



20 del 28 de noviembre al 2 de diciembre del 2022
**CONVENCIÓN CIENTÍFICA
DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**
PALACIO DE CONVENCIONES DE LA HABANA

58
ANIVERSARIO
cujae

ANÁLISIS PROBABILÍSTICO DE RIESGO MEDIANTE LA COMBINACIÓN DE LÓGICA FUZZY- REDES BAYESIANAS DINÁMICAS (DBN) EN UN ÁREA DE ALMACENAMIENTO DE HIDROCARBUROS

Yanelys Cuba Arana¹, Julio Ariel Dueñas Santana² Ramón Quiza Sardiñas¹

¹Centro de Estudio de Fabricación Avanzada y Sostenible, CEFAS, Universidad de Matanzas Cuba, ²
Scuola Superiore Meridionale, University of Naples Federico II, Naples, Italy
¹e-mail:yanelys.cuba99@gmail.com

RESUMEN

El análisis predictivo probabilístico de riesgos es uno de los más usados internacionalmente debido a la información confiable que brinda para la optimización de la seguridad industrial. Sin embargo, las técnicas de análisis de riesgos clásicas necesitan ser actualizadas considerando la mejor representación de los accidentes que pueden ocurrir. Una de las industrias que representa en sí misma un alto grado de peligrosidad debido a la volatilidad e inflamabilidad de los materiales que procesa es la petrolera. Por esta razón esta investigación está enfocada en pronosticar la probabilidad de accidentes de incendio considerando la evolución en el tiempo, el sinergismo entre ellos y la probabilidad conjunta del efecto dominó por incendios en un área de almacenamiento de hidrocarburos. Para ello se desarrolla una metodología de seis etapas fundamentales en las que se incorpora el uso de la Inteligencia Artificial para la obtención de los resultados. Se obtuvo que el potencial de peligro de desarrollar un efecto dominó es elevado acorde a la literatura especializada.

PALABRAS CLAVES: incendio, efecto dominó, inteligencia artificial.

ABSTRACT

Probabilistic predictive risk analysis is one of the most widely techniques used worldwide due to the reliable information it provides for of the industrial safety optimization. However, classical risk analysis techniques need to be updated considering the best representation of accidents that may occur. For this reason this research is focused on forecasting the probability of fire accidents considering the evolution over time, the synergy and the joint probability of the domino effect by fires in a hydrocarbon storage area. For this purpose, a six-step methodology is developed in which the use of Artificial Intelligence is integrated to obtain more reliable results. It was obtained that the hazardous potential for developing a domino effect is high according to the specialized literature.

KEY WORDS: fire, domino effect, artificial intelligence.

1. INTRODUCCIÓN

El desarrollo tecnológico experimentado por los países industrializados en las últimas décadas, ha llevado consigo al incremento de instalaciones industriales. La producción, manipulación y transporte de determinadas sustancias peligrosas han implicado asimismo la aparición de nuevos riesgos, que pueden originar accidentes graves en las plantas de proceso con un fuerte impacto sobre las instalaciones, la población y el entorno [1]-[2].

En la industria química estos accidentes ocurren cada vez con más frecuencia debido al aumento de los inventarios cada vez mayores que se manejan en todo el mundo, a pesar del desarrollo obtenido en la ciencia y la tecnología de la seguridad industrial [3-5]. Los accidentes generados por el efecto dominó son los más destructivos y de mayor impacto y representan una afectación global a mayor escala, ya que, en estos casos, la magnitud de las consecuencias de los accidentes secundarios es mucho mayor que la del accidente primario [6]-[7]-[8].



Según las necesidades actuales en el análisis predictivo probabilístico de riesgos resulta indispensable la actualización de las técnicas de análisis de riesgo clásicas y la integración con otras más sofisticadas, que permitan determinar la probabilidad de ocurrencia de los accidentes y su posibilidad de concluir en un efecto dominó a partir del desarrollo de un evento primario para así obtener resultados más confiables y por consiguiente mejorar los métodos de evaluación de riesgos en el desarrollo de estrategias para prevenir accidentes y en el diseño de medidas de mitigación [9]-[10].

En los últimos años se han combinado técnicas como la aplicación de las redes bayesianas de probabilidades, con el fin de emitir un criterio más acertado de seguridad industrial en función de evitar la ocurrencia de estos accidentes, y en especial, que no ocurra el efecto dominó. Las redes Bayesianas dinámicas constituyen una extensión de la misma que permiten modelar sistemas dinámicamente, cuando los factores cambian con el tiempo [11] y la lógica *Fuzzy* proporciona una herramienta para la obtención de conocimientos y la evaluación probabilística de la seguridad bajo incertidumbre en los sistemas de proceso [12].

Dentro del amplio campo industrial, la industria petrolera juega un papel fundamental en el desarrollo a nivel mundial. En Cuba existen refinerías, empresas de perforación de petróleo y empresas comercializadoras de combustibles que se encargan del procesamiento del petróleo crudo con distintos fines. Estas industrias representan en sí mismas un alto riesgo de incendio y explosión por el nivel elevado de inflamabilidad y volatilidad de las sustancias que manejan. En estos sitios se almacenan diferentes combustibles como son la nafta, gasolina de aviación, diésel, fuel oil y turbocombustible; siendo esta área de interés a estudiar por las grandes capacidades de almacenamiento en los tanques y por los incidentes de incendio, derrames y fallos eléctricos ocurridos en la misma.

Por tal motivo el objetivo de este trabajo es pronosticar la probabilidad de accidentes de incendio considerando la evolución en el tiempo, el sinergismo entre ellos y la probabilidad conjunta del efecto dominó por incendios en un área de almacenamiento de hidrocarburos.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

En esta sección se describe la metodología que será empleada para el cumplimiento del objetivo de esta investigación. Primero, se muestra la secuencia lógica de análisis, resultado del análisis bibliográfico previamente realizado. Segundo, la descripción tecnológica del área estudiada: área de almacenamiento de hidrocarburos. Finalmente, se detallan cada una de las etapas dentro del algoritmo propuesto en el marco de esta investigación; así como, los programas necesarios para el desarrollo del mismo. En la figura 1 se muestra la secuencia de análisis propuesta para esta investigación.

