

# PROPUESTA METODOLÓGICA PARA LA CONFECCIÓN DEL ÁRBOL DE SUCESOS EN PLANTAS INDUSTRIALES DE HIDROCARBUROS.

**Ing. María Caridad Hernández Brizuela<sup>1</sup>, Ing. Alejandro Díaz Linares<sup>2</sup>**

*1. Universidad de Matanzas – Sede “Camilo Cienfuegos”, Vía  
Blanca Km.3, Matanzas, Cuba.*

*2. Planta de Procesamiento de Crudo. Empresa de Perforación y  
Extracción de Petróleo del Centro. Finca “La Cachurra”,  
Guásimas, Cárdenas, Matanzas, Cuba. [adias@epepc.cupet.cu](mailto:adias@epepc.cupet.cu).*

## Resumen.

La evaluación de riesgos y sus consecuencias aparejadas es muy importante desde el punto de vista del conocimiento, sobre la base de estos resultados se encaminan acciones para evitar o minimizar cada uno de ellos. Existen varias técnicas identificativas y de evaluación de riesgos las cuales son utilizadas mundialmente para la preparación de estudios de este tipo. El Árbol de Sucesos es una de ellas, su principal limitación es el cálculo de sus probabilidades para cada nodo de decisión, autores como (Wells, 2003) han realizado estudios satisfactorios en esta índole. La presente investigación realiza una propuesta metodológica para ciertos nodos de este Árbol así como de sus probabilidades, aplicada fundamentalmente a las plantas donde se manejan hidrocarburos, incorporando características atmosféricas y operacionales entre otras.

**Palabras claves:** *Árbol de Sucesos, plantas de hidrocarburos, metodología, nodos de decisión, probabilidades.*

---

## Introducción.

Los métodos de análisis de riesgos utilizados hasta el momento en la evaluación de accidentes mayores pueden subdividirse en dos grupos fundamentalmente, métodos cualitativos y métodos cuantitativos o semicuantitativos. Los métodos de análisis cualitativos según (Gabarrell, 2008) son los que tienen como objetivo identificar riesgos, causas y efectos sin recurrir al análisis numérico. Los métodos de evaluación semicuantitativos o cuantitativos a consideración de diferentes autores son aquellos que, no llegando al detalle y rigor de una evaluación cuantitativa del riesgo, suponen un avance hacia ello desde los métodos cualitativos, en el sentido que son métodos que dan como resultado una clasificación relativa del riesgo asociado a una planta química o a partes de la misma. Existen cinco limitaciones inherentes a todas las técnicas de identificación de riesgos las cuales quedan definidas por (Casal *et al.*, 2001), estas son: la exhaustividad del estudio, la reproducibilidad de los resultados, lo inextricable de las conclusiones, la

importancia de la experiencia y el nivel de confianza generado por el estudio. Pese a las limitaciones aparentes de estas técnicas de análisis, debe señalarse su versatilidad y su amplia utilización. En realidad, la experiencia demuestra que, en una gestión del riesgo adecuada, basada siempre en la identificación correcta el número de accidentes tiende a disminuir paralelamente a la disminución de la magnitud de sus consecuencias. En lo adelante se hace énfasis fundamentalmente en la técnica correspondiente al Árbol de Sucesos.

## Desarrollo.

- Árbol de Sucesos como técnica identificativa de análisis de riesgos.

El Árbol de Sucesos es un modelo lógico que matemática y gráficamente retrata la combinación de eventos de fallo y circunstancias en una sucesión de incidentes, expresado como una estimación anual. (Nolan, 2011). Son la mejor herramienta para el análisis de consecuencias. Son usados para realizar análisis probabilísticos. Se organiza mediante una estructura de árbol en la que cada bifurcación se decide a partir de la ocurrencia de un fenómeno u otro. (Wells, 2003). La construcción del árbol comienza por la identificación de los n factores condicionantes de la evolución del suceso iniciador. A continuación, se colocan estos como cabezales de la estructura gráfica. Partiendo del iniciador se plantean sistemáticamente dos bifurcaciones: en la parte superior se refleja el éxito o la ocurrencia del suceso condicionante y en la parte inferior se representa el fallo o no ocurrencia del mismo. De esta forma, se obtienen  $2^n$  combinaciones o secuencias teóricas. Sin embargo, las dependencias entre los sucesos hacen que la ocurrencia o éxito de uno de ellos pueda eliminar la posibilidad de otros, reduciéndose así el número total de secuencias. La disposición horizontal de los cabezales se suele hacer por orden cronológico de evolución del accidente. (Wells, 2003 y “Dirección General de Protección Civil y Emergencias”, 2016).

