



MODELO DE VULNERABILIDAD AL VIENTO PARA COMPONENTES DE PLANTAS DE REFINERÍA O INSTALACIONES INDUSTRIALES: UN ESTUDIO PRELIMINAR.

N. Bonfante¹ & J.P. Pinelli²

¹ Candidato a Doctorado, Florida Institute of Technology, USA, nbonfante@my.fit.edu

² Profesor, Florida Institute of Technology, USA, pinelli@fit.edu

Los autores, con el apoyo del Centro de Impacto y Desempeño en Infraestructuras al Viento (WHIP-C, por sus siglas en inglés), están desarrollando modelos de vulnerabilidad al viento para instalaciones industriales de gran envergadura, como plantas de refinería. Esta investigación presenta numerosos desafíos, ya que dichas instalaciones se distribuyen en extensas áreas de terreno que pueden experimentar grandes variaciones en las velocidades del viento, la fricción superficial, la topografía, etc. Al mismo tiempo, pueden presentar una gran variación en los componentes de la infraestructura, incluyendo estaciones de energía, bastidores de tuberías, tanques, almacenes, grúas, torres, etc. Los autores proponen descomponer las instalaciones en unos pocos sub-sistemas para los cuales puedan utilizar modelos de riesgo convencionales: es decir, un sitio, un peligro, una vulnerabilidad. Luego, combinarán (no necesariamente sumarán) los modelos basándose en las intercorrelaciones entre los sub-sistemas. En este enfoque similar al juego “Lego”, se podrían insertar y conectar componentes típicos de vulnerabilidad, como bloques de Lego, para producir una vulnerabilidad al viento agregada de todo el sistema. Los autores informarán sobre los resultados preliminares de la investigación, que implican una extensa revisión de la literatura, consultas con expertos y la priorización de ciertos sub-sistemas para un análisis en profundidad. Los temas clave incluyen la comprensión del daño relacionado con el viento, la determinación del equipo más vulnerable, la exploración de fuentes de fugas de contaminantes, la revisión de especificaciones y planes de mitigación existentes, y el desarrollo de modelos de vulnerabilidad al viento basados en componentes para tanques y bastidores de tuberías. La investigación tiene como objetivo mejorar la preparación y evaluar el riesgo ante peligros de viento en instalaciones industriales. Se presta especial atención al vínculo entre el peligro del viento y los accidentes Natech (es decir, desastres tecnológicos desencadenados por un evento natural, en este caso una tormenta de viento). Eventos de viento catastróficos pueden resultar en fallas de componentes industriales que, a su vez, pueden llevar a la liberación de sustancias tóxicas y al fallo de sistemas de seguridad. Una modelización adecuada de la vulnerabilidad al viento de las plantas industriales debería conducir a una mejor gestión del riesgo Natech. Este tema debería ser de especial interés para la conferencia, dada la incidencia del cambio climático en las Américas, como lo ejemplifican eventos de tormenta en Brasil (Catarina en 2004), México (Otis en 2023) y Argentina (diciembre de 2023).

Introducción

En el contexto del cambio climático y el incremento en la frecuencia e intensidad de eventos meteorológicos extremos, la evaluación de la vulnerabilidad de infraestructuras críticas se ha convertido en una prioridad. Las plantas de refinería e instalaciones industriales, dada su complejidad y la diversidad de componentes que las integran, presentan desafíos únicos en términos de modelización de su vulnerabilidad al viento. Estas instalaciones, distribuidas sobre extensas áreas de terreno, están expuestas a variaciones significativas en las velocidades del viento, la fricción superficial y la topografía, lo cual complica aún más su análisis de riesgo.

La presente investigación, con el apoyo del Centro de Impacto y Desempeño en Infraestructuras al Viento (WHIP-C, por sus siglas en inglés), propone un enfoque innovador para abordar esta problemática. A través del desarrollo de modelos de vulnerabilidad al viento para plantas de refinería e instalaciones industriales, este estudio preliminar busca superar las limitaciones de los métodos convencionales, mediante la descomposición de las instalaciones en subsistemas, se aplica una metodología de modelización de riesgos que contempla la singularidad de cada equipo, así como las vulnerabilidades asociadas. Este enfoque permite una evaluación más granular y precisa de los riesgos.

Dada la incidencia del cambio climático en las Américas y los recientes eventos de tormentas extremas en países como Brasil, México y Argentina, este estudio no solo es relevante por su contribución a la ciencia de la ingeniería y la gestión de riesgos, sino también por su potencial impacto en la preparación y respuesta ante desastres en instalaciones industriales críticas.

Metodología aplicada

La metodología propuesta se basa en un análisis sistemático y estructurado de la vulnerabilidad al viento en refinerías y otras instalaciones industriales. La implementación involucra distintas fases, resumidas a continuación, y detalladas en las siguientes secciones de la publicación:

1. **Búsqueda exhaustiva bibliográfica:** Se ha llevado a cabo una revisión comprensiva de la literatura existente para identificar metodologías anteriores y de avanzada en la evaluación de riesgo y vulnerabilidad al viento en infraestructuras industriales. Las secciones siguientes describen los resultados de esta búsqueda, que permitió determinar los componentes críticos de la infraestructura y comprender las limitaciones de los modelos previos y existentes.
2. **Consultas con Expertos:** Se efectuaron consultas con expertos para enriquecer los hallazgos de la revisión literaria y adquirir un conocimiento práctico sobre los retos de modelar la vulnerabilidad al viento en instalaciones de gran escala.
3. **Descomposición en subsistemas:** un enfoque modular, similar al juego de "Lego", permite la integración de componentes de vulnerabilidad como bloques para generar un modelo agregado de vulnerabilidad al viento del sistema completo. Las instalaciones se segmentan en subsistemas, lo cual facilita la aplicación de modelos de riesgo convencionales (un sitio, un peligro, una vulnerabilidad) a componentes más pequeños y menos complejos. La priorización de subsistemas específicos también facilita el análisis en profundidad, abordando aspectos críticos como la comprensión del daño relacionado con el viento, la identificación de equipos vulnerables y la revisión de planes de mitigación existentes.