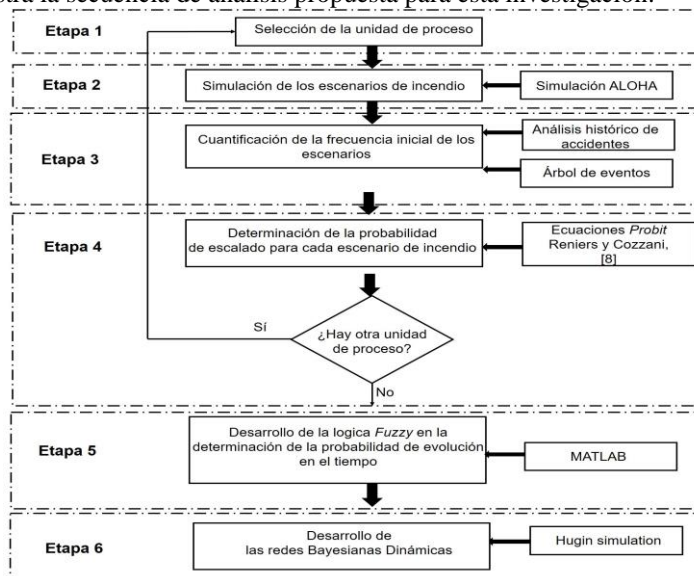


Figura 1: Metodología propuesta en esta investigación.



2.1 Etapa 1: Selección de la unidad de proceso.

Esta primera etapa dentro de la secuencia se refiere a la selección de una unidad de proceso dentro del área, para su posterior análisis. Para poder hacer una correcta selección de la misma, es necesario realizar una caracterización tecnológica dentro del área. En este caso el área objeto de estudio es un área de almacenamiento de hidrocarburos.

2.2 Etapa 2: Simulación de todos los escenarios de incendio para cuantificar los vectores de escalado.

Para la simulación de los escenarios de accidentes se emplea el *software* ALOHA, reconocido por el Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio Ambiente de Cuba (CITMA) como el simulador más adecuado para expresar el comportamiento de accidentes tóxicos, de incendio y explosión, con uso ampliamente recomendado para la evaluación de consecuencias en el proceso de análisis de riesgos y que cuenta con un gran prestigio a nivel internacional [13]. Para su empleo se debe definir primeramente los escenarios a desarrollar considerando parte del análisis bibliográfico, la descripción del proceso que se realiza en la industria, así como las características y propiedades de las sustancias involucradas que son combustibles líquidos con alto grado de inflamabilidad y volatilidad.

Este *software* establece nivel de preocupación (LOC). Según [14]-[15] para la radiación los valores utilizados de LOC son:

- Rojo: 10 kW/m²: Potencialmente letal en el intervalo de 60 segundos.
- Naranja: 5 kW/m²: Quemaduras de segundo grado en el intervalo de 60 segundos
- Amarillo: 2 kW/m²: Dolor en 60 segundos.

2.3 Etapa 3: Cuantificación de la frecuencia inicial de los escenarios

La cuantificación de la frecuencia inicial de los accidentes y la obtención de la probabilidad de ignición teniendo en cuenta la combinación de las técnicas árbol de eventos y análisis histórico de accidentes permiten la obtención de resultados adaptados al área objeto de estudio, puntos fundamentales para la confección de las redes Bayesianas. Para cuantificar la frecuencia inicial de los accidentes se aplica una combinación de las técnicas de análisis de riesgos siguientes: Análisis históricos de accidentes, particularizado al área de estudio en específico tomando un período de diez años para el registro; la determinación de la probabilidad de ignición según [16] y el árbol de eventos propuesto por [17].

2.4 Etapa 4: Determinación de la probabilidad de escalado para cada escenario de incendio

Para lograr determinar la evolución de la cadena de eventos dentro del efecto dominó es necesario conocer los valores de escalado que no son más que valores mínimos de efectos a partir de los cuales se puede causar daño al equipo objetivo o simplemente producir el escalado de los accidentes [18]-[20]-[13]. En la tabla 1 se muestran las ecuaciones que se utilizan para el cálculo.

Tabla 1: Modelos de probabilidad para cuantificar la probabilidad de escalado

Vector de escalado	Valor umbral	Tipo de modelo de probabilidad	Modelo de probabilidad	Ecuación
Radiación	$I > 15 \text{ kW/m}^2$	Modelo Probit basado en <i>tff</i> y modelos para <i>tff</i> vs. radiación.	$Y = 9.25 - 1.847 \cdot \ln(tff/60)$	1
			$\ln(tff) = -1.13 \cdot \ln(I) - 2.67 \cdot 10^{-5} V + 9.9$	2
<i>tff</i> es tiempo de falla en segundos, <i>V</i> es el volumen del tanque en m ³ , <i>I</i> es la radiación en kW/m ²				

Para el cálculo de las *Probit* se necesita conocer si el equipo analizado es atmosférico o presurizado y cuál es el posible escenario de accidente a producirse. Además, para el caso de incendios se debe calcular el tiempo de falla que depende del volumen del recipiente y las radiaciones recibidas, mientras que para las explosiones solo se requiere el valor de la sobrepresión. Una vez obtenido los valores *Probit* mediante el programa Matlab se obtiene las probabilidades de escalado de los accidentes primarios con escenario de incendio.



2.5 Etapa 5: Desarrollo de lógica *Fuzzy* en la determinación de la probabilidad de evolución en el tiempo.

Se aplica la lógica *Fuzzy* en la determinación de la probabilidad de evolución en el tiempo para el posterior desarrollo de las redes Bayesianas dinámicas.

Los juicios de los expertos en forma de expresiones lingüísticas deben primero transformarse en números difusos y luego agregarlos en un número difuso llamado posibilidad difusa (FP).

Los factores de ponderación de los expertos se calculan de acuerdo con lo mostrado por [11]. Según [21] si un experto se considera mejor que otros, se le asigna un mayor peso. Los pesos de los expertos se obtienen estimando las puntuaciones de peso y factores de ponderación de los mismos. Al final las probabilidades difusas obtenidas se asignan como probabilidades de fallas de los eventos y barrera de seguridad en el modelo desarrollado. Por lo tanto, la lógica *Fuzzy* proporciona una herramienta para la obtención de conocimientos y la evaluación probabilística de la seguridad bajo incertidumbre en los sistemas de proceso.

2.6 Etapa 6: Desarrollo de las Redes Bayesianas Dinámicas

Una vez aplicada la lógica *Fuzzy* se realiza la simulación en el software *Hugin* de una red Bayesiana dinámica con el objetivo de pronosticar la probabilidad de accidentes de incendio considerando la evolución en el tiempo, el sinergismo entre ellos y la probabilidad conjunta del efecto dominó por incendios.