(Wells, 2003) establece los siguientes pasos para el análisis de Árboles de Sucesos:

- Identificar el evento iniciador que generalmente es un evento de fallo correspondiente al escape de un material peligroso.
- Identificar el desarrollo del incidente.
- Construir el árbol de eventos. Este es construido de izquierda a derecha, en cada nodo se muestran las alternativas analizadas.
- Clasificar los resultados del incidente.
- Estimar la posibilidad de ocurrencia de cada suceso.
- Clasificar los resultados y determinar su probabilidad.

(Díaz, 2013) afirma que, a partir de los estudios de los registros históricos de accidentes realizados por (Wells, 2003) éste define las probabilidades de ocurrencia de sucesos tales como: la aparición de un escape, la posibilidad de una ignición inmediata, el tipo de clima, la explosión de la nube de vapor, la intrusión de una llama y las acciones de mitigación. Algunas de las probabilidades son:

- Probabilidad de ignición inmediata produciendo un dardo de fuego: 0.1
- Probabilidad de que no ocurra ignición inmediata: 0.9
- Probabilidad de explosión de la nube de vapor con estabilidad atmosférica D: 0.25
- Probabilidad de explosión de la nube de vapor con estabilidad atmosférica F: 0.66
- Probabilidad de la *BLEVE*: 0.5
- Probabilidad de piscina de fuego (ignorada para caso de gas): 0

(Santos, 2010) define una escala capaz de clasificar las probabilidades de ocurrencia de sucesos atendiendo a su frecuencia según se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 1. Escala de probabilidad cuantitativa y cualitativa.

Frecuencia	Escala de probabilidad
1 en 10	Frecuente
1 en 100	Probable
1 en 1000	Ocasional
1 en 10000	Remoto
1 en 100000	Improbable
1 en 1000000	Extremadamente remoto

Fuente: Santos, (2010).

(Wells, 2003) señala que, la probabilidad para los diferentes sucesos, por él calculada, pueden ser usadas para plantas similares y que en el caso de las estabildades atmosféricas su cálculo depende de las condiciones climatológicas de la zona de estudio. Autores como (Casal *et al.*, 2001) y (Wells, 2003) le atribuyen ventajas a esta técnica muy similares a las de los árboles de fallos y entre sus limitaciones principales citan: la laboriosidad del trabajo y la incertidumbre del valor de los resultados.

- Ruta metodológica para la confección del Árbol de Sucesos en cualquier tipo de instalación industrial según (Wells, 2003).
1. Identificar el evento iniciador que generalmente es un evento de fallo correspondiente al escape de un material peligroso.
  2. Identificar el desarrollo del incidente.
  3. Construir el árbol de eventos. Algunas consideraciones a tener en cuenta son:
    - El Árbol de Sucesos debe ser construido de izquierda a derecha.
    - En cada nodo debe mostrarse cada alternativa de eventos que puede afectar de una manera u otra el desarrollo del accidente.
    - Cada suceso debe ser indicado sobre cada uno de los nodos, en los cuales la respuesta “si” o “puede ocurrir” corresponde a la rama superior y “no” o “no puede ocurrir” corresponde a la rama inferior.
  4. Clasificar los resultados del incidente. El Árbol de Sucesos se desarrolla tan lejos como sea el resultado que se quiere obtener en el estudio. Lo más razonable es llevar el análisis hasta la ocurrencia del accidente mayor.
  5. Estimar la probabilidad de ocurrencia de cada suceso a cada nodo, así como a la ocurrencia del suceso iniciador le corresponde una probabilidad o frecuencia de que ese suceso haya ocurrido.
  6. Clasificar los resultados y determinar su probabilidad. La frecuencia de cada resultado es determinada multiplicando la frecuencia de ocurrencia del suceso iniciador con las probabilidades condicionales a lo largo de cada camino de desarrollo hasta el suceso final. El cálculo no asume la dependencia de sucesos parciales.
    - Propuesta metodológica para la confección del Árbol de Sucesos en plantas de hidrocarburos.

A continuación, se define la secuencia lógica para cada nodo de decisión que compone el Árbol de Sucesos y cómo calcular cada una de sus probabilidades de ocurrencia o no ocurrencia.