Búsqueda Bibliográfica

Daño relacionado con el viento

El análisis del impacto del viento en estructuras industriales destaca la complejidad y diversidad de estos sistemas. Diferente a edificaciones residenciales o comerciales, las instalaciones industriales presentan una variabilidad significativa en términos de susceptibilidad al daño por viento. Esto se debe a la diversa naturaleza de sus componentes, que pueden estar situados al aire libre, en interiores o en locaciones híbridas. Además, el valor de la maquinaria y equipos, tanto mecánicos como eléctricos, a menudo excede por mucho al valor de las estructuras que los albergan, introduciendo un nivel de riesgo y consideración económica considerable en la gestión de estas instalaciones. Stedman & Vojjala (2023) subrayan cómo, dentro de una gran instalación industrial, estructuras como oficinas y almacenes pueden seguir convenciones comunes, pero elementos

específicos como bastidores de cañerías y tanques de almacenamiento presentan desafíos únicos debido a sus componentes más matizados y diferentes modos de falla. La importancia de entender estos riesgos se ve amplificada por las consecuencias potencialmente graves de daños físicos, falta de accesibilidad y paradas de seguridad, que pueden tener efectos de amplio alcance.

Las preocupaciones sobre daños estructurales a tuberías y equipos son particularmente críticas, dado que eventos como fuertes lluvias y tormentas severas no solo pueden dañar infraestructuras críticas como refinerías de petróleo y tanques de almacenamiento, sino también provocar fugas de sustancias peligrosas. Omidvar (2023) ilustra cómo las refinerías, por ejemplo, son vulnerables a daños estructurales significativos ante la fuerza de huracanes y tornados, lo que puede llevar al colapso de unidades de procesamiento y destrucción de instalaciones de almacenamiento. Este tipo de daño no solo representa pérdidas económicas substanciales, sino que también plantea riesgos severos de seguridad y ambientales, dado el potencial de accidentes catastróficos con efectos dominó, como explosiones o incendios que pueden afectar a equipo circundante.

Dada su construcción predominantemente con acero estructural, según Barto & Gardoni (2021), y su frecuente ubicación en zonas costeras vulnerables a peligros naturales como inundaciones y huracanes, Bernier & Padgett (2019a) señalan desafíos adicionales que las instalaciones industriales enfrentan. La incidencia de eventos Natech, donde daños causados por fenómenos naturales llevan a la liberación de sustancias peligrosas, es un riesgo significativo en estas áreas, como destacan Salzano et al. (2013). Estos desafíos subrayan la necesidad de una planificación cuidadosa y preparación para mitigar riesgos asociados con desastres naturales y fortalecer la resiliencia industrial frente a tales eventos.

La adaptación de códigos y estándares para abordar específicamente la definición de cargas de viento en instalaciones petroquímicas y otras industrias es aún un área en desarrollo. Wong et al. (2012) resaltan cómo, en ausencia de directrices completas, muchos ingenieros y compañías han tenido que desarrollar sus propios procedimientos y técnicas para calcular estas cargas, enfatizando la necesidad de innovación y adaptación en la industria.

La creciente población y desarrollo industrial en áreas propensas a peligros también conduce a amenazas potenciales mayores de Natechs. Sengul et al. (2012) muestra como el mayor número de eventos es causado por la lluvia, pero las cantidades totales de material liberado en estos eventos generalmente son pequeñas. Las liberaciones relacionadas con huracanes, en contraste, comprenden un volumen desproporcionadamente grande de liberaciones de petróleo debido a peligros naturales.

Bailey & Levitan (2008) discuten cómo las estructuras industriales, generalmente construidas de acero pesado y diseñadas para soportar cargas operativas significativas, pueden fallar de maneras específicas bajo la influencia del viento. Los tanques de almacenamiento grandes son susceptibles al colapso por las presiones laterales del viento, mientras que los tanques más pequeños pueden sufrir daños por impactos de escombros o volcarse. Este análisis subraya la complejidad de diseñar estas estructuras para resistir eventos de viento extremo, especialmente cuando muchos de los diseños únicos encontrados en estas instalaciones no están explícitamente cubiertos por los códigos y estándares de construcción actuales.

Godoy & Asce (2007) proporcionan un estudio de caso concreto sobre el impacto del Huracán Rita, destacando que el daño más significativo a las instalaciones fue causado directamente por la acción del viento, mientras que, en otros casos, como lo observado en eventos subsecuentes, las inundaciones jugaron un papel predominante. Este contraste enfatiza la variabilidad de los impactos según el tipo de evento y la necesidad de preparación y diseño resiliente ante un rango amplio de escenarios.

Mileti & Henry (1999) y Cruz et al. (2001) amplían el contexto al señalar el aumento generalizado en desastres naturales y sus pérdidas asociadas en las últimas décadas, con especial atención en cómo las refinerías y otras instalaciones de hidrocarburos han experimentado pérdidas significativas. Este panorama refuerza la urgencia de adoptar medidas de mitigación y preparación, considerando no solo el potencial de daño mínimo a moderado de huracanes de categorías inferiores sino también los efectos catastróficos de las lluvias torrenciales y las inundaciones asociadas, subrayando la importancia de una planificación integral que aborde todos los aspectos del riesgo.

Determinación del equipo más vulnerable

En el ámbito de la industria y sus vulnerabilidades frente a eventos extremos relacionados con el viento, se han realizado estudios específicos que identifican ciertos equipos como particularmente susceptibles. Omidvar (2023) destaca que elementos como los tanques no completamente llenos, los techos, las tuberías, y las conexiones entre unidades de almacenamiento y procesamiento presentan una vulnerabilidad elevada ante la destrucción causada por el viento. Esta especificidad en la identificación de riesgos es crucial para el desarrollo de estrategias de mitigación efectivas.

