

PROPAGACIÓN DE FUEGO EN UNA BATERÍA DE TANQUES DE ALMACENAMIENTO DE COMBUSTIBLE

FIRE PROPAGATION IN A TANK FARM FOR FUEL STORAGE

Susana N. Espinosa^a, Rossana C. Jaca^b y Luis A. Godoy^c

^a *Universidad Nacional del Comahue, Facultad de Ingeniería, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina, susana.espinosa@fain.uncoma.edu.ar*

^b *Grupo de Métodos Numéricos y Experimentales, Universidad Nacional del Comahue, Buenos Aires 1400, 8300 Neuquén, Argentina, rossana.jaca@fain.uncoma.edu.ar*

^c *CONICET y FCEFYN, Universidad Nacional de Córdoba, 5000 Córdoba, Argentina, luis.godoy@unc.edu.ar*

Palabras claves: fuego, almacenamiento de combustible, batería, radiación, efecto dominó.

Resumen. Existe un alto riesgo de incendio de tanques de almacenamiento de petróleo o productos químicos. Cuando el fuego producido en uno de los tanques no puede ser controlado rápidamente, el potencial de riesgo para los tanques vecinos aumenta con el tiempo. Además, el viento aumenta la vulnerabilidad de los tanques vecinos que se encuentran en la dirección de inclinación de la llama. Si la radiación neta incidente sobre uno o varios tanques adyacentes a la llama primaria es suficiente como para desencadenar un segundo evento, se generan una o varias llamas secundarias, iniciándose un efecto dominó. Modelos de transferencia de calor resueltos por elementos finitos se utilizan en este trabajo para simular la radiación neta incidente sobre múltiples tanques de almacenamiento de gasolina. Los resultados indican que los efectos sinérgicos pueden originar un evento de fuego secundario aún en tanques alejados de la llama primaria.

Keywords: fire, gasoline storage, tank farm, radiation, domino effect

Abstract. In oil or chemical storage tanks, there is a high risk that fire may start. If fire in one tank cannot be extinguished soon, then the potential risk to neighboring tanks increases with time. Further, wind increases the vulnerability of tanks located in the direction of wind. If the net incident radiation affecting one or several tanks is enough as to trigger a second event, then secondary flames start in what is known as a domino effect. Heat transfer models are used in this work to simulate the net incident radiation on multiple tanks for gasoline storage. The results indicate that the heat and flame propagation may reach tanks that are far from the primary source of fire.

1 INTRODUCCIÓN

La concentración de tanques de almacenamiento de sustancias químicas peligrosas, líquidos inflamables y combustibles, en zonas de producción de petróleo y plantas químicas constituyen potenciales áreas de riesgo que pueden derivar en accidentes en cadena. Accidentes recientes han sido reportados en la literatura (Chang y Lin, 2006, Johnson, 2010, Mishra et al., 2013, Sharma et al., 2013, Abbasi et al., 2014), siendo los más frecuentes aquellos asociados a fuego (Reniers y Cozzani, 2013). De acuerdo a estos autores, un alto porcentaje de incendios son provocados por accidentes naturales, y los de mayor incidencia son debidos a impacto de rayos sobre tanques de almacenamiento de materiales inflamables o combustibles. Los tanques de almacenamiento se disponen espacialmente en grupos siendo los tanques externos los más vulnerables para ser impactados por rayos (Necci et al., 2014). Otras causas tales como tareas de mantenimiento o llenado-vaciado de tanques, pueden dar inicio a un incendio y en ese caso, todos los tanques de la batería tienen la misma probabilidad de producir una llama.

El *escalado temporal y/o propagación espacial* del evento primario producirá eventos secundarios que pueden afectar a toda la planta, en lo que se conoce como *efecto dominó*. Cuando ocurre un efecto dominó, los resultados del evento primario (radiación, explosión, derrames, etc.) se replican en tanques vecinos e incrementan con el transcurso del tiempo, derivando en consecuencias más severas que las del evento inicial.

Los efectos físicos asociados a la posible propagación de accidentes se conocen como *Vectores de Escalado* y fueron identificados en este trabajo como radiación neta incidente sobre los tanques desde la llama y derrame de combustible. Generalmente un incendio se inicia sobre la superficie del combustible almacenado generando una llama vertical que asciende debido a fuerzas de empuje. Este tipo de incendio se denomina Pool Fire (PF), y se caracteriza por una llama de igual diámetro que el tanque donde se origina y una altura que depende principalmente del tipo de combustible almacenado, del diámetro del tanque y de las condiciones ambientales. Sin embargo, si con el transcurso del tiempo los medios de mitigación del fuego no logran controlarlo, las altas temperaturas provocadas sobre la estructura del tanque bajo fuego producirán fisuras y el consiguiente derrame de combustible, haciendo que el fuego envuelva a todo el tanque en lo que se conoce como Full Surface Fire (FSF). Aunque en este caso se ha producido un *escalado temporal* del evento primario, puesto que la radiación emitida por un FSF es superior a la del evento primario inicial (PF), el mismo puede derivar en un *escalado espacial*, debido al incremento de radiación neta incidente sobre tanques adyacentes. Es importante aclarar que no consideramos la propagación espacial del fuego por derrame de combustible puesto que en nuestro análisis utilizamos gasolina líquida y generalmente se construyen piletas de contención para evitar que el derrame de combustible alcance a los tanques vecinos.