Las redes Bayesianas ordinarias se pueden extender a redes Bayesianas dinámicas (DBN), que en comparación con las ordinarias éstas facilitan el modelado explícito de la evolución temporal de variables aleatorias en una línea de tiempo discretizada, también se puede utilizar para identificar las unidades más críticas que contribuyen a los escenarios de dominó [22]-[23].

Cuando se modelan las DBN solo se tienen en cuenta dos intervalos de tiempo, esto implica que la distribución de la probabilidad conjunta de un grupo de variables aleatorias en el tiempo $t + \Delta t$ se pueda expandir a $P(U^{t+\Delta t})$ como se muestra en la ecuación 3

$$P(U^{t+\Delta t}) = P(X_1^{t+\Delta t}, X_2^{t+\Delta t}, \dots, X_n^{t+\Delta t}) = \prod_{i=1}^n P(X_i^{t+\Delta t} | X_i^t, pa(X_i^t), pa(X_i^{t+\Delta t})) \quad (3)$$

Leyenda:

$X_i^{t+\Delta t}$ y X_i^t : Copias de X_i en dos porciones de tiempo consecutivas con un intervalo de tiempo de Δt .

$pa(X_i^{t+\Delta t})$: Padres de X_i en el intervalo de tiempo $t + \Delta t$.

$pa(X_i^t)$: Padres de X_i en el intervalo de tiempo t .

La red Bayesiana dinámica al replicar una red Bayesiana ordinaria en tres segmentos de tiempo consecutivo presenta dos tipos de arcos: arcos intra-corte que son los arcos dirigidos que conectan los nodos en los mismos cortes de tiempo y los arcos temporales o entre cortes que son los arcos que unen los nodos en cortes de tiempo consecutivos [23].

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1 Análisis de los resultados del software ALOHA

Las simulaciones realizadas en el software ALOHA, se realizan con el objetivo de obtener los diferentes valores de vectores de escalado: intensidad de la radiación para escenarios de incendios. Además, se determina el alcance que tiene el accidente a través del radio de acción.

Para un mejor análisis y comprensión se dividió el área de estudio en tres, teniendo en cuenta la cercanía entre los equipos. En la figura 2 se muestra los tanques que conforman la división de dicha área.



Figura 2: Áreas de la T-320



El análisis se realiza en las tres áreas en que fue dividida el área objeto de estudio, haciendo énfasis en los tanques 17,18 y 30 de las áreas 1, 2 y 3 respectivamente debido a la posición centralizada de los mismos dentro del área, sus sustancias almacenadas de alta volatilidad e inflamabilidad, así como presentar la mayor probabilidad promedio con respecto al resto de los tanques y su gran potencial para detonar accidentes.

3.2 Estimación del alcance del escenario charco de fuego

Cuando se produce un escape o vertido de un líquido combustible sobre el suelo y se produce la ignición del líquido derramado, se produce, entonces, un charco de fuego. En este epígrafe se muestran los resultados de este escenario para los tanques primarios potenciales, correspondientes a las corridas que simulan el escenario de charco de fuego en los mismos. En las figuras 3a y 3b se muestra el alcance que tienen las radiaciones de charco de fuego con respecto al tanque 17 y los valores de intensidad de la radiación en función de las distancias.



Figura 3a: Alcance del escenario charco de fuego en el TK17

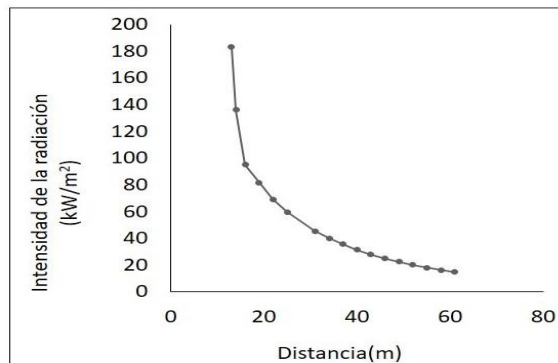


Figura 3b: Distancia vs Intensidad de la radiación en el TK 17

En la figura 3a se muestra el alcance que tiene el escenario charco de fuego en el tanque 17. Se observa como sus efectos pueden alcanzar hasta 73 m desde la fuente de explosión con una intensidad de la radiación superior de 10 kW/m^2 provocando la muerte en un intervalo de 60 segundos, hasta 100 m con radiaciones superiores a 5 kW/m^2 produciendo quemaduras de segundo grado, mientras que hasta 151 m las radiaciones alcanzadas son superiores a 2 kW/m^2 ocasionando dolor en menos de un minuto. Se aprecia además que dentro del radio de acción de este escenario existen varias unidades de procesos que son afectadas, tales resultados son similares a los obtenidos por [24] lo que evidencia que a partir de esta unidad de proceso el charco de fuego posee una elevada potencialidad de escalado y de producir efecto dominó sobre las unidades cercanas unido además a que este tanque almacena nafta, sustancia de elevada volatilidad e inflamabilidad.

En la figura 3b se observa como los valores de intensidad de la radiación disminuyen a medida que aumenta la distancia. Los niveles de radiación para este escenario independientemente de la fuente son elevados, destacándose que la curva no parte de cero ya que esta distancia corresponde al radio del charco del fuego, obteniéndose así que la máxima radiación alcanzada a partir de dicho radio para el tanques 17 es de 183 kW/m^2 . Además las llamas pueden alcanzar una distancia de 41 m, longitud influenciada por la presencia del viento pues [25]-[26] plantean que la velocidad de este sí es un parámetro que incide directamente en el ángulo de inclinación de la llama y este último a su vez, varía el diámetro del charco y la longitud de la misma.

3.2 Estimación del alcance del escenario BLEVE más bola de fuego

El escenario BLEVE más bola de fuego es un fenómeno complejo que involucra al mismo tiempo características de explosión y de incendio, originado fundamentalmente a partir de la ocurrencia de un accidente primario por lo que es considerado como posterior o secundario [27]. En las figuras 4a y 4b se



muestra el alcance que tienen las radiaciones de charco de fuego con respecto al tanque 17 y los valores de intensidad de la radiación en función de las distancias.