1. Cálculo de la probabilidad de ocurrencia o frecuencia de ocurrencia de un suceso iniciador. Los sucesos iniciadores generalmente se encuentran registrados en bases de datos ya sean de carácter internacional o en los propios registros de incidentes de cada planta de procesos industriales, por consiguiente, también puede obtenerse sus valores de ocurrencia generalmente en períodos anuales. Los sucesos iniciadores en este tipo de instalaciones están asociados generalmente al vertido accidental de líquidos o vapores, a las fugas de gases más pesados que el aire, a los derrames de hidrocarburos sobre el suelo, a la deposición de hidrocarburos sobre el suelo o sobre estructuras de depósitos circundantes entre otras.
2. Tipo de atmósfera o clase de estabilidad atmosférica existente o predominante en la zona de estudio. Para determinar qué clase de estabilidad existe o predomina en la zona que se estudia es necesario primeramente realizar un estudio detallado del clima, para el mismo son necesarios determinados conocimientos tales como: meses y horas promedios donde tienen lugar el o los accidentes, valores de velocidades y frecuencia del viento en las direcciones más probables o en aquellas que sean de interés por la investigación, valores promedios de humedad, temperatura y nubosidad en dichas condiciones entre otras. En caso de ser imposible la determinación de las clases de estabilidad que predominan en la zona, esto puede ser resuelto evaluando para condiciones de estabilidad extremas, o sea, condiciones muy estables y condiciones muy inestables. Debe señalarse que a pesar de poder evaluar el árbol de esta manera no necesariamente sus resultados serán los más representativos del área puesto que, quizás no sean estas las condiciones atmosféricas más frecuentes en la zona.

3. Probabilidad de ignición inmediata. Tratándose esta investigación sobre accidentes en plantas de hidrocarburos, y conocidas las características de volatilidad e inflamabilidad de dichas sustancias, es muy posible que, si a su paso estas encuentran una fuente de ignición, sean capaces de incendiarse con mucha facilidad. Por supuesto, de ahí la importancia de valorar la ocurrencia de ignición inmediata, según estudios bibliográficos la inmediatez se encuentra referida a los primeros 60 segundos después de ocurrida la avería, puesto que, en este lapso de tiempo es prácticamente imposible la toma de medidas para mitigar o eliminar una ignición retardada si existen las condiciones, en muchos casos ni siquiera se detectan los incidentes en este breve período de tiempo. La probabilidad de ocurrencia de una ignición retardada ha sido definida por (Wells, 2003), siendo esta de 0,1, mientras que lógicamente la probabilidad de que no ocurra es de 0,9. Siempre que tenga lugar una ignición inmediata el resultado final de esta cadena queda delimitado por un chorro de fuego si se trata de un gas o un charco de fuego si se trata de un líquido. En el caso que no ocurra ignición inmediata se valora la posibilidad de ocurrencia de ignición retardada.
4. Probabilidad de ignición retardada. La ignición retardada se considera a aquella ignición de hidrocarburo que tiene lugar un minuto después y en lo adelante de un derrame o fuga de sustancia, o sea cuando ya deje de considerarse ignición inmediata. Esta a su vez, depende igualmente a la ignición inmediata de que, la fuga o derrame con condiciones de inflamabilidad encuentre a su paso una fuente de ignición, además de las condiciones atmosféricas existentes. Por ejemplo, para atmósferas de tipo F, la probabilidad de ocurrencia de una ignición de este tipo es de 0,33, mientras que, para atmósferas de tipo D la probabilidad de ocurrencia de ignición retardada es de 0,47 según (Wells, 2003). En aquellos casos donde no existe la ignición inmediata ni retardada, el resultado de estas cadenas se considera como la formación de una nube tóxica. Sin embargo, en aquellos casos donde no



exista ignición inmediata, pero tenga lugar la ignición retardada, debe considerarse la posibilidad de explosión de la nube de vapor que se forma.