En este trabajo fueron seleccionados un conjunto de escenarios representativos, con y sin viento, considerando diseños alternativos en la disposición de tanques y variando las distancias de separación entre ellos. Modelos empíricos son utilizados para estimar las características geométricas y la radiación emitida por una llama producida por la combustión de gasolina almacenada en uno de los tanques de una batería de tanques idénticos. No es tenida en cuenta la posibilidad de explosión en los tanques.

La literatura de análisis de riesgo estudia el efecto dominó desde el punto de vista estadístico, calculando para cada uno de los tanques vecinos la frecuencia y probabilidad de ser afectados por el evento primario y estableciendo, en base a datos experimentales y análisis de eventos reales, los valores límites máximos para los diferentes vectores de escalado

(Cozzani et al., 2006, Argenti et al., 2014, Khakzad y Reniers, 2015, Landucci et al., 2017, Yang et al., 2018)

Para el caso de incendios, se asume que tanques adyacentes a la llama primaria se encenderán originando una llama secundaria si reciben una radiación mayor o igual a 15 kW/m^2 durante 10 minutos o más (Cozzani et al., 2005).

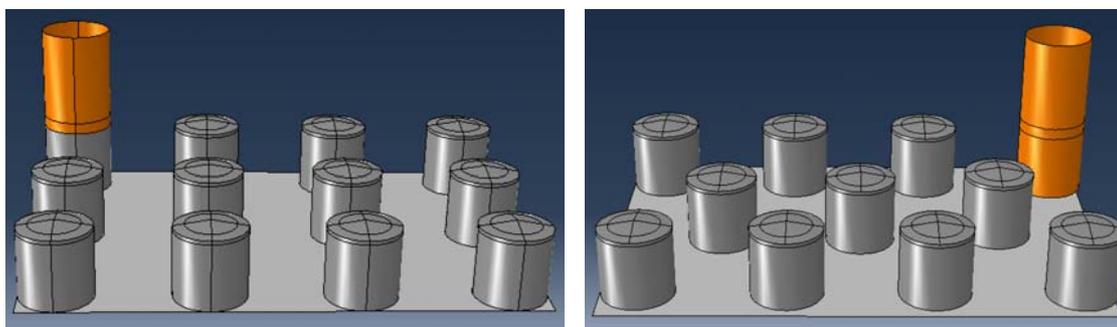
De acuerdo al criterio anterior, cuando tanques no involucrados directamente en el accidente primario son impactados por niveles de radiación iguales o superiores al valor límite de 15 kW/m^2 , ocurrirá uno o varios eventos secundarios, generando un efecto dominó de 2° nivel. Si los efectos sinérgicos del evento primario y secundario resultan en niveles de radiación que exceden el límite permitido, se producirá un efecto dominó de 3° nivel, y así siguiendo. Esta secuencia de eventos puede conducir a la propagación del incendio a toda la planta. Sin embargo, la respuesta térmica ante una misma radiación incidente depende del nivel de combustible almacenado en los tanques, aspecto que no es tenido en cuenta en el análisis previo. Esto es, si analizamos el caso extremo de un tanque vacío sobre el que incide una radiación igual o superior a 15 kW/m^2 , podríamos inferir de acuerdo al criterio anterior, que el tanque se encenderá, lo que obviamente no ocurrirá porque el mismo no contiene combustible. Esta aparente contradicción radica en considerar que el valor límite corresponde a radiación incidente, cuando en realidad lo que establece el comportamiento térmico del tanque es la radiación *neta* incidente sobre el mismo, es decir, el resultado del balance de energía sobre cada tanque que tiene en cuenta no sólo la radiación proveniente de la llama sino también la que el mismo tanque emite hacia el ambiente externo y hacia sus propias superficies internas debido a las altas temperaturas que se verifican sobre su estructura. Asimismo, la distribución de temperatura en un tanque es el resultado de la transferencia de calor por radiación, convección y conducción, de modo que el problema real es muy complejo y no puede simplificarse considerando sólo la magnitud de radiación incidente. Por otro lado, el intercambio de energía radiante en el interior de un tanque sólo se produce a través del aire debido a que los líquidos son opacos a dicha radiación, lo que explica efectos térmicos diferentes para tanques que contienen distintos niveles de combustible.

El aporte principal de este trabajo es evaluar la posible propagación del fuego en un conjunto de escenarios seleccionados considerando tanques llenos de combustible (por ser la situación más comprometida) y aplicando técnicas rigurosas de transferencia de calor para realizar los balances de energía correspondientes a cada escenario de fuego y viento. En lo que sigue, el criterio utilizado para establecer si habrá o no efecto dominó se basa en determinar si la *radiación neta incidente* supera el límite máximo establecido de 15 kW/m^2 .

2 ESCENARIOS ANALIZADOS

En este trabajo se utilizó un procedimiento de análisis secuencial considerando las posibles combinaciones de eventos secundarios que pudieran ser provocados por un evento primario de fuego y determinando para cada una de ellas la posibilidad de efectos dominó de mayor nivel.