Cruz et al. (2001) y Liu et al. (2008) destacan particularmente las tuberías y las conexiones entre unidades de almacenamiento y de proceso como elementos altamente susceptibles. Las altas velocidades del viento no solo pueden provocar interrupciones en el suministro eléctrico o cortocircuitos, desencadenando fallos en calderas de vapor y torres de enfriamiento, sino también pueden causar la liberación de materiales peligrosos. La capacidad del viento para convertir objetos cotidianos en proyectiles, capaces de dañar equipos, romper tuberías y perforar techos de tanques, subraya la complejidad de los riesgos asociados con eventos de viento severo.

Por otro lado, Misuri et al. (2019) han contribuido con hallazgos que subrayan la particular exposición de los tanques de almacenamiento a daños estructurales directos, lo que podría resultar en la liberación de sustancias peligrosas. La importancia de estos tanques como activos críticos en escenarios de liberación química es doblemente enfatizada debido a su inherente vulnerabilidad estructural y la significativa cantidad de sustancias químicas peligrosas que albergan. En este contexto, las pautas proporcionadas por la Agencia Federal para el Manejo de Emergencias (FEMA) sobre las acciones requeridas durante emergencias, particularmente en lo que respecta al proceso preventivo de parada, se vuelven esenciales para la industria.

Además, la investigación de Misuri et al. (2019) profundiza en la vulnerabilidad de los tanques con techos flotantes durante huracanes, destacando no solo los riesgos de inundaciones sino también el impacto de lluvias severas. La severa afectación de equipos dependientes de la energía eléctrica ilustra otra dimensión de riesgo, evidenciando cómo los sistemas de control y respaldo, incluidas las barreras de seguridad como bombas contra incendios y sistemas de enfriamiento, pueden quedar inoperantes en eventos naturales extremos. Esto subraya la importancia de considerar la interdependencia de sistemas y la potencial exacerbación de consecuencias en eventos en cascada.

En la *Figura 1* que se presenta a continuación, se ilustran los distintos equipos que sufrieron pérdidas durante el huracán Harvey. Como es evidente en dicha figura, los tanques ("tank") y las tuberías ("pipe") figuran entre los principales afectados. Se observa que la categoría correspondiente a la antorcha ("flare") está significativamente marcada con una tonalidad rojiza, indicando que el 70% de los eventos registrados ya estaban programados. Por tanto, se deduce que el Huracán Harvey no constituye el factor predominante en la incidencia de estos eventos programados. El gráfico proporciona una visualización clara de la distribución y magnitud de los daños sufridos por estos componentes críticos, enfatizando su vulnerabilidad en el contexto de eventos climáticos extremos. La información contenida en esta figura subraya la importancia de dirigir las medidas de prevención y mitigación hacia estos equipos, con el fin de fortalecer la resiliencia de las instalaciones ante futuros fenómenos similares.

En el contexto de los eventos Natech, Rossi et al. (2022) identifican a los tanques de almacenamiento atmosférico y las tuberías como los componentes más críticos ante inundaciones. Este hallazgo sugiere la necesidad de una evaluación y mitigación de riesgos enfocadas en estos elementos específicos para aumentar la resiliencia ante inundaciones, así como eventos de viento.

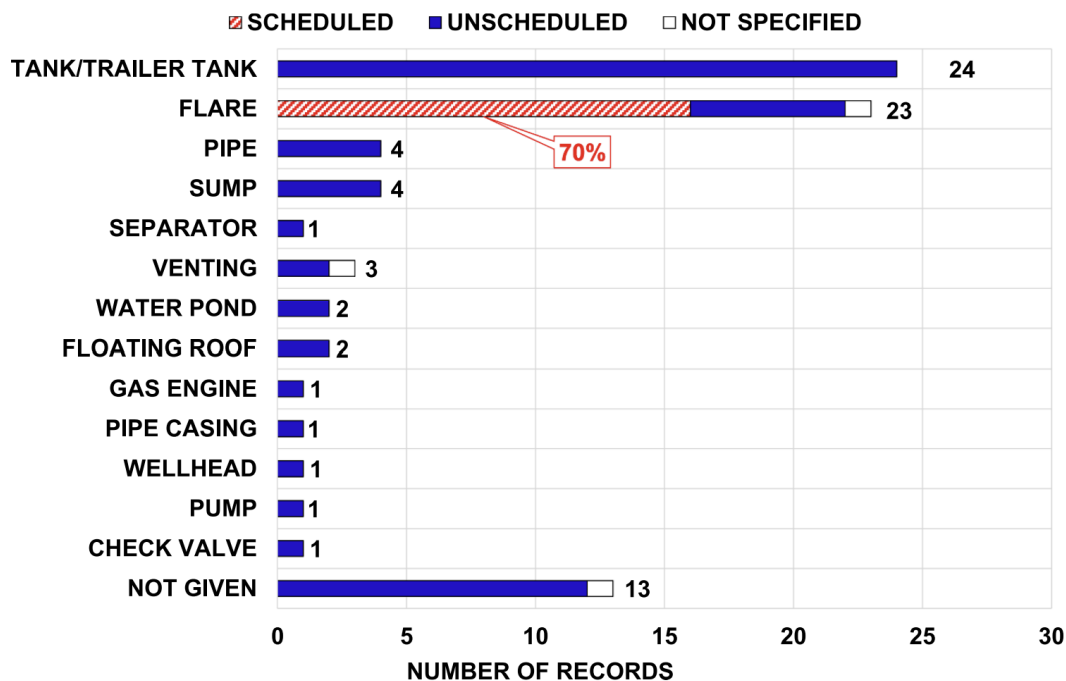


Figura 1: Equipos con pérdidas durante el huracán Harvey. Misuri et al. (2019)

Desarrollo de modelos de vulnerabilidad al viento basados en componentes

Se ha desarrollado una metodología basada en componentes que aborda la vulnerabilidad y la susceptibilidad al daño de componentes esenciales en varios tipos de grandes instalaciones industriales. Según Stedman & Vojjala (2023), es vital cuantificar con precisión la vulnerabilidad de estas valiosas instalaciones, ya que cualquier daño no solo implica pérdidas económicas considerables para los interesados, sino que, en casos de refinerías de petróleo o instalaciones de generación de energía, puede causar efectos secundarios extensos que impactan regiones o países enteros.

