos la poca redundancia existente en el diseño.

Además, se identificaron 20 Conjuntos Mínimos de Corte (CMC), que "son los diferentes conjuntos de fallos críticos que al producirse provocan la anomalía global del sistema" [11]. La tabla 5 muestra los 20 CMC existentes.

Tabla 5. Conjuntos mínimos de corte al considerar fuentes no confiables en el suministro externo de energía eléctrica

No.	CMC	No.	CMC
1	LF-BP-R	11	LF-BK-D
2	LF-C-R	12	F-GE
3	LF-AM-R	13	LF-I3-C*LF-I2-C*LF-I1-C
4	LF-RA-T	14	LF-I3-C*LF-I2-C*LF-LUV1-F
5	LF-C-S	15	LF-I3-C*LF-LUV2-F*LF-I1-C
6	LF-BP-S	16	LF-I3-C*LF-LUV2-F*LF-LUV1-F
7	LF-AM-S	17	LF-LUV3-F*LF-I2-C*LF-I1-C
8	LF-MN-T	18	LF-LUV3-F*LF-I2-C*LF-LUV1-F
9	HE1-IT	19	LF-LUV3-F*LF-LUV2-F*LF-I1-C
10	HE1-EG	20	LF-LUV3-F*LF-LUV2-F*LF-LUV1-F

De los 20 CMC identificados, los 12 primeros son de primer orden y los 8 restantes de tercer orden, lo cual indica que existe una gran dependencia de la confiabilidad del sistema al fallo de elementos individuales, lo que a su vez da una medida de la poca redundancia existente en el diseño como se mencionó anteriormente. La tabla 6 muestra los CMC que más contribuyen de forma individual a la indisponibilidad del sistema.

Tabla 6. Conjuntos mínimos de corte más importantes al considerar fuentes no confiables en el suministro externo de energía eléctrica

No.	CMC más importantes	Probabilidad	%
1	F-GE	7.00E-02	78.01
2	HE1-EG	1.00E-02	11.14
3	HE1-IT	5.00E-03	5.57
4	LF-BP-R	1.44E-03	1.60
5	LF-AM-R	1.44E-03	1.60
6	LF-C-R	1.44E-03	1.60

Analizando los CMC más importantes (ver tabla 6) se aprecia que el mayor contribuyente de forma individual a la indisponibilidad del sistema es el fallo en la generación externa de energía eléctrica (78.01 %). Los errores humanos contribuyen en un 11.14 % y un 5.57 %, estas contribuciones pueden ser disminuidas mediante un correcto dominio de la metodología de operación de la instalación.

Como resultado de la segunda variante de cálculo, es decir, empleando un valor de la probabilidad de fallo en la generación externa de energía eléctrica de 1.10×10^{-4} , se obtuvo un valor de la indisponibilidad a la demanda de 1.55×10^{-2} , una probabilidad de fallo en operación de 4.31×10^{-3} y una probabilidad de no cumplir la función de seguridad de 1.98×10^{-2} .

Al analizar los CMC más importantes, por la segunda variante de cálculo (ver tabla 7), se puede apreciar que los mayores contribuyentes de forma individual a la indisponibilidad del sistema son los errores humanos en la interrupción del enchufe general (50.41 %) y los errores humanos en la manipulación del interruptor triple (25.21 %) que como ya se mencionó anteriormente constituyen contribuciones que pueden ser minimizadas mediante un correcto dominio de la metodología de operación de la instalación.

Tabla 7. Conjuntos mínimos de corte más importantes al considerar fuentes confiables en el suministro externo de energía eléctrica

No.	CMC más importantes	Probabilidad	%
1	HE1-EG	1.00E-02	50.41
2	HE1-IT	5.00E-03	25.21
3	LF-BP-R	1.44E-03	7.25
4	LF-C-R	1.44E-03	7.25
5	LF-AM-R	1.44E-03	7.25
6	LF-C-S	1.20E-04	0.60
7	LF-BP-S	1.20E-04	0.60
8	LF-AM-S	1.20E-04	0.60
9	F-GE	1.10E-04	0.55
10	LF-BK-D	4.80E-05	0.24
11	LF-MN-T	4.80E-06	0.02