En la industria los tanques suelen distribuirse separados a igual distancia entre sí o bien agrupados en células de varios tanques, por lo cual hemos evaluado ambas configuraciones, considerando una batería de tanques separados un diámetro entre cáscaras y un conjunto de células de cuatro tanques separadas entre sí por una distancia de dos diámetros entre cáscaras. En todos los casos consideramos tanques atmosféricos de dimensiones idénticas en toda la batería, con un diámetro igual a su altura de $D=H=11.44 \text{ m}$, dispuestos en forma alineada (Figura 1a) o escalonada (Figura 1b). Los tanques son de acero, con techo cónico, y están llenos de gasolina hasta un 95% de su altura.



a) Diseño alineado en una batería de tanques idénticos y Pool Fire en uno de los tanques

b) Diseño escalonado en una batería de tanques idénticos y Full Surface Fire en uno de los tanques

Figura 1: Escenarios alternativos en una planta de almacenamiento de combustible. Separación de un diámetro entre cáscaras.

3 METODOLOGÍA

La metodología de análisis aplicada puede sintetizarse como sigue: se identifican los patrones de diseño de baterías y escenarios de fuego más probables eligiendo arbitrariamente una unidad como primaria y el resto como unidades secundarias. Se desarrolla inicialmente un escenario de Pool Fire sobre la unidad primaria y se calcula por medio de elementos finitos la distribución de temperaturas sobre unidades secundarias y la radiación neta incidente por unidad de área. Si la misma supera el valor máximo de 15 kW/m^2 , habrá efecto dominó de mayor nivel. En este caso se extiende el análisis al resto de las unidades chequeando todos los niveles de fuego posibles. Si por el contrario, la radiación neta incidente sobre los tanques vecinos es inferior a la máxima, se asume un escalado temporal considerando Full Surface Fire en la unidad primaria y se estima nuevamente la posibilidad de escalado espacial de mayor nivel. El análisis anterior se repite para considerar todas las alternativas de unidades primarias y secundarias.

Es importante aclarar que las temperaturas y radiación neta corresponden al estado estacionario, de modo que no evaluamos el tiempo necesario para que se produzca la propagación del fuego sino la posibilidad de que en los diferentes escenarios se produzca o no un efecto dominó basado en la hipótesis de que no existe mitigación alguna del incendio.

4 MODELOS DE TRANSFERENCIA DE CALOR

El modelo de transferencia de calor requiere definir previamente la geometría de la llama para luego estimar la radiación emitida por unidad de área de su superficie, denominada potencia emisiva. Utilizamos un modelo realista para llamas producto de la combustión de hidrocarburos, conocido como *modelo de llama sólida bicapa (two layer solid flame model)*, para el que la potencia emisiva de la llama se estima considerando que el calor es radiado desde la superficie de un sólido cilíndrico con dos zonas radiantes o capas, una zona inferior de llama clara o visible y alta potencia emisiva y una zona superior oscurecida por la formación de humo u hollín, con menor potencia emisiva. El tanque bajo fuego se conoce como tanque fuente. Los tanques adyacentes a la llama se denominan tanques objetivo, y reciben radiación desde el tanque fuente aumentando la temperatura de la cáscara y el techo, y produciendo una transferencia de calor por radiación y convección hacia el medio ambiente que los rodea y hacia el interior de los mismos. Por lo tanto, la distribución de temperatura

estacionaria en dichos tanques y por ende la radiación neta incidente sobre su superficie resulta de un balance de energía sobre los tanques objetivo, considerando los tres modos de transferencia de calor.

Los modelos de geometría de llama y transferencia de calor para llama vertical y llama inclinada por el viento han sido reportados en trabajos previos (Espinosa y Jaca, 2016, Espinosa et al., 2018b). Se remite al lector a dichos trabajos para mayores detalles.

5 MODELO COMPUTACIONAL

La simulación de cada uno de los escenarios de fuego se realizó por medio de elementos finitos, utilizando la herramienta computacional ABAQUS-Simulia (Dassault Systems, 2006). El modelo de transferencia de calor estacionario se implementó en Abaqus estándar por medio de elementos de transferencia de calor cuadrangulares y triangulares de 6 y 8 nodos (DS6 y DS8), respectivamente, considerando conducción, convección y radiación de cavidad (*fully implicit cavity radiation*) con propiedades dependientes de la temperatura.

6 RESULTADOS

6.1 Consideraciones generales

La Figura 2 muestra la distribución de temperaturas ($^{\circ}\text{C}$) y del flujo neto de calor radiante (W/m^2) sobre un tanque vecino a una llama tipo FSF. Las magnitudes máximas se establecen en la superficie del tanque directamente enfrentada a la llama. Debido al efecto refrigerante de la gasolina líquida en el interior del tanque, las temperaturas máximas se verifican en la zona superior del mismo, en contacto con el aire interno. Por el contrario, el máximo flujo de calor radiante se establece sobre la superficie en contacto con la gasolina debido a que la radiación incidente desde la llama no puede propagarse hacia superficies internas a través de un líquido.