Además, Omidvar (2023) señala que las vulnerabilidades en el sector del petróleo y gas son diversas, estando expuestas a una amplia gama de riesgos naturales y actividades humanas. En las secciones siguientes de su análisis, se argumenta que, aunque estos sectores son susceptibles a peligros naturales y ciertos tipos de actividades, la implementación de métodos de prevención y adaptación puede no solo mitigar el riesgo y la vulnerabilidad, sino también fortalecer la resiliencia de estas infraestructuras críticas. Estos enfoques multidimensionales son fundamentales para asegurar la continuidad operativa y la protección del medio ambiente en el contexto de una gestión de riesgos efectiva.

La evaluación de la vulnerabilidad y la resistencia de los tanques de almacenamiento sobre el suelo (AST) es un tema de creciente importancia en la ingeniería estructural, especialmente debido a los desafíos que representan los eventos extremos como huracanes y tormentas. Los AST son propensos a sufrir daños significativos debido a pandeo de la carcasa del tanque; volcamiento total o parcial del tanque por efectos del viento; y daño por impacto de escombros u objetos voladores. En este ámbito, Olivar et al. (2020) han contribuido al desarrollo de una herramienta computacional para realizar análisis de fragilidad en tanques de almacenamiento verticales sometidos a peligros naturales, lo que facilita la comprensión y la mitigación de estos riesgos.

Ramírez et al. (2019)) describen cómo las evaluaciones de riesgo de AST requieren un modelo que caracterice las condiciones del peligro y modelos de fragilidad que determinen la probabilidad de daño en función de las características estructurales del AST y las condiciones del peligro. Bernier & Padgett (2019b) buscan ampliar la comprensión de los efectos concurrentes de las cargas de oleaje, ola y viento en la vulnerabilidad de los AST, desarrollando modelos de fragilidad para condiciones de tormenta de múltiples peligros y destacando la importancia de combinar estos modelos con modelos de peligro para realizar evaluaciones de riesgo integrales.

Resaltan que ignorar las cargas de oleaje puede subestimar significativamente la probabilidad de fallo, mientras que las cargas de viento tienen un efecto más limitado, pero aún significativo en la vulnerabilidad estructural, sobre todo para velocidades de viento que superan los valores de diseño.

Además, Rossi et al. (2022) proponen modelos de fragilidad específicos para tanques de almacenamiento atmosférico sometidos a cargas de inundación, oleaje y viento, utilizando análisis de elementos finitos para examinar la resistencia al pandeo y funciones analíticas de estado límite para evaluar la estabilidad contra la dislocación.

Finalmente, Bernier & Padgett (2020) presentan el desarrollo y la aplicación de modelos de fragilidad para evaluar la vulnerabilidad de techos flotantes bajo cargas de agua de lluvia, proponiendo nuevas herramientas y métodos para evaluar la vulnerabilidad de estos techos en ASTs durante tormentas de lluvia. Este trabajo subraya la necesidad de herramientas que puedan prevenir fallas futuras y que puedan adaptarse a otras infraestructuras industriales y energéticas situadas en zonas costeras susceptibles a eventos de tormenta. Además, sugieren que investigaciones futuras deberían considerar la vulnerabilidad de grupos de ASTs, ya que los efectos de grupo podrían alterar significativamente las cargas que afectan a estos tanques.

Consultas con expertos

A lo largo de este estudio, se facilitó un diálogo con especialistas en la materia, en el cual se expusieron y deliberaron los hallazgos obtenidos a partir de la revisión de literatura. Durante estas discusiones, se expusieron diversas topologías básicas aplicables a elementos específicos dentro de las industrias, tales como tanques y tuberías.

Las topologías propuestas emergen de un análisis de los estándares prevalecientes en las industrias, los cuales son un prerequisite fundamental antes de proceder con la selección o el diseño de una instalación. Entre los estándares más reconocidos se encuentran los de la ASME (American Society of Mechanical Engineers), API (American Petroleum Institute) y OSHA (Occupational Safety and Health Administration), entre otros. Estos estándares, que consolidan una multiplicidad de decisiones dentro del ámbito industrial, han sido el punto de partida para el desarrollo detallado de los tanques y los piperacks. No obstante, el presente documento se enfocará exclusivamente en exponer una fracción de la topología concerniente a los tanques.

Se estableció una distinción primordial en la primera jerarquía del árbol de decisión, diferenciando entre tanques que operan bajo presión y aquellos a presión atmosférica, como puede observarse en la *Figura 2*. Subsecuentemente, se desglosan en subclases, las cuales se ilustran gráficamente en las *Figura 3* y *Figura 4* para facilitar la interpretación rápida y eficaz de las categorías mencionadas.