De forma general del análisis de confiabilidad y riesgo se infiere, por el peso que tiene el fallo en la generación externa de energía eléctrica en la disponibilidad del proceso, la necesidad de contar con una fuente alternativa de energía eléctrica. Igualmente es importante establecer redundancia de grupo de componentes para instalaciones a escala industrial, por las consecuencias que puede acarrear a mediano y a largo plazo un vertimiento descontrolado por fallas esporádicas del sistema. También es necesario contar con un sistema de recolección de los drenajes y fugas por rotura y deshermetizaciones de las mangueras. Por último, para este tipo de instalación debe velarse que exista una correcta selección de su equipamiento con respecto a su fiabilidad. Además, los valores calculados de la indisponibilidad media del sistema muestran cómo, para un tipo de instalación experimental y de carácter docente, en ambas variantes, su valor está por debajo de un 10 %. Este valor se considera permisible desde el punto de vista de la disponibilidad de la instalación.

En la figura 4 se observa el AF de la instalación que muestra las diferentes combinaciones de fallos de componentes y/o errores humanos, que de ocurrir de forma simultánea provocan el fallo de la instalación o sucesos accidentales. El significado de los códigos se muestra en las tablas 2 y 3.

Se observa como de forma sistemática se va desarrollando el suceso tope (F-IL), para el cual se produce el fallo de la instalación, en los sucesos intermedios que conducen a éste, y a su vez los sucesos intermedios en otros de menor jerarquía, hasta llegar a los sucesos primarios, determinados por el nivel de resolución del análisis posible o deseable [19].

Los sucesos intermedios y primarios se interconectan mediante compuertas lógicas (ver tabla 3):

- Compuerta OR (O): El estado fallado de cualquiera de los sucesos que entran a ella produce el estado fallado a la salida.
- Compuerta AND (Y): El estado fallado a la salida de la compuerta se produce cuando todos los sucesos que entran a ella están en estado fallado.