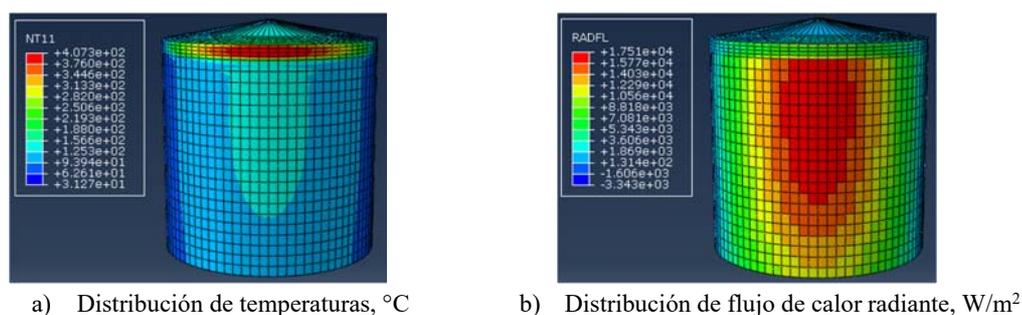


Figura 2: Distribución estacionaria de temperaturas y radiación neta incidente desde un FSF.

En este punto es conveniente aclarar que la radiación es un fenómeno de superficie y su magnitud depende de la geometría y posición relativa de emisor y receptor, de modo que el flujo de calor neto incidente sobre el tanque objetivo variará si modificamos la distancia que lo separa de la llama, o si la llama evoluciona de un PF a un FSF, pero no necesariamente se modificará si dicho tanque se expone ahora al efecto de una segunda llama. En otras palabras, el flujo máximo de calor radiante aumentará si un segundo foco emisor actúa *sobre la misma superficie* sobre la que actúa el primer emisor. Estas consideraciones deben tenerse en cuenta para entender los resultados de las siguientes secciones.

6.2 Análisis de posibles efectos dominó en diferentes escenarios de fuego sin viento

Consideremos una batería de N tanques idénticos separados un diámetro entre sus cáscaras (Figura 1). Puesto que todos los tanques tienen la misma probabilidad de ser afectados por el fuego, elegimos arbitrariamente uno de los tanques como tanque fuente. Debido al diseño de la batería, el análisis puede realizarse considerando sólo 4 de dichos tanques, y extrapolando resultados a la planta completa. En este caso asumimos una configuración alineada, como muestra la Figura 3a. El tanque T1 se ha elegido como unidad primaria, considerando inicialmente que se ha desarrollado un Pool Fire (Figura 3b). En esta configuración los tanques 2 y 3 están simétricamente ubicados respecto al tanque T1, y por lo tanto recibirán la misma radiación neta proveniente de T1. Bajo este escenario, la máxima radiación neta incidente calculada para los tanques T2 y T3 es aproximadamente 5 kW/m^2 y 2.5 kW/m^2 para el tanque T4. Como estos valores son inferiores al valor límite de 15 kW/m^2 , concluimos que en este caso no habrá escalado espacial del evento primario.

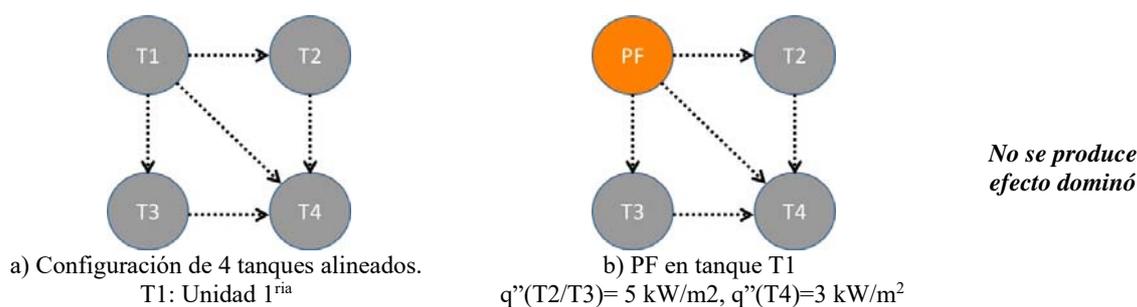


Figura 3: Escenario 1, tanques alineados y PF en uno de los tanques, q'' : radiación neta máxima

Consideremos ahora que se produce un escalado temporal en el tanque T1 y la llama evoluciona desde un Pool Fire a un Full Surface Fire (Figura 4a). La radiación calculada para los tanques T2 y T3 es de 17 kW/m^2 , mientras que en el tanque 4 es del orden de 8 kW/m^2 . De acuerdo a estos valores, se generará un evento de fuego de segundo orden con dos nuevos focos Pool Fire, como muestra la Figura 4b). Sin embargo, aún en este escenario de tres tanques bajo fuego, el tanque T4 recibe una radiación neta inferior al límite máximo y no se encenderá. Un escalado temporal en los tanques 2 y 3 resultará en 3 Full Surface Fire (Figura 4c) y en este caso los efectos sinérgicos sobre el tanque T4 producen una radiación neta de 22 kW/m^2 , generando un evento de fuego de tercer nivel. Como los tanques de toda la batería son idénticos y están igualmente separados entre sí, se producirá un efecto dominó de mayor nivel y finalmente el fuego se extenderá a toda la planta.