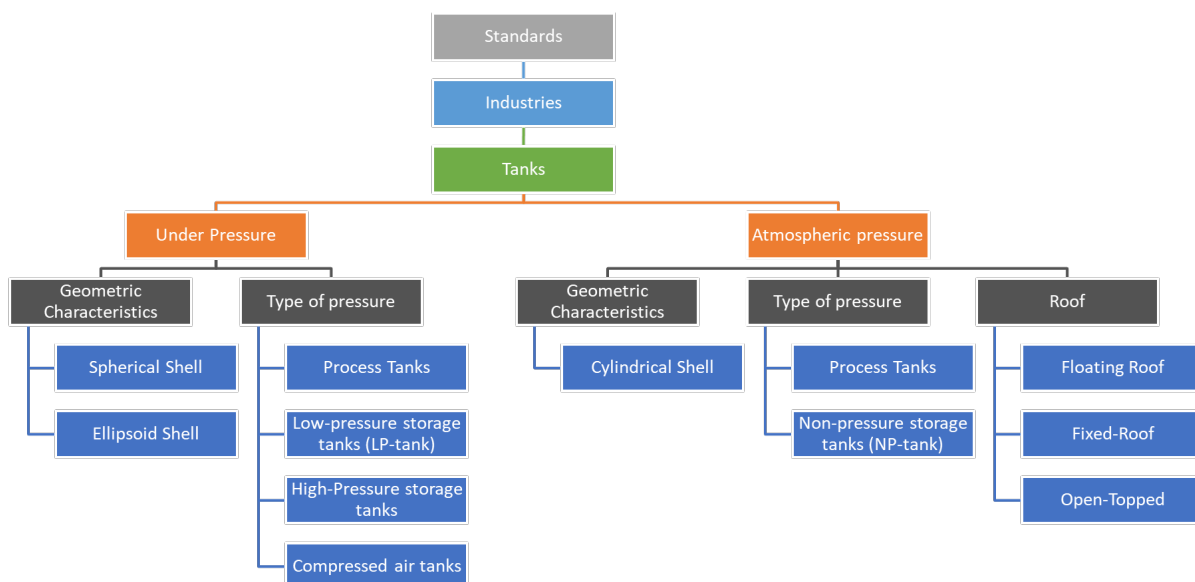


Figura 2: Topología general de tanques

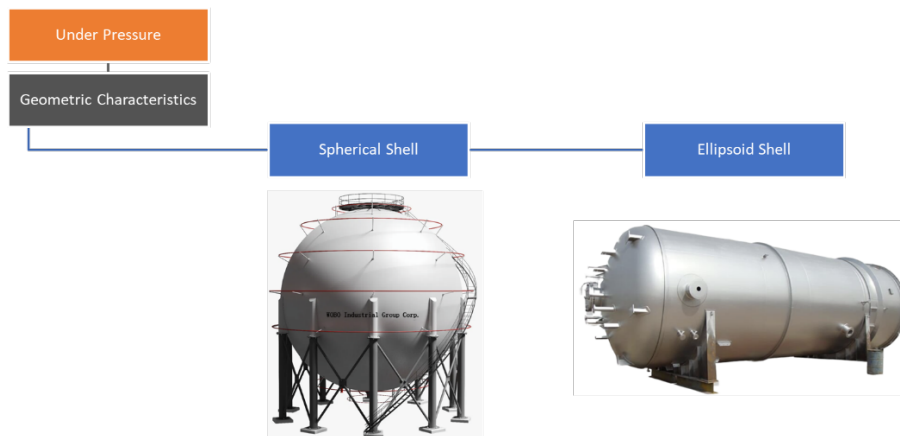


Figura 3: Topología geométrica de tanques bajo presión

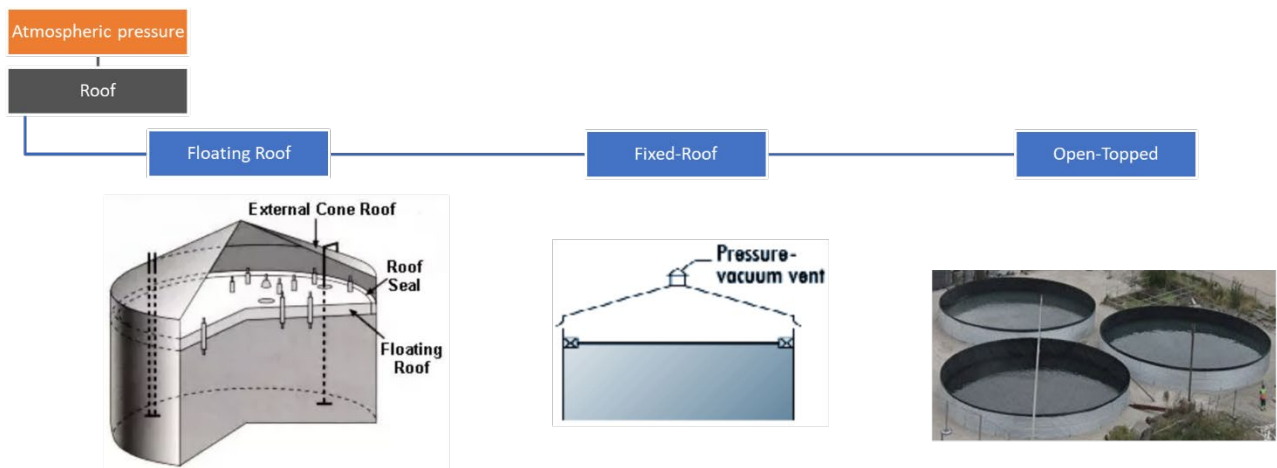


Figura 4: Topología de techos de tanques a presión atmosférica

Se alcanzó un consenso significativo entre los expertos respecto a la identificación de aquellos equipos más propensos a presentar vulnerabilidades, lo cual concuerda en gran medida con la información reportada en las fuentes bibliográficas consultadas. De manera específica, se acordó que las instalaciones que mayormente presentan afectaciones son los tanques y las tuberías.

Además, se investigó la posibilidad de desarrollar una tipología estandarizada para las refinerías. No obstante, este esfuerzo enfrentó desafíos considerables debido a la complejidad inherente a la diversidad de factores, procesos y productos presentes en las operaciones, lo cual obstaculiza la formulación de una clasificación unificada.

Las deliberaciones concluyeron con el acuerdo unánime de la importancia crítica de elaborar un marco que mejore la comprensión de las interacciones entre los distintos equipos dentro de las instalaciones. Este conocimiento profundo es clave para enriquecer nuestra comprensión sobre la operatividad global de las refinerías, resaltando la urgencia de adoptar un enfoque holístico. Dicho enfoque facilitaría la identificación de vulnerabilidades potenciales, permitiendo la implementación de estrategias de mitigación más efectivas.