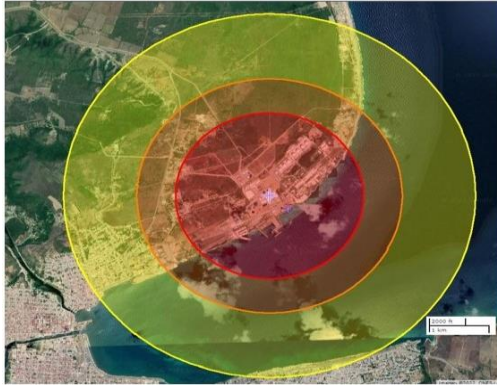


Figura 4a: Alcance del escenario BLEVE más bola de fuego en el TK17

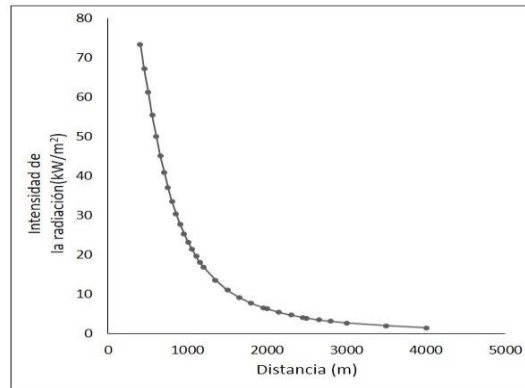


Figura 4b: Distancia vs Intensidad de la radiación en el TK17

En la figura 4a se evidencia el gran impacto de este escenario capaz de cubrir toda el área de la empresa y alcanzar poblados aledaños afectando no sólo al personal de la planta sino también a los pobladores de zonas cercanas. La zona roja, cuyas radiaciones son superiores a 10 kW/m^2 , se alcanza en los tanques 17 para una distancia de 1,6 km, siendo según [28] potencialmente letales en un intervalo de 60 segundos para todas las personas que se encuentren en este radio. Para una distancia de 2,2 km se obtiene en el tanque 17 la zona naranja, provocando quemaduras de segundo grado en un intervalo de 60 segundos. Además, se obtienen radiaciones superiores a 2 kW/m^2 para una distancia de 3,5 km, causando un dolor en las personas en un intervalo de 60 segundos.

En la figura 4b se aprecia como los valores de intensidad de la radiación disminuyen a medida que aumenta la distancia. Además se obtienen las máximas radiaciones generadas a partir de la ocurrencia de una bola de fuego (producto de un BLEVE) para el tanque 17 teniendo un valor de $73,3 \text{ kW/m}^2$, resultados similares a los obtenidos por [29].

La duración de este escenario oscila entre los 30 a 45 segundos, no obstante a pesar de su poca duración provoca daños considerables ya que su alcance logra traspasar todo el área y zonas aledaños y las dimensiones de las bolas de fuego formadas pueden ser extraordinariamente grandes constituyendo así un accidente mayor según [30]-[31], de ahí que resulte imprescindible el perfeccionamiento de las medidas de prevención para reducir así a niveles tolerables sus consecuencias.

3.2 Cuantificación de la probabilidad de escalado de los accidentes.

Estos valores se introducen en ALOHA, con otro conjunto de datos, con el objetivo de determinar el valor del vector de escalado radiación para cada escenario que se pueda manifestar en cada unidad de proceso en función de la distancia. Con estos valores de los vectores de escalado se determina la probabilidad de escalado de cada tanque respecto a las unidades de procesos.

En el área 1 la radiación térmica más elevada es producida por el tanque 17 sobre el tanque 16 con un valor de intensidad de la radiación de 18 kW/m^2 y por el tanque 22 sobre el 23 con un valor de $18,4 \text{ kW/m}^2$. En el área 2 los mayores valores corresponden al tanque 20 con respecto al tanque 21 con radiaciones de $37,9 \text{ kW/m}^2$ pues a pesar de que el tanque 20 presenta la menor capacidad de almacenamiento de todas las unidades de proceso, son dichos tanques los más cercanos en toda la planta distanciados a tan solo 18 metros. Le sigue en esa misma área el tanque 18 con respecto al 20 con un valor de intensidad de la radiación de $33,2 \text{ kW/m}^2$. En el área 3 se tiene que el mayor nivel de intensidad de radiación emitido es del tanque 30 para el tanque 38 con un valor de $26,1 \text{ kW/m}^2$ distanciados a tan solo 78 m.

Luego de analizar los valores de los vectores de escalado así como los resultados de probabilidad y las distancias a las que se alcanzan los umbrales establecidos, se seleccionan las unidades tanque 17, 18 y 30 como los posibles equipos a desarrollar accidentes primarios en las tres áreas analizadas, pues son los más



susceptibles a provocar el escalado a partir de la ocurrencia de un charco de fuego de producir efecto dominó. Dichos tanques se toman como representación de cada una de las áreas mostradas en la figura 2. A partir de la aplicación del análisis histórico de accidentes y del árbol de eventos evidencian que la nafta es una de las sustancias con mayores probabilidades de provocar un charco de fuego y explosión de nube de vapor con valores de 0,0150 y 0,0135 respectivamente debido a su elevada volatilidad e inflamabilidad, y que en caso de que ocurra un derrame de nafta es más probable que se incendie y provoque un charco de fuego que una nube de vapor. Dichos valores son altos de acuerdo a lo reportado por [29]-[12].

3.3 Resultados de la lógica *Fuzzy* para cuantificar la probabilidad de evolución en el tiempo en la red Bayesiana dinámica por incendio.

Antes de confeccionar DBN es indispensable la cuantificación de la probabilidad de evolución en el tiempo debido a incendios. Para ello se utiliza el criterio de expertos en función de tres factores fundamentales: la relación entre el tiempo de falla y el tiempo del accidente (TTF- TACC), la probabilidad de escalado por radiación térmica (PERAD) y los efectos de mitigación (MIT).

En las figuras 5a y 5b se muestran las superficies de respuesta para determinar la probabilidad de evolución en el tiempo (PDT).