Los dos siguientes escenarios de fuego estudiados se muestran en las Figuras 5 y 6, y consideran los casos anteriores pero con una configuración escalonada de tanques en la batería. Análogamente, no habrá efecto dominó cuando el fuego sea de tipo PF (Figura 5). Si en lugar de T1 consideramos T2 como unidad primaria en la Figura 5a los tres tanques adyacentes recibirán una radiación máxima de 5 kW/m^2 , con lo que se descarta un efecto dominó, pero si el fuego en el tanque T1 escala a un FSF, se encenderán los tanques T2 y T3 (Figura 6b) sin afectar al tanque T4. Si posteriormente uno de los tanques T2/T3 o ambos escalan a un FSF, los efectos sinérgicos encenderán el tanque T4, extendiéndose a toda la planta por efecto dominó (Figuras 6c y 6d).

Los escenarios 5 y 6 (Figuras 7 y 8, respectivamente) contemplan baterías diseñadas con células idénticas de cuatro tanques, separadas dos diámetros entre sí (cáscara a cáscara). En la Figura 7 los tanques están alineados y siguiendo la secuencia de eventos dada en la Figura 4, se producirán FSF en toda la célula. Los tanques T5 y T7 de la célula vecina recibirán la misma radiación debido a que están ubicados simétricamente respecto a los focos de fuego.

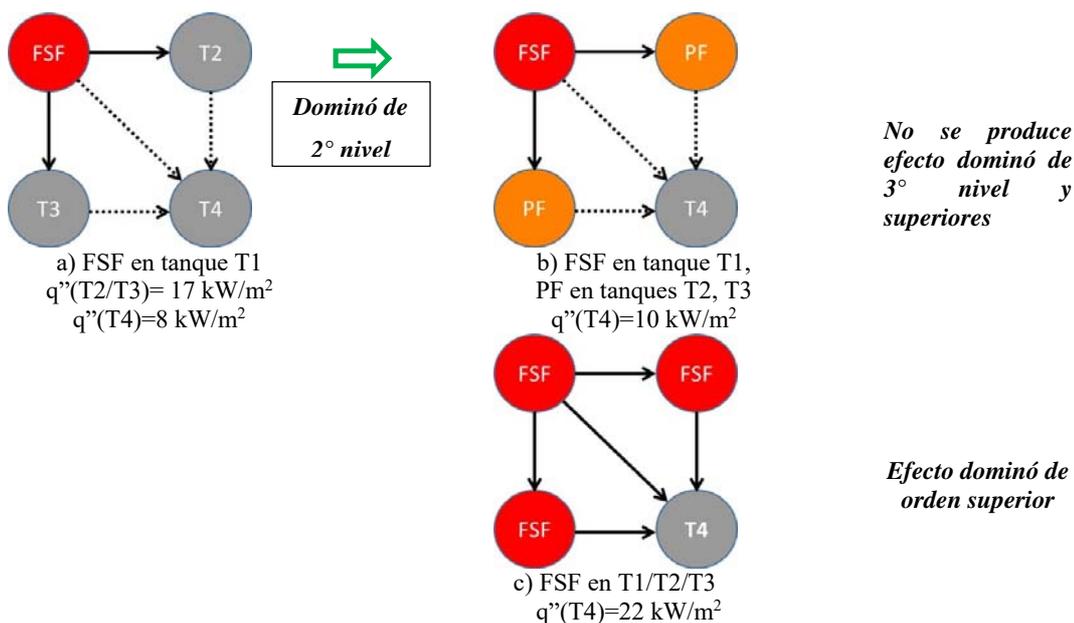


Figura 4: Escenario 2, tanques alineados y escalado temporal en tanques bajo fuego