Resultados preliminares

Dada la imposibilidad de generar una representación virtual o esquemática de una refinería o industria que sea aplicable de manera simultánea en múltiples ubicaciones, se procedió a la búsqueda de documentación relevante con el fin de unificar criterios industriales e identificar tanto los equipos como sus interrelaciones. En este proceso, se destacó la importancia de un tipo de documentación conocida como Diagrama de Flujo de Proceso (PFD, por sus siglas en inglés). Este documento es de vital importancia y aporta un valor significativo, dado que no solo es uno de los primeros en ser desarrollados en las etapas iniciales de un proyecto, sino que también constituye uno

de los principales documentos de referencia, al ser el encargado de detallar el flujo de materiales a través del proceso industrial. Para la elaboración de este marco conceptual, se optó por utilizar como referencia la visión esquemática proporcionada por la Occupational Safety and Health Administration (OSHA) del gobierno de los Estados Unidos. Este esquema se ilustra en la *Figura 5*.

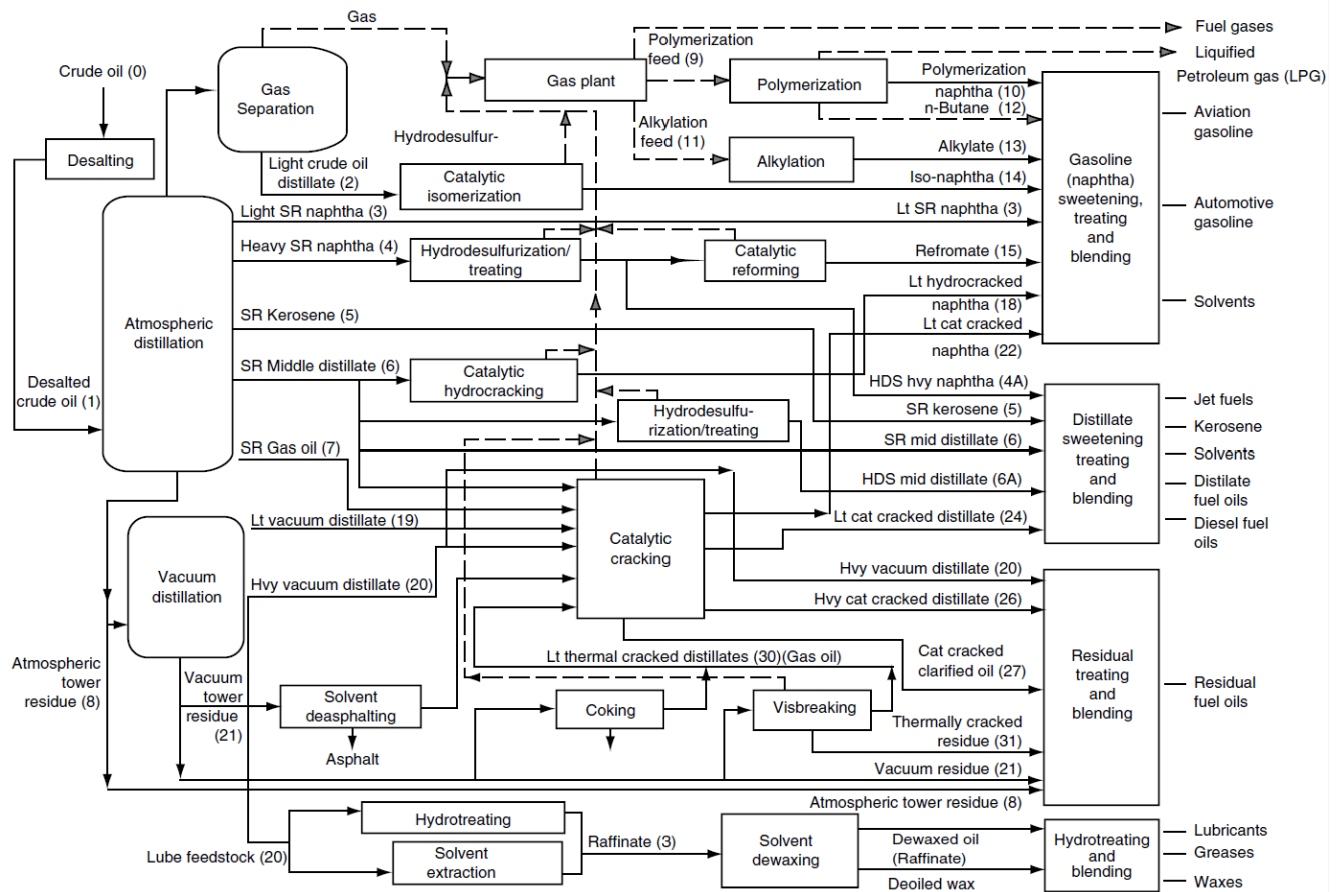


Figura 5: Visión esquemática de una refinería. Manual técnico de OSHA, Sección IV, Capítulo 2, Procesos de Refinación de Petróleo. Speight J., The Chemistry and Technology of Petroleum (2006)

Utilizando la representación esquemática proporcionada en la *Figura 5*, se logró la delineación de 71 procesos integrales, abarcando desde la entrada del petróleo crudo hasta la salida del producto finalizado de la instalación. De manera gráfica, la *Tabla 1* sintetiza este contenido, facilitando una visión general del mismo. El valor agregado de esta tabla radica en su capacidad para permitir a los usuarios una rápida identificación de los equipos que componen la refinería en cuestión. Paralelamente, en el curso de la elaboración de esta tabla, se identificaron 64 interacciones distintas entre los equipos, información de suma importancia para apoyar nuestras iniciativas en desarrollo.

El objetivo de la *Tabla 1* es facilitar la rápida identificación de los equipos que componen la infraestructura de una refinería. Este recurso se ha elaborado con una gran precisión en los detalles, asegurando que cada ítem se corresponda claramente con el equipo relevante. La tabla está concebida para ser utilizada por aseguradoras e industrias que buscan evaluar y discernir sus vulnerabilidades operativas. La relevancia de la información contenida en la tabla es significativa, ya que revela las interconexiones entre los equipos y la lógica inherente al desarrollo de flujos de proceso y a la identificación de riesgos internos.