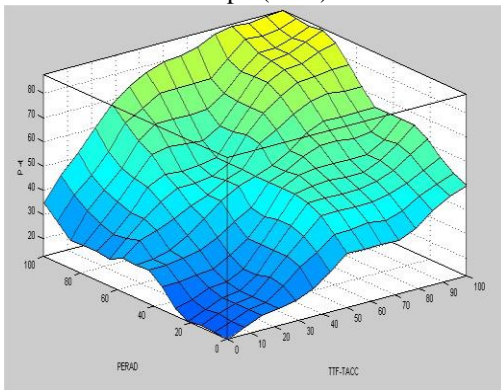


Figura 5a: Relación entre el tiempo de accidente y el tiempo de falla vs la probabilidad de escalado

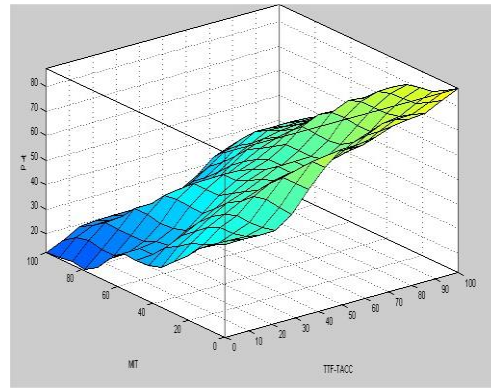


Figura 5b: Relación entre el tiempo de accidente y el tiempo de falla vs acciones de mitigación

Estas figuras evidencian el carácter directo del TTF- TACC y el PERAD con respecto al PDT, lo cual indica que si aumenta el tiempo de accidente y el tiempo de falla o la probabilidad de escalado se obtiene una mayor probabilidad de evolución en el tiempo, caso contrario ocurre si aumentan las acciones de mitigación. Los resultados respecto a los valores de probabilidad de evolución en el tiempo obtenidos se muestran en la tabla 2

Tabla 2: Resultados relacionados a la probabilidad de evolución en el tiempo en el área analizada

U/P primaria	U/P afectada	TACC/TTF	TTF-TACC	PERAD	MIT	PDT
TK17-1	TK16	5,52	100,00	43,64	50	65,00
TK16-1	A2	2,18	100,00	3,07	50	51,00
A3-1(TK30)	A1	3,90	100,00	21,19	50	61,90
A1-1(TK13)	A2	1,65	88,10	0,87	50	45,50
A2-2(TK18)	A1(TK13)	0,87	33,50	0,02	50	23,20
A2(TK20)	A2-1	6,92	100,00	60,26	50	74,00



En la tabla 2 se muestra que el mayor valor de probabilidad de evolución en el tiempo es de un 74,00% y corresponde para la evolución de los posibles incendios en el área 2 donde se sitúan los tanques de almacenamiento de gasolina de aviación. Esto se debe a que existen valores de probabilidad de escalado por radiación térmica superiores respecto a otras áreas por su cercanía a las mismas. En segundo lugar se encuentra la probabilidad de evolución en el tiempo para el tanque 17. Esta unidad de proceso es clave para el inicio de la cadena de eventos debido a los altos valores de radiación que puede llegar a generar una vez que ocurra un charco de fuego en la misma. Por esa razón y debido a su posición centralizada en el área se toma como unidad primaria en la evolución del efecto dominó por incendios. En cuanto a los valores del factor TTF-TACC, para la mayoría de los casos se obtiene el máximo valor probabilístico posible lo cual implica que con las medidas de seguridad que se tienen en estos momentos no es posible detener la evolución del efecto dominó ya que los tiempos de falla son significativamente menores que los tiempos del accidente. Para todas las unidades se toma un valor medio de seguridad industrial de ahí que el factor de mitigación sea de un 50%.

3.3 Resultados de la red Bayesiana dinámica desarrollada por incendio.

Las redes Bayesianas dinámicas permiten modelar sistemas dinámicamente y cuantificar la probabilidad de accidentes teniendo en cuenta la posible evolución en el tiempo y el sinergismo entre los posibles escenarios [32]-[33]-[34]-[10]. En esta investigación se realiza para pronosticar la probabilidad de accidentes de incendio y la probabilidad conjunta de este escenario.

En la figura 6 se muestra la arquitectura de la red Bayesiana dinámica a partir de un accidente primario de charco de fuego en el tanque 17.

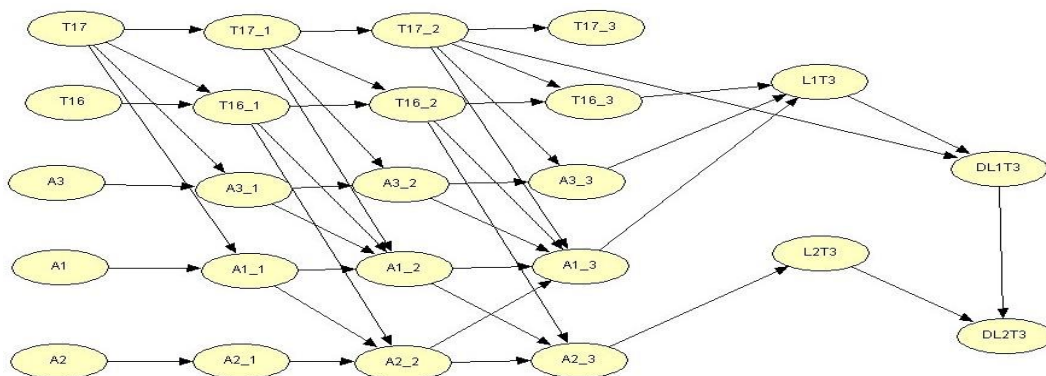


Figura 6: Arquitectura de la red Bayesiana dinámica desarrollada a partir de un accidente primario de charco de fuego en el tanque 17

Como se muestra en la figura 6 se desarrolla la arquitectura considerando tres intervalos de tiempo fundamentales, por esa razón cada unidad de proceso tiene su réplica para t1, t2 y t3. Además fue necesario agrupar los tanques en áreas por su cercanía: el área 1(A1) contiene los tanques de almacenamiento de diésel y turbocombustible (TK24, TK25, TK26, TK23, TK22, TK13) y se toma como representativo de esta área el tanque 26 (por su cercanía con el TK17), el área 2 (A2) que contiene los tanques que almacenan gasolina de aviación (TK20, TK21, TK18, TK74, TK19) siendo el representativo el tanque 18 por su mayor volumen y su cercanía al resto de las áreas, mientras que el área 3 (A3) contiene tanques que almacena fuel oil y diésel (TK30, TK38, TK1, TK4) siendo el tanque 1 el representativo. Se toma como suceso iniciador un charco de fuego en el tanque 17, como evento secundario se toma el charco de fuego en el tanque 16, el área 1 y área 3 (con sus unidades representativas) y como suceso terciario se toma el charco de fuego en el área 2 cuya unidad representativa es el tanque 18.