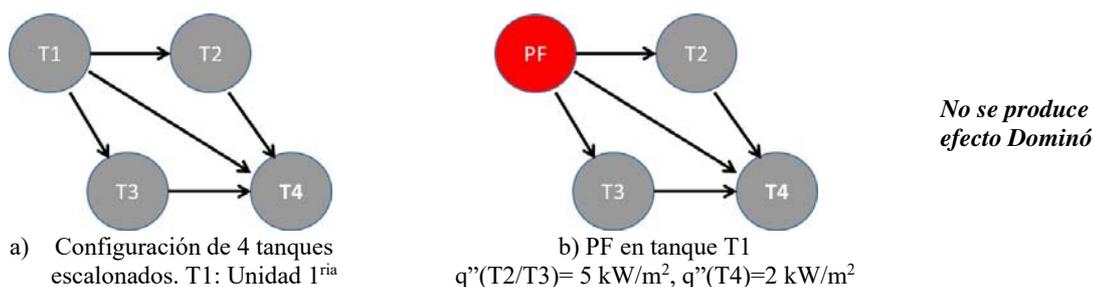


Figura 5: Escenario 3, tanques escalonados y PF en uno de los tanques

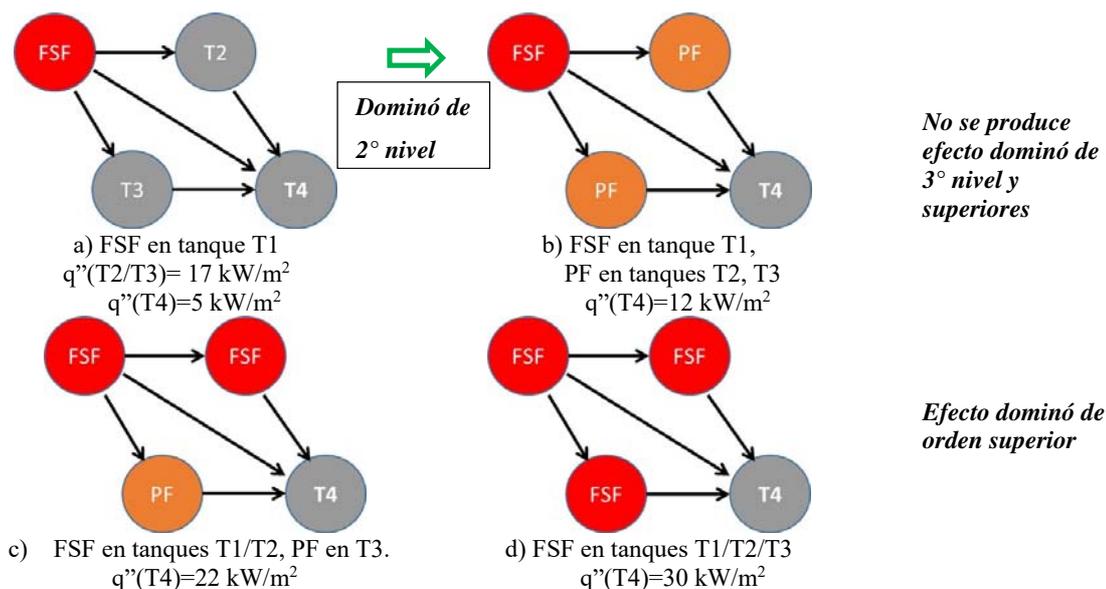


Figura 6: Escenario 4, tanques escalonados y escalado temporal en tanques bajo fuego

La radiación neta calculada para ellos es inferior a 15 kW/m^2 . De modo que no se encenderán los tanques vecinos a la célula bajo fuego que estén a dos diámetros de distancia en dirección horizontal o vertical. Si en cambio se produce un evento FSF en los 4 tanques de una célula escalonada, al menos uno de los tanques de células vecinas recibirá una radiación neta superior a 15 kW/m^2 (Figura 8) con lo cual en cada célula vecina se repetirá la secuencia de la Figura 6, resultando en un efecto dominó a escala global. Comparando los escenarios 5 y 6 notamos que en la configuración alineada, la radiación emitida por los tanques bajo fuego T1 y T2 no incide sobre los tanques T5 y T7, debido a que los tanques T3 y T4 actúan como pantallas de bloqueo. Esto no ocurre cuando la configuración es escalonada, donde los efectos sinérgicos provocan el encendido de tanques en las células vecinas.

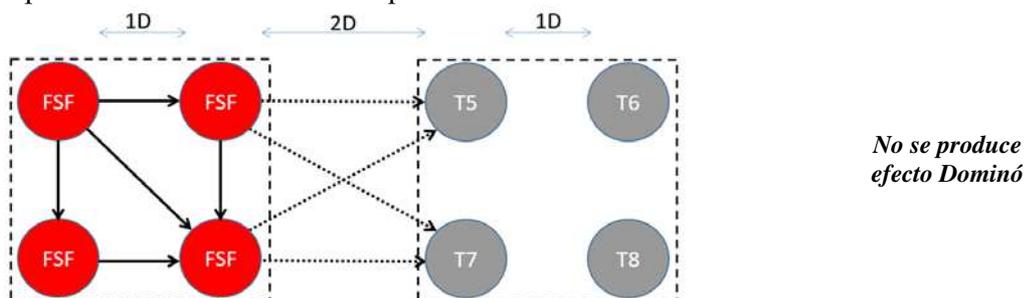


Figura 7: Escenario 5, tanques idénticos en toda la batería distribuidos en células de 4 tanques alineados, separación 1D entre tanques, separación 2D entre células (cáscara a cáscara). $q''(T5/T7)=10 \text{ kW/m}^2$.