Se anticipa que la tabla servirá como una herramienta valiosa para que las aseguradoras y las industrias reconozcan y comprendan sus puntos de vulnerabilidad más críticos. Los datos presentados tienen como finalidad proporcionar una comprensión preliminar y una clasificación adecuada del diseño operativo de una refinería.

La información se ha dispuesto en orden alfabético, comenzando por el producto final, ya que tal enfoque restringe el espectro de variables a considerar. Esta metodología contrasta con la que parte de la materia prima, la cual

requeriría una mayor cantidad de datos para un análisis efectivo. Los datos provienen de un análisis detallado de diagramas esquemáticos estandarizados por OSHA, y dada la naturaleza establecida de los procesos de refinación, la tabla no requiere actualizaciones frecuentes.

La tabla actualmente consta de 71 filas y 9 columnas, y aunque aún están pendientes ciertos ajustes menores, la estructura general que detalla las relaciones entre equipos es robusta y permite derivar diversas métricas, como el número de equipos involucrados en el proceso, las opciones disponibles, y el número de posibles interconexiones a partir de un mismo equipo.

En cuanto a su adaptabilidad, aunque el enfoque primario de la tabla está en las refinerías, la metodología aplicada podría extenderse a otras industrias. Se considera que la interfaz de la tabla es intuitiva y de tal claridad que no requiere una guía de usuario para su manejo.

En conclusión, la tabla en cuestión proporciona una representación detallada de los equipos involucrados en el proceso de refinación, así como de las interconexiones existentes entre ellos. El enfoque principal de este instrumento es facilitar un análisis exhaustivo de vulnerabilidad a través de la metodología denominada "Lego", que permite una inspección sistemática y modular de cada equipo y sus interacciones correspondientes. Este enfoque modular no solo es ideal por su aplicabilidad, sino también por la flexibilidad que ofrece al examinar cada componente individualmente.

Para profundizar en la eficacia de la metodología "Lego", se identifica como paso siguiente la necesidad de catalogar de manera más exhaustiva la topología de los diversos equipos. Al hacerlo, se mejoraría significativamente la precisión de los resultados obtenidos. Este enriquecimiento de la información topológica permitirá refinar aún más las evaluaciones de vulnerabilidad y, por ende, impulsará la optimización de las estrategias de mitigación de riesgos en las operaciones de refinación.

Tabla 1: Representación resumida de la secuencia operativa en refinerías, desde la recepción de la materia prima hasta la obtención del producto final.

Producto Final	Instalación anterior	Instalación anterior 2	Instalación anterior x	Materia Prima
Gasolina para automóviles	Tratamiento y mezcla de gasolina	Isomerización catalítica	...	Petróleo crudo
Queroseno	Tratamiento y mezcla de destilados	Hidrosulfuración	...	Petróleo crudo
...	...	...	...	...
Queroseno	Tratamiento y mezcla de destilados	Destilación atmosférica	...	Petróleo crudo

Iniciativas en desarrollo

A medida que delineamos nuestra metodología futura, estamos en las fases preliminares de forjar una estrategia metodológica. En este momento de desarrollo activo, proyectamos que las etapas subsiguientes serán:

1. En el proceso de desarrollo de nuestro modelo de riesgo, aún nos resta precisar cuáles serán las entradas específicas del mismo. Es imperativo realizar un análisis exhaustivo para determinar si el Diagrama de Flujo de Procesos (PFD) con el que contamos, acompañado de un inventario completo que debemos elaborar, incluyendo todos los componentes posibles, será suficiente para definir la exposición de la industria a los riesgos pertinentes.
2. Adicionalmente, es de suma importancia reconocer que, dentro de cada complejo industrial, existen equipamientos que desempeñan roles fundamentales y otros que cumplen funciones más complementarias. Por ende, es crucial identificar cuáles son los componentes clave, no solo por su

vulnerabilidad intrínseca sino también por su papel crítico en el proceso de producción. Este discernimiento es esencial para garantizar la precisión y relevancia de nuestro modelo de riesgo.

3. La adquisición de un conocimiento profundo sobre los equipos, sus características y la variedad de sus atributos constituye una premisa esencial para nuestro proyecto. Dicho entendimiento nos capacitará para clasificar el equipamiento en categorías distintivas que, además, se relacionen interactivamente con otros dispositivos dentro del entorno industrial. Esta organización sistemática es clave para la construcción de un modelo de operación cohesivo y funcional. Por otro lado, la identificación meticulosa de las características clave de cada componente es una tarea de inestimable valor. Reconocer y documentar estos aspectos críticos nos permitirá concentrar nuestros esfuerzos en la recopilación de datos precisos y relevantes. Este proceso es de vital importancia y repercutirá directamente en la integridad y efectividad de nuestro modelo de riesgo, asegurando así su aplicabilidad y confiabilidad.
1. Desarrollo de modelos de vulnerabilidad basados en componentes: Para subsistemas prioritarios, como tanques y bastidores de tuberías, se desarrollarán modelos de vulnerabilidad al viento específicos. Estos modelos se basarán en la evaluación de las características de diseño, las especificaciones de construcción y los potenciales modos de falla ante eventos de viento extremo.
2. Integración de modelos de subsistemas Los modelos de vulnerabilidad desarrollados para los distintos subsistemas se integrarán, considerando las interrelaciones entre ellos, para generar un modelo comprensivo de vulnerabilidad al viento para la instalación completa. Este proceso incluirá la evaluación de efectos de interacción y la acumulación de riesgos entre los componentes de la infraestructura.
3. Validación del modelo se procederá a la validación del modelo comparando sus resultados con datos de eventos de viento históricos y la retroalimentación de los expertos implicados. Este paso garantizará que los modelos sean realistas y representen de manera fidedigna la vulnerabilidad de las instalaciones industriales al viento.

Conclusión

Después de haber identificado a los tanques de almacenamiento y a los bastidores de tuberías (piperacks) como componentes críticos, aún queda un extenso camino por recorrer. La frecuencia creciente de eventos naturales adversos, las consecuentes pérdidas materiales y la necesidad de avances que marchen al unísono son evidentes. Es imperativo que tanto las entidades aseguradoras como las aseguradas puedan operar en un entorno de menor incertidumbre y tomar decisiones informadas respecto a su capital invertido en maquinaria e infraestructura.