5. Explosión de la nube de vapor. Generalmente es conveniente evaluar la explosión de la nube de vapor en aquellos casos donde tiene lugar la ignición retardada pues, los vapores se acumulan en forma de nubes las cuales, aun encontrando a su paso fuentes de ignición pueden o no ser capaces de incendiarse, puesto que ahora depende de las condiciones de inflamabilidad y estas a su vez depende de la relación aire-combustible y del grado de dispersión atmosférica existente. La probabilidad de que una nube con condiciones de inflamabilidad explote posee el valor de 0,66 según (Wells, 2003).
6. Aislamiento del área donde ocurre el escape. Este nodo corresponde netamente a las acciones desencadenadas en las plantas por cada equipo de trabajo para la puesta fuera de servicio del área donde está ocurriendo el incidente. Operacionalmente implicaría cerrar todo tipo de entrada de contaminantes para minimizar los caudales de vertido, desviando el flujo de proceso hacia otros depósitos seguros o alejados de dicho lugar; de esta forma desaparecería la continuidad de la fuente de emisión. En casos donde se haya procedido a poner fuera de servicio estas áreas de peligro se le hace corresponder la probabilidad de 0,46. (Hernández, 2017).
7. Acciones de lucha contra incendios. Se tiene en cuenta las acciones de lucha, extinción o mitigación de fuegos, su objetivo fundamental es la disminución de los efectos colaterales, o sea, sobre equipos de procesos o instalaciones adyacentes y cercanas. En el caso de que existan tanques cercanos con hidrocarburos contenidos en su interior, la respuesta rápida de enfriamiento es la principal acción de lucha contra incendios. Esto puede anular el efecto dominó de la acción del fuego circundante sobre dicho tanque. A las probabilidades de que se realicen o no acciones de este tipo le corresponden valores igualitarios de 0,5 definidos por (Wells, 2003).

8. Intrusión de llama. La intrusión de llama juega un papel muy importante en aquellos incendios de hidrocarburos en forma de llamaradas o chorros de fuegos, esta viene dada por el alejamiento o acercamiento de la llama al depósito de donde proviene el chorro de fuego, en casos de que exista intrusión de la llama ésta será capaz de calentar suficientemente el recipiente hasta lograr su explosión. Sus valores probabilísticos han sido calculados por (Wells, 2003) y son de 0,1 para la intrusión y 0,9 para la no intrusión.

Una vez determinado cada nodo de decisión y sus valores pertinentes de probabilidades de ocurrencia o no, se cuantifica cada cadena de sucesos del árbol y a cada una se le otorga el escenario de riesgo correspondiente, los cuales están dados por: chorros de fuegos (gases), charcos de fuegos (líquidos), llamaradas, *BLEVE*, explosión de una nube de vapor y nube tóxica, entre otros escenarios que pueden manifestarse en tanques de hidrocarburos. A cada una de estas cadenas de sucesos le corresponde un valor probabilístico final el cual se determina como la productoria de cada una de las probabilidades correspondientes a cada bifurcación de cada nodo de decisión de la cadena.

## Conclusiones.

El Árbol de Sucesos es una técnica confiable y relativamente sencilla en la identificación de los riesgos inherentes a plantas de procesos industriales. Permite el conocimiento de las probabilidades de ocurrencia de cada uno de los riesgos que se pueden manifestar en dichas instalaciones expresadas como valores anuales de frecuencia. Según la propuesta metodológica que se incorpora, es posible realizar un estudio climatológico de la zona de estudio, lo cual es muy importante pues brinda resultados más confiables y representativos de la zona de estudio. Con la nueva propuesta se logran incorporar nodos de decisión afines e inteligentes para las plantas de hidrocarburos, como las acciones para la puesta fuera de servicio del área afectada, las acciones de mitigación de lucha contra incendios y la intrusión de llama.

## Bibliografía.

1. CASAL, J. Análisis del riesgo en instalaciones industriales. *Edicions UPC*. 2001.
2. DÍAZ A. Análisis y evaluación de riesgos en la planta de gas de la Empresa Comercializadora de Combustibles de Matanzas. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos. 2013.
3. DIRECCIÓN GENERAL DE PROTECCIÓN CIVIL Y EMERGENCIAS. Métodos cualitativos. España. 2016.
4. GABARREL X. Evaluación y prevención de riesgos industriales en Centroamérica. Documenta Universitaria Girona. España. 2008.
5. HERNÁNDEZ M.C. Determinación y evaluación de riesgos en la Planta de Procesamiento de Crudo de la Empresa de Perforación y Extracción de Petróleo del Centro. Tesis presentada en opción al título de Ingeniero Químico. Universidad de Matanzas Camilo Cienfuegos. Cuba. 2017.
6. SANTOS G.C. Análisis del riesgo individual: Explosión de un ducto de gas natural. Tesis presentada en opción al título de Maestro en Ciencias en Ingeniería de Sistemas. Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica. Unidad Profesional Zacatenco Adolfo López Mateos. México. 2010.
7. WELLS, G. *Majors Hazards and their management*. Gulf Publishing Company. Houston, Texas. 20