En las figuras 7a y 7b se muestran los valores de probabilidad previa para la ocurrencia de incendios correspondientes a la simulación de la red bayesianas dinámicas. Para el desarrollo de esta red fue necesario desarrollar previamente cinco redes: tres ordinarias (para la interacción de los eventos entre una misma área) y dos dinámicas (para la evolución en los tiempos t1, t2).

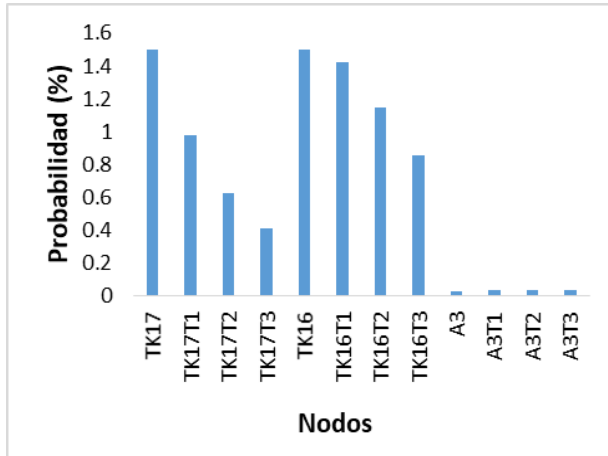


Figura 7a: Probabilidades de accidente para cada uno de los nodos del TK17, TK16 v A3

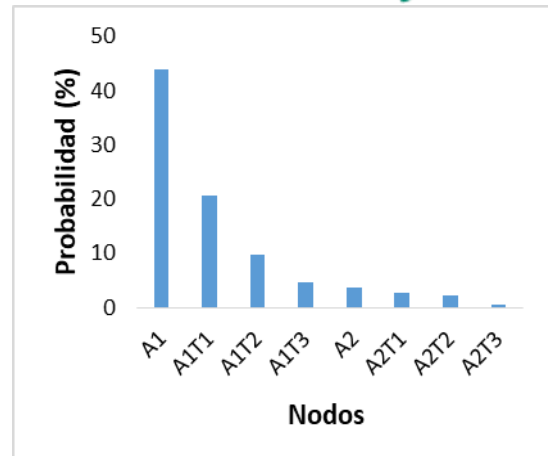


Figura 7b: Probabilidades de accidente para cada uno de los nodos del A1 y A2

Los mayores valores de probabilidad corresponden a las áreas A1 y A2 con valores cercanos al 45 y 4% respectivamente. Estos valores son elevados acorde a lo planteado en la literatura especializada por [12] y [24]. Esto se debe a que sobre estas áreas se ejerce mayor influencia del sinergismo producto a la radiación térmica generada en estos charcos de fuego. Luego, para los tanques 17 y 16 se obtienen valores similares con un tope de 1,50%, valores reportados como medios; mientras que para el área A3 valores bajos de 0,04% debido a que esta área se encuentra a mayor distancia del resto de las áreas y por ende, recibe menos efecto sinérgico producto a la radiación térmica. En la generalidad de los casos, a medida que transcurre el tiempo disminuye la probabilidad de accidente de charco de fuego debido a las acciones de mitigación posibles que se pueden desarrollar en ese lapso.

En la figura 8 se muestran los valores de probabilidad de los nodos auxiliares DLi, necesarios para la cuantificación de la probabilidad de efecto dominó de los diferentes niveles.

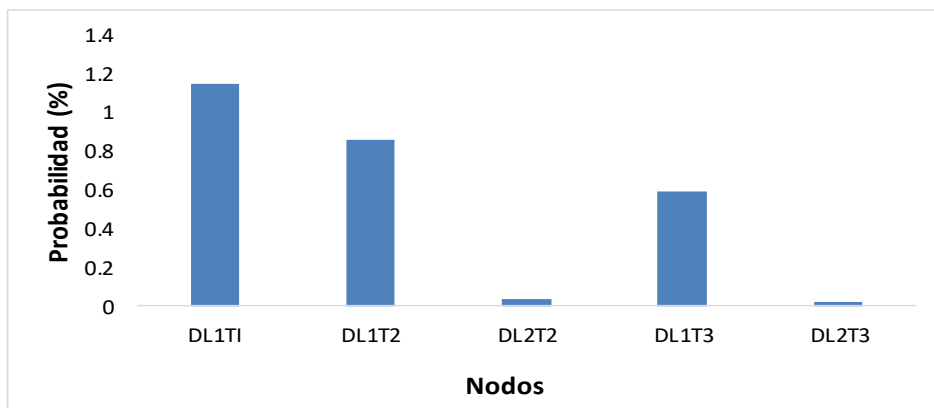


Figura 8: Probabilidades de accidente para los nodos auxiliares DLi

Para t1 solo existe efecto dominó al primer nivel de escalado (DL1t1) con un valor de 1,15%, valor medio acorde a los expertos [12]. Para t2 y t3 el efecto dominó se extiende hasta el segundo nivel de escalado, aunque para este nivel la probabilidad es mucho menor que para el primero. La probabilidad conjunta es de 0,90 y 0,61% para t2 y t3 respectivamente. Se muestra de forma consistente una disminución de la probabilidad de efecto dominó en el tiempo debido a las acciones de mitigación que se puedan desarrollar.

En la figura 9 se muestra la probabilidad del efecto dominó a diferentes niveles de ocurrir un accidente en cada una de las unidades de procesos analizadas.