Hasta el momento, hemos adquirido el conocimiento de que las refinerías no se adhieren a un diseño preestablecido; por el contrario, su configuración se ajusta conforme a los espacios disponibles y sus requisitos específicos. A su vez, aunque estas instalaciones procesen la misma materia prima, como el crudo, y produzcan idénticos productos, tal como el gasoil para aviones, no necesariamente contarán con las mismas instalaciones. Esta variabilidad complica la tarea de caracterizar la industria, ya que no se dispone de elementos uniformes para tal fin. El documento más aproximado a una herramienta de caracterización es el Diagrama de Flujo del Proceso (PFD, por sus siglas en inglés), el cual ofrece una representación del flujo operativo de la planta.

Se ha identificado la necesidad de desarrollar una herramienta específica que facilite el análisis de este tipo de industrias, permitiendo identificar su disposición espacial para comprender integralmente la refinería. Se observó que, aunque muchos estudios se centran en los tanques, estos son meros componentes aislados que no reflejan la complejidad de las relaciones existentes dentro de una refinería.

Agradecimientos

La National Science Foundation apoya el Centro de Rendimiento de Riesgos de Viento e Infraestructura (WHIP-C) a través de la subvención n.º 1841523, y la Junta Asesora Industrial del WHIP-C respaldó este trabajo a través de la subvención n.º WHIP2024_06. Las opiniones, conclusiones y resultados presentados en este documento son únicamente del autor y no representan necesariamente las opiniones de la NSF o del WHIP-C

Referencias

- Bailey, J. R., & Levitan, M. L. (2008). Lessons learned and mitigation options for hurricanes. *Process Safety Progress*, 27(1), 41–47. <https://doi.org/10.1002/prs.10218>
- Barto, J., & Gardoni, P. (2021). Wind shielding in refining and petrochemical facilities. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 214. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2021.104676>
- Bernier, C., & Padgett, J. E. (2019a). Buckling of aboveground storage tanks subjected to storm surge and wave loads. *Engineering Structures*, 197. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2019.109388>
- Bernier, C., & Padgett, J. E. (2019b). Fragility and risk assessment of aboveground storage tanks subjected to concurrent surge, wave, and wind loads. *Reliability Engineering and System Safety*, 191. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106571>
- Bernier, C., & Padgett, J. E. (2020). Fragility Assessment of Floating Roof Storage Tanks during Severe Rainfall Events. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 34(6). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)jcf.1943-5509.0001505](https://doi.org/10.1061/(asce)jcf.1943-5509.0001505)
- Cruz, A. M., Steinberg, L. J., & Luna, R. (2001). *Identifying hurricane-Induce hazardous material release scenarios in a petroleum refinery*.
- Godoy, L. A., & Asce, M. (2007). Performance of Storage Tanks in Oil Facilities Damaged by Hurricanes Katrina and Rita. *Journal of Performance of Constructed Facilities*. <https://doi.org/10.1061/ASCE0887-3828200721:6441>
- Kameshwar, S., & Padgett, J. E. (2018). Fragility and Resilience Indicators for Portfolio of Oil Storage Tanks Subjected to Hurricanes. *Journal of Infrastructure Systems*, 24(2). [https://doi.org/10.1061/\(asce\)is.1943-555x.0000418](https://doi.org/10.1061/(asce)is.1943-555x.0000418)
- Liu, X., Levitan, M., & Nikitopoulos, D. (2008). Wind tunnel tests for mean drag and lift coefficients on multiple circular cylinders arranged in-line. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 96(6–7), 831–839. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2007.06.011>
- Mileti, D., & Henry, A. J. (1999). Disasters by Design: A Reassessment of Natural Hazards in the United State. In *Natural Hazards*.
- Misuri, A., Casson Moreno, V., Quddus, N., & Cozzani, V. (2019). Lessons learnt from the impact of hurricane Harvey on the chemical and process industry. *Reliability Engineering and System Safety*, 190. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106521>
- Olivar, O. J. R., Mayorga, S. Z., Giraldo, F. M., Sánchez-Silva, M., Pinelli, J. P., & Salzano, E. (2020). The effects of extreme winds on atmospheric storage tanks. *Reliability Engineering and System Safety*, 195. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2019.106686>
- Omidvar, B. (2023). Instruments vulnerability and resilience. In *Crises in Oil, Gas and Petrochemical Industries: Loss Prevention and Disaster Management* (pp. 29–48). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95163-0.00018-9>
- Ramírez, O. J., Mesa, A. M., Zuluaga, S., Muñoz, F., Sánchez-Silva, M., & Salzano, E. (2019). Fragility curves of storage tanks impacted by strong winds. *Chemical Engineering Transactions*, 77, 91–96. <https://doi.org/10.3303/CET1977016>
- Rossi, L., Casson Moreno, V., & Landucci, G. (2022). Vulnerability assessment of process pipelines affected by flood events. *Reliability Engineering and System Safety*, 219. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108261>
- Salzano, E., Basco, A., Busini, V., Cozzani, V., Marzo, E., Rota, R., & Spadoni, G. (2013). Public awareness promoting new or emerging risks: Industrial accidents triggered by natural hazards (NaTech). *Journal of Risk Research*, 16(3–4), 469–485. <https://doi.org/10.1080/13669877.2012.729529>
- Sengul, H., Santella, N., Steinberg, L. J., & Cruz, A. M. (2012). Analysis of hazardous material releases due to natural hazards in the United States. *Disasters*, 36(4), 723–743. <https://doi.org/10.1111/j.1467-7717.2012.01272.x>
- Stedman, D., & Vojjala, R. (2023). *Component-based Vulnerability of Large Facilities*.
- Wong, S., Sepaha, A., Swamy, N., Amoroso, S. D., & Naqvi, D. (2012). *Wind Loads On Non-Building Structures Using ASCE 7-10*.