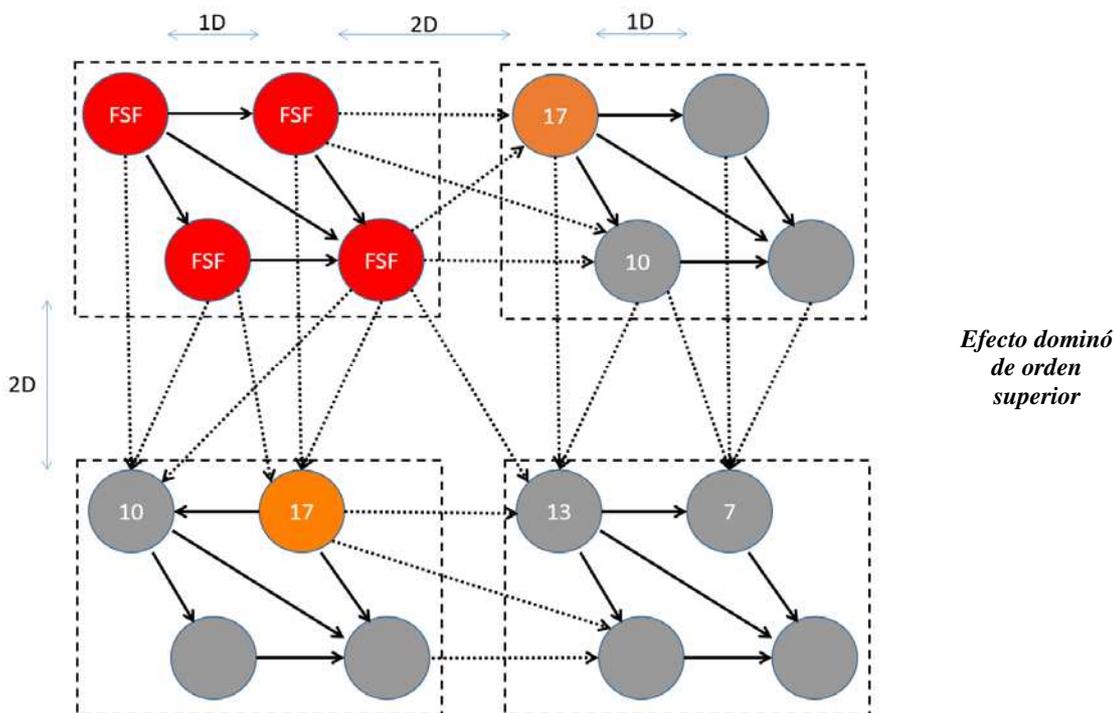
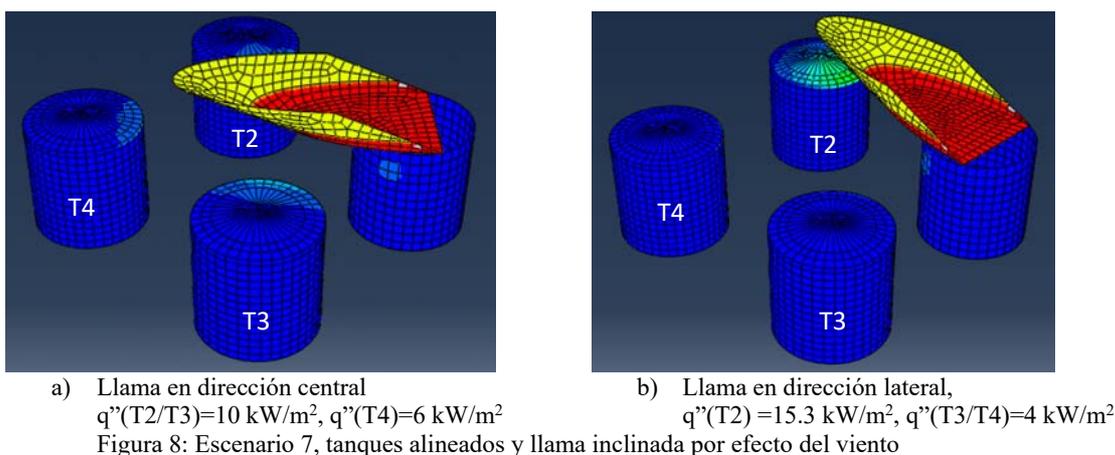


Figura 8: Escenario 6, tanques idénticos en toda la batería distribuidos en células de 4 tanques escalonados, separación 1D entre tanques, separación 2D entre células (cáscara a cáscara). La radiación neta incidente se indica con un número (en kW/m^2) dentro de cada círculo. Las flechas punteadas indican efectos sinérgicos actuando sobre tanques de células vecinas.

6.3 Análisis de posibles efectos dominó en escenarios de fuego y viento

A continuación sumamos la acción del viento al escenario de fuego para determinar su efecto sobre la propagación del fuego. La dirección del viento inclina la llama, reduciendo la distancia entre la llama y el/los tanques que se encuentran en dicha dirección. Estos efectos se incrementan cuanto mayor es la intensidad del viento (Espinosa et al., 2018a) de tal forma que en un escenario de fuego y viento se incrementará la probabilidad de un efecto dominó.

Para determinar las magnitudes de radiación neta incidente sobre los tanques adyacentes a la llama evaluamos el desarrollo de fuego con vientos del orden de 45 km/h actuando en dirección a uno de los tanques de una batería de tanques idénticos alineados, separados un diámetro entre sus cáscaras. Debido a que la radiación neta incidente será mayor para los tanques sobre los que se inclina la llama, los dos casos estudiados se muestran en la Figura 8 donde los diferentes colores de la llama indican la capa clara y la capa oscura del modelo bicapa. En la Figura 8a la llama se inclina en dirección al tanque central y en la Figura 8b se inclina en dirección al tanque lateral de la misma configuración. Para el primer caso, los tres tanques vecinos al tanque bajo fuego reciben una radiación inferior al límite máximo, y por lo tanto, no habrá escalado espacial del fuego. Por el contrario, la radiación incidente sobre el tanque T2 del segundo caso supera el límite máximo, de modo que se producirá un efecto dominó a escala global. En escenarios de fuego reales se producen cambios de presión que modifican la dirección del viento, haciendo que los tanques vecinos a la llama sean más vulnerables que aquellos expuestos a fuego en escenarios de viento leves o nulos.