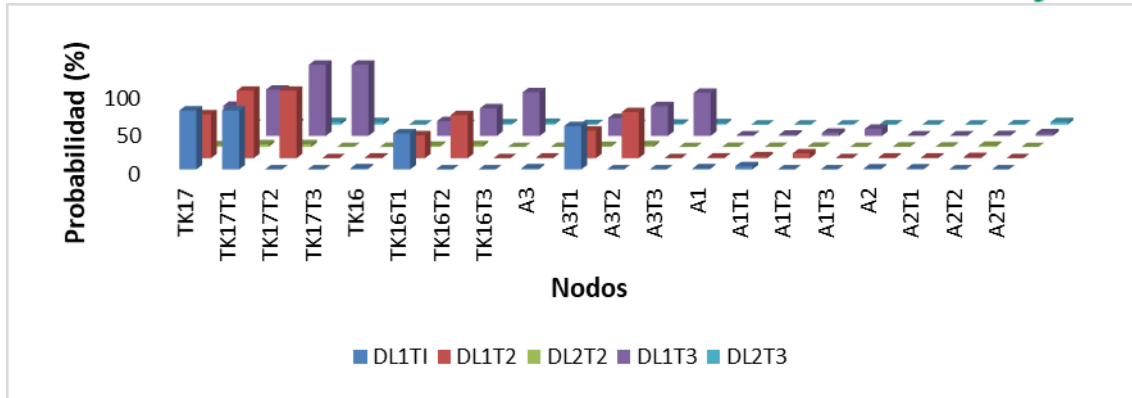


Figura 9: Probabilidades del efecto dominó al ocurrir un accidente para cada una de las unidades de proceso del área analizada

Para el caso de las unidades conformadas por los tanques 17, 16 y el área A3 se obtienen valores altos de probabilidad de efecto dominó según los reportados por la literatura especializada [12]-[29]. El valor de probabilidad conjunta para la ocurrencia de un charco de fuego en el tanque 17 es de 76,74% que representa un potencial elevado de efecto dominó por radiación térmica.

4. CONCLUSIONES

La combinación acertada de técnicas de inteligencia artificial como las redes Bayesianas dinámicas y la lógica Fuzzy, así como su integración con técnicas de análisis de riesgo clásicas permitió determinar que el potencial del efecto dominó es elevado. De todos los escenarios provocados por un derrame inicial de la sustancia, el BLEVE más bola de fuego es el que presenta mayor radio de afectación, alcanzando sus radiaciones hasta 3.5 km del origen del accidente. A partir de la combinación del análisis histórico de accidentes con el árbol de eventos se obtuvo que la nafta es una de las sustancias con mayores frecuencias iniciales probabilísticas de provocar un charco de fuego y explosión de nube de vapor con valores de 0,0150 y 0,0135 respectivamente debido a su elevada volatilidad e inflamabilidad. El desarrollo de la lógica Fuzzy evidencia que el mayor valor de probabilidad de evolución en el tiempo es de un 74,00% y corresponde para la evolución de los posibles incendios en el área 2 donde se sitúan los tanques de almacenamiento de gasolina de aviación. El desarrollo de las redes Bayesianas dinámicas evidencian que el tanque 17 es la unidad más propensa a detonar la cadena de eventos dominó de todas las unidades de proceso con una probabilidad conjunta de 76,74 % para el escenario de incendio. La metodología propuesta fue incorporada al índice *Fire and Explosion Economic Losses Index* (FEEL-Index) que permite cuantificar las pérdidas económicas de accidentes producto a incendio y explosión y su efecto dominó[34].

Yanelys Cuba Arana agradece a los directivos del área de almacenamiento de hidrocarburos que facilitaron los datos para la metodología propuesta.

5. REFERENCIAS

- [1] Casal, Joaquín; Montiel, Helena; Planas, Eulalia; Vílchez, Juan. Análisis del riesgo en instalaciones industriales. 2da ed. Barcelona: Ediciones UPC. 2002. 362 p
- [2] Goerlandt, Floris; Khakzad, Nima; Reniers, Genserik. Validity and validation of safety related quantitative risk analysis: A review. *Safety Science*. [en línea]. Volume 99. Pages 127-139. 2017. Disponible en www.elsevier.com/locate/ssci.
- [3] Kong, D., Liu, P., Zhang, J., Fan, M., y Tao, C. Small-scale experiment study on the characteristics of boilover. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. 2017



20 del 28 de noviembre al 2 de diciembre del 2022
**CONVENCIÓN CIENTÍFICA
DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**
PALACIO DE CONVENCIONES DE LA HABANA

58
ANIVERSARIO
cujae

- [4] Rostamabadi, A., Jahangiri, M., Zarei, E., Kamalinia, M., y Alimohammadlou, M. A novel Fuzzy Bayesian Network approach for safety analysis of process systems; an application of HFACS and SHIPP methodology. *Journal of Cleaner Production*. 2019
- [5] Tauseef, S., Abbasi, T., Pompapathi, V., y Abbasi, S. Case studies of 28 major accidents of fires/explosions in storage tank farms in the backdrop of available codes/standards/models for safely configuring such tank farms. *Process Safety and Environment Protection*. 2018
- [6] Landucci, G; Necci, A; Antonioni, G; Argenti, F; Cozzani, V. Risk assessment of mitigated domino scenarios in process facilities. *Reliability Engineering and System Safety*, 160, pp. 37-53. 2017
- [7] Swuste, P., Van Nunen, K., Reniers, G., y Khakzad, N. Domino effects in chemical factories and clusters: an historical perspective and discussion. *Process Safety and Environment Protection*. 2019
- [8] Reniers, Genseric; Cozzani, Valerio. *Domino Effects in the Process Industries. Modeling, Prevention and Managing*. Elsevier. 372 p. 2013
- [9] S. Nasiri, M.R. Khosravani, K. Weinberg. Fracture mechanics and mechanical fault detection by different methods of artificial intelligence. A review, *Engineering Failure Analysis*. 2017
- [10] Kouk, H ; Siti, Z ; Ezutah, U. Integrating fuzzy expert system and scoring system for safety performance evaluation of offshore oil and gas platforms in Malaysia. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 56 p 32-45. 2018.
- [11] Molina, J.L., Pulido-Velázquez, D., García-Aróstegui, J.L., y Pulido-Velázquez, M. Dynamic Bayesian networks as a decision support tool for assessing climate change impacts on highly stressed groundwater systems. *Journal of Hydrology*, 2013, 479, 113-129.
- [12] Zarel, E ; Khakzad, N ; Cozzani, V ; Reniers, G. Safety analysis of process systems using Fuzzy Bayesian Network (FBN). *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*. Vol. 57 p 7-16. 2019.
- [13] Orozco, J.L., Van Caneghem, J., Hens, L., González, L., Lugo R., Díaz, S. y Pedroso, I. Assessment of an ammonia incident in the industrial area of Matanzas. *Journal of Cleaner Production*. 2019.
- [14] Jones, R., Lehr, W., Simecek-Beatty, D. y Michael Reynolds, R. ALOHA (Areal Locations of Hazardous Atmospheres) 5.4.4. Seattle, Washington. Department of Commerce national Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA). 2013
- [15] Meteogalicia. ALOHA v 5.4.1.2. y MARPLOT v 4.1.2. Manual de Usuario. Versión 1. Actividad 4. Tarea 4.2.1. The Atlantic Regions' Coastal Pollution Response. ARCOPOL. 2011
- [16] Changlong, Zhu; Juncheng, Jiang; Xiongjun, Yuan. Study on ignition probability of flammable materials after leakage accidents. *Procedia Engineering*. Volume 45. Pages 435-441. 2012.
- [17] BEVI. Reference Manual BEVI Risk Assessments. Versión 3.2. Netherlands. 2009
- [18] Kadri, F., y Chatelet, E. Domino Effect Analysis and Assessment of Industrial Sites: A Review of Methodologies and Software Tools. *International Journal of Computers and Distributed Systems*, 2 (3), 2014. 1-10. hal-01026495
- [19] Kamil, M.Z., Taleb-Berrouane, M., Khan, F., y Ahmed, S. Dynamic Domino Effect Risk Assessment Using Petri-nets. *Process Safety and Environmental Protection*. 2019.
- [20] Zhang, L., Landucci, G., Reniers, G., Khakzad, N. y Zhou, J. DAMS: A Model to Assess Domino Effects by Using Agent-Based Modeling and Simulation. *Risk Analysis*. 2017.
- [21] Lavasani, S.M.M., Wang, J., Yang, Z. y Finlay, J. Application of MADM in a fuzzy environment for selecting the best barrier for offshore wells. *Expert Systems with Applications*, 2012. 39, 2466-2478.
- [22] Khakzad, N. A Tutorial on Fire Domino Effect Modeling Using Bayesian Networks. *Modelling*, 2021. 2, 240-258.
- [23] Khakzad, N., Reniers, G., Abbassi, R., y Khan, F. Vulnerability analysis of process plants subject to domino effects. *Reliability Engineering and System Safety*. 2016
- [24] Dueñas, J.A., Orozco, J.L., Furka, D., Furka, S., Boza; Arana, Y. C., Febles, D., González, A., y Barrera, M.C. A new Fuzzy- Bayesian approach for the determination of failure probability due to thermal radiation in domino effect accidents. *Engineering Failure Analysis*, 2021, 120.
- [25] Wells, G. *Major Hazards and their management*. Gulf Publishing Company. Houston, Texas. 2003.
- [26] Fabbri, L Binda, M Bruinen de Bruin, Y. *Accident Damage Analysis Module (ADAM) – Technical Guidance*, EUR 28732 EN, 2017, ISBN 978-92-79-71879-3, 2017.
- [27] Gyenes, Z., Wood, M. y Struckl, M. *Handbook of Scenarios for Assessing Major Chemical Accident Risks*. JRC Technical Reports, 1- 116, 2017.