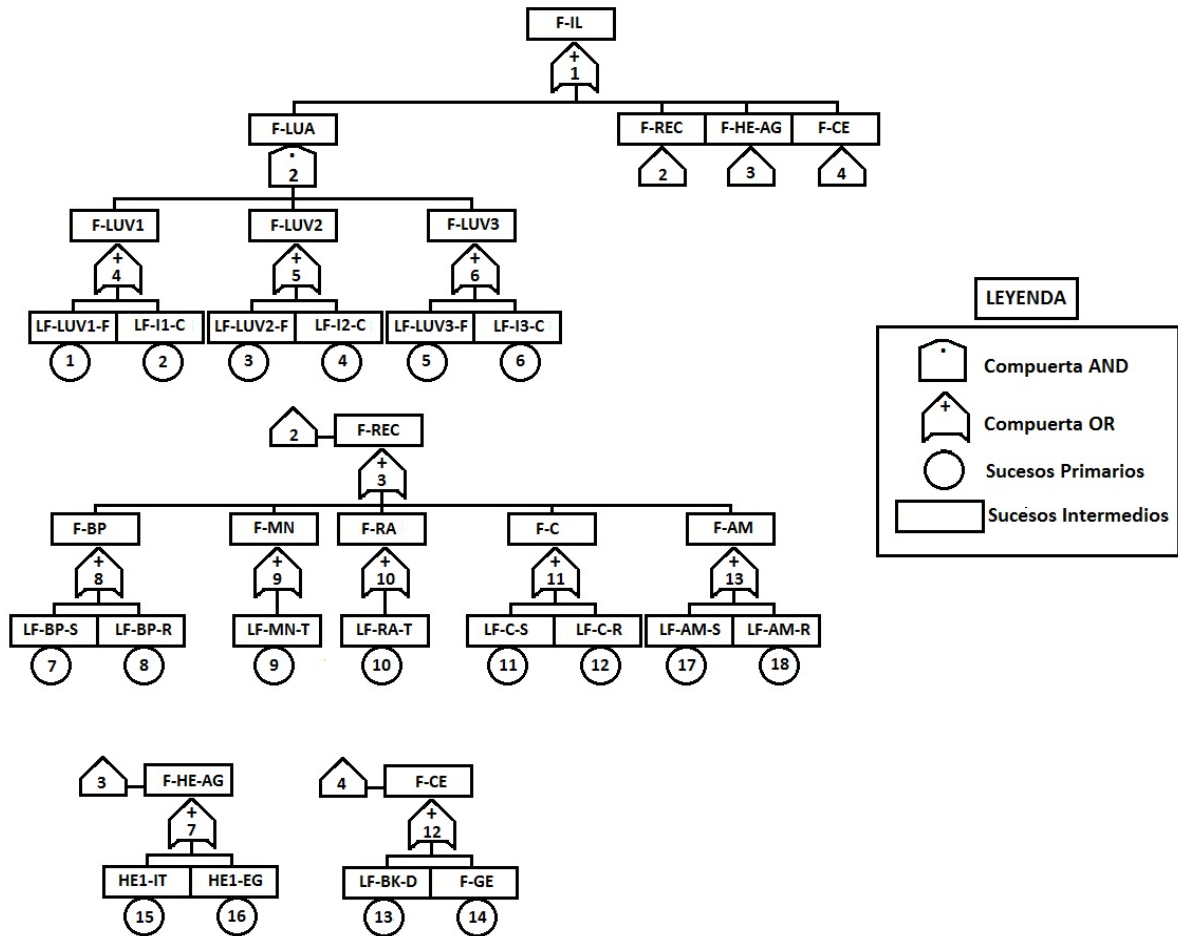


Fig. 4. Árbol de fallos de la instalación. El significado de los códigos se muestra en las tablas 2 y 3

Conclusiones

Como resultado de la primera variante de cálculo, que no considera fuentes confiables de suministro externo de energía eléctrica, se obtuvo un valor de la indisponibilidad a la demanda de 8.54×10^{-2} , una probabilidad de fallo en operación de 4.31×10^{-3} y una probabilidad de no cumplir la función de seguridad de 8.97×10^{-2} . El mayor contribuyente de forma individual a la indisponibilidad del sistema es el fallo en la generación externa de energía eléctrica (78.01 %). Los errores humanos contribuyen en un 11.14 % y un 5.57 %, estas contribuciones pueden ser disminuidas mediante un correcto dominio de la metodología de operación de la instalación.

En el caso de la segunda variante de cálculo, que considera fuentes confiables de suministro externo de energía eléctrica, se obtuvo un valor de la indisponibilidad a la demanda de 1.55×10^{-2} , una probabilidad de fallo en operación de 4.31×10^{-3} y una probabilidad de no cumplir la función de seguridad de 1.98×10^{-2} . Los mayores contribuyentes de forma individual a la indisponibilidad del sistema fueron: los errores humanos en la interrupción del enchufe general (50.41 %) y los errores humanos en la manipulación del interruptor triple (25.21 %), la contribución de estos puede ser minimizada mediante un correcto dominio de la metodología de operación de la instalación.

El análisis de confiabilidad y riesgo realizado, empleando las dos variantes de cálculo mencionadas anteriormente, demostró que la instalación es segura para su uso en la experimentación a escala de laboratorio.

Referencias

1. OMS. *Estadísticas Sanitarias Mundiales*. 2011. [Consultado el: 12 de marzo de 2013] Disponible en: http://www.who.int/whosis/whostat/ES_WHS2011_Full.pdf.