7 CONCLUSIONES

La posibilidad de que el fuego se propague por efecto dominó fue evaluada para un conjunto de escenarios representativos. Modelos empíricos fueron utilizados para estimar la geometría de la llama producida por combustión de gasolina para dos casos extremos: ausencia de viento y vientos fuertes. El criterio utilizado para confirmar o descartar el escalado del fuego a tanques vecinos fue tomado de la literatura de análisis de riesgo considerando un valor máximo permitido para la radiación neta incidente sobre tanques vecinos a la llama. Todos los tanques de la batería se consideraron idénticos de tal forma que la probabilidad de generar un evento primario de fuego sea la misma en cada uno de ellos.

Modelos rigurosos de transferencia de calor fueron implementados en ABAQUS para estimar las magnitudes de temperatura y radiación neta incidente sobre tanques adyacentes a la llama.

Se determinó que la configuración de tanques dispuestos en forma escalonada es la más vulnerable cuando la radiación es el vector de escalado, tanto si los N tanques se distribuyen a

igual distancia en toda la batería como si se agrupan en células de cuatro tanques separados una distancia de dos diámetros entre cáscaras. El viento aumenta la vulnerabilidad de los tanques vecinos que se encuentran en la dirección de inclinación de la llama.

Los resultados obtenidos indican que los efectos sinérgicos pueden originar un evento de fuego secundario aún en tanques alejados de la llama primaria.

REFERENCIAS

- Abaqus. Simulia. Unified FEA. Dassault Systems. Warwick, Rhode Island. USA, 2006
- Abbassi, M., Benhelal, E., Ahmad, A., Designing an Optimal Safe Layout for a Fuel Storage Tanks Farm: Case Study of Jaipur Oil Depot. *International Journal of Chemical, Nuclear, Metallurgical and Materials Engineering*, 2:157-165, 2014.
- Argenti, F., Landucci, G., Antonioni, G., Cozzani, V., Frequency Evaluation for Domino Scenarios Triggered by Heat Radiation Exposure. *Chemical Engineering Transactions*, 36:373-378, 2014.
- Chang, J. y Lin, C., A study of storage tank accidents. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 19: 51–59, 2006.
- Cozzani, V., Gubinelli, G., Antonioni, G., Spadoni, G., Zanelli, S., The assessment of risk caused by domino effect in quantitative area risk analysis. *Journal of Hazardous Materials*, A127:14-30, 2005.
- Cozzani, V., Gubinelli, G., Salzano, E., Escalation thresholds in the assessment of domino accidental events. *Journal of Hazardous Materials*, A129:1-21, 2006.
- Espinosa, S.N. y Jaca, R.C., Transferencia de calor entre tanques de almacenamiento de combustibles expuestos a fuego. *Mecánica Computacional*, 34:135-149, 2016.
- Espinosa, S.N., Jaca, R.C., Godoy, L.A., Efecto de niveles crecientes de viento sobre la distribución de temperaturas en tanques de gasolina expuestos a fuego. *Mecánica Computacional*, 36: 175-184, 2018a.
- Espinosa, S.N., Jaca, R.C., Godoy, L.A., Thermal and structural analysis of a fuel storage tank under an adjacent pool fire. *Fire Research*, 2:48, 31-36, 2018b.
- Johnson, D., The potential for vapour cloud explosions e Lessons from the Buncefield accident. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23:921-927, 2010.
- Khakzad, N. y Reniers, G., Using graph theory to analyze the vulnerability of process plants in the context of cascading effects. *Reliability Engineering and System Safety* 143: 63–73, 2015.
- 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: 37–53, 2017.
- Mishra, K., Wehrstedt, K., Krebs, H., Lessons learned from recent fuel storage fires. *Fuel Processing Technology* 107:166–172, 2013.
- Necci, A., Argenti, F., Landucci, G., Cozzani, V., Accident scenarios triggered by lightning strike on atmospheric storage tanks. *Reliability Engineering and System Safety*, 127: 30–46, 2014.
- Reniers, G. y Cozzani, V., Domino Effects in the Process Industries. Modeling, Prevention and Managing. Elsevier, Great Britain, 2013.
- Sharma, R., Gurjar, B., Wate, S., Ghuge, S., Agrawal, R., Assessment of an accidental vapour cloud explosion: Lessons from the Indian Oil Corporation Ltd. accident at Jaipur, India. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 26:82-90, 2013.
- Yang, Y., Chen, G., Chen, P., The probability prediction method of domino effect triggered by lightning in chemical tank farm. *Process Safety and Environmental Protection* 116: 106–114, 2018.