20 del 28 de noviembre al 2 de diciembre del 2022
**CONVENCIÓN CIENTÍFICA
DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA**
PALACIO DE CONVENCIONES DE LA HABANA

58
ANIVERSARIO
cujae

- [28] ALOHA.EPA Software.2016 Recuperado de: www.epa.gov/comeoloha-software.
- [29] Dueñas, J.A., Orozco, J.L, Febles, D., Furka, D., Furka, S., y García, A. Using integrated Bayesian-Petri Net method for individual impact assessment of domino effect accidents. Journal of Cleaner Production.2021
- [30] HSE.Annual Science Review. Helping Great Britain work we. 2018. Disponible en: <http://www.hse.gov.uk/horizons/>.
- [31] Nwabueze, Dili. Liquid hydrocarbon storage tank fires- How prepared is your facility? Chemical Engineering Transactions. Vol.48, p301-306. 2016. Disponible en: www.aidic.it/cet.
- [32] Zeng, T., Chen, G., Yang, Y., Chen, P., y Reniers, G. Developing an advanced dynamic risk analysis method for fire-related domino effects. Process Safety and Environmental Protection.2019
- [33] Hu, J., Zhang, L., Tian, W., y Zhou, S. DBN based failure prognosis method considering the response of protective layers for the complex industrial systems. Engineering Failure Analysis.2017
- [34] Santana, J. A. D., Arana, Y. C., Gómez, O. G., Furka, D., Furka, S., Orozco, J. L., . . . Febles, J. S. Fire and Explosion Economic Losses (FEEL) Index: A new approach for quantifying economic damages due to accidents in hydrocarbon storage sites. Process Safety and Environmental Protection. 2022.

Sobre los autores

Yanelys Cuba Arana

Graduada de Ingeniería Química en 2021 por la Universidad de Matanzas. Adiestrada del Centro de Estudios de Fabricación Avanzada y Sostenible(CEFAS) en la Universidad de Matanzas. Los trabajos investigativos desarrollados están en el campo de la Inteligencia Artificial aplicada a los procesos industriales, específicamente, a la gestión de riesgos y seguridad industrial teniendo en cuenta las afectaciones sobre las personas, el medio ambiente, la economía y la sociedad. Además, el uso de herramientas de avanzada como la lógica Fuzzy, redes bayesianas y redes Petri para la cuantificación de la frecuencia del efecto dominó de accidentes de incendio, explosión y nubes tóxicas.

Julio Ariel Dueñas Santana

Profesor Instructor. Master en Ingeniería Asistida por Computadoras. En estos momentos se encuentra haciendo un doctorado en la Universidad de Napoli Federico II en Modeling and Engineering Risk and Complexity. Los trabajos investigativos desarrollados están en el campo de la Inteligencia Artificial aplicada a los procesos industriales, específicamente, a la gestión de riesgos y seguridad industrial teniendo en cuenta las afectaciones sobre las personas, el medio ambiente, la economía y la sociedad.

Ramón Quiza Sardiñas

Ingeniero Mecánico, en 1999, y de Doctor en Ciencias Técnicas (en la especialidad de Construcción de Maquinarias), en 2005, ambos por la Universidad de Matanzas. Desde 2010 es Profesor Titular y, actualmente, dirige el Centro de Estudio de Fabricación Avanzada y Sostenible (CEFAS), en la Universidad de Matanzas. Sus intereses de investigación se centran en la fabricación inteligente, la sostenibilidad y la inteligencia artificial aplicada. Es miembro de la Academia de Ciencias de Cuba, del Consejo Técnico Asesor del Ministerio de Educación Superior, de la Unión de Informáticos de Cuba, de la Sociedad Cubana de Matemática y Computación y de la Sociedad Económica de Amigos del País. Pertenece, además, al comité editorial de dos revistas científicas internacionales.