2. Oficina Nacional de Estadísticas. *Anuario Estadístico de Cuba 2011. Medio Ambiente*. Edición 2012. [Consultado el: 15 de marzo de 2013] Disponible en: <http://www.one.cu/aec2011/datos/02%20Medio%20Ambiente.pdf>.
3. Domènech, X., Jardim, W. F. y Litter, M. I. "Procesos avanzados de oxidación para la eliminación de contaminantes". En: *Eliminación de Contaminantes por Fotocatálisis Heterogénea*. La Plata, Argentina, 2001, p. 3-25. [Consultado el: 15 de septiembre de 2012]. Disponible en: <http://www.cnea.gov.ar/xxi/ambiental/cyted/06cap01.pdf>. ISBN 987-43-3809-1.
4. Weinberg, J. *Guía para las ONG sobre los Contaminantes Orgánicos Persistentes. Marco para las medidas de protección de la salud humana y el Medio Ambiente de los Contaminantes Orgánicos Persistentes*, 2009. [Consultado el 18 de marzo de 2013] Disponible en: http://www.ipen.org/ipenweb/documents/book/ngo_guide_pops_spanish.pdf.
5. Belgiorno, V., Rizzo, L., Fatta, D., *et al.* "Review on endocrine disrupting-emerging compounds in urban wastewater: occurrence and removal by photocatalysis and ultrasonic irradiation for wastewater reuse". *Desalination*. 2007, vol. 215, n° 1-3, p. 166-176. ISSN 0011-9164. DOI 10.1016/j.desal.2006.10.035.
6. Levec, J. y Pintar, A. "Catalytic wet-air oxidation processes: A review". *Catalysis Today*. 2007, vol. 124, n° 3-4, p.172-184. ISSN 0920-5861. DOI 10.1016/j.cattod.2007.03.035.
7. Liu, Z., Kanjo, Y., y Mizutani, S. "Removal mechanisms for endocrine disrupting compounds (EDCs) in wastewater treatment-physical means, biodegradation, and chemical advanced oxidation: A review". *Science of the Total Environment*. 2009, vol. 407, n° 2, p. 731-748. ISSN 0048-9697. DOI 10.1016/j.scitotenv.2008.08.039.
8. Chakinala, A. G., Gogate, P. R., Burgess, A. E. *et al.* "Industrial wastewater treatment using hydrodynamic cavitation and heterogeneous advanced Fenton processing". *Chemical Engineering Journal*. 2009, vol. 152, n° 2-3, p. 498-502. ISSN 1385-8947. DOI 10.1016/j.cej.2009.05.018.
9. Restrepo, G. M., Ríos, L. A., Marín, J. M. *et al.* "Evaluación del tratamiento fotocatalítico de aguas residuales industriales empleando energía solar". *Dyna*. 2008, vol. 75, n° 155, p.145-153. ISSN 0012-7353.
10. Troncoso, M. C. y Acosta, H. R. "El mantenimiento en la confiabilidad y disponibilidad de un sistema de generación de vapor". *Ingeniería Mecánica*. 2011, vol. 14, n° 2, p. 140-150. [Consultado el: 11 de marzo de 2013]. Disponible en: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu/index.php/revistaim/article/view/15>. ISSN 1815-5944.
11. Casal, J., Montiel, H., Planas, E. *et al.* *Análisis del riesgo en instalaciones industriales*. Edicions UPC. 1era edición, 1999. 361 p., p. 53-74. [Consultado el: 15 de septiembre de 2012]. Disponible en: <http://redsolidaridad.org.ve/cms/wp-content/uploads/downloads/2012/07/An%C3%A1lisis-del-riesgo-en-instalaciones-industriales-Casal-Montiel.pdf>. ISBN 84-8301-227-8.
12. Volkanovski, A., Cepin, M. y Mavko, B. "Application of the fault tree analysis for assessment of power system reliability". *Reliability Engineering & System Safety*. 2009, vol. 94, n° 6, p. 1116-1127. ISSN 0951-8320. DOI 10.1016/j.ress.2009.01.004.
13. Khakzad, N., Khan, F. y Amyotte, P. "Safety analysis in process facilities: Comparison of fault tree and Bayesian network approaches". *Reliability Engineering & System Safety*. 2011, vol. 96, n° 8, p. 925-932. ISSN 0951-8320. DOI 10.1016/j.ress.2011.03.012.
14. Vaurio, J. K. "Ideas and developments in importance measures and fault-tree techniques for reliability and risk analysis". *Reliability Engineering & System Safety*. 2010, vol. 95, n° 2, p. 99-107. ISSN 0951-8320. DOI 10.1016/j.ress.2009.08.006.
15. Johnson, D. H., Bidez, M. W. y De Lucas, L. J. "Hazard analysis and risk assessment in the development of biomedical drug formulation equipment". *Annals of Biomedical Engineering*. 2012, vol. 40, n° 4, p. 898-906. ISSN 0090-6964. DOI 10.1007/s10439-011-0451-x.
16. Groso, A., Ouedraogo, A. y Meyer, T. "Risk analysis in research environment". *Journal of Risk Research*. 2012, vol. 15, n° 2, p. 187-208. ISSN 1366-9877. DOI 10.1080/13669877.2011.634513.
17. Salomón, J. y Perdomo, M. *Análisis de riesgo industrial*. Centro de Estudios Gerenciales, Instituto Superior de Investigación y Desarrollo. Caracas, 2001. 2da edición. [Consultado el: 5 de febrero de 2013]. Disponible en: <http://qualitasbiblo.files.wordpress.com/2013/01/libro-anc3a1lisis-de-riesgo-industrial.pdf>. ISBN 980 00-1491-8 980 07 5